



Яков Михайлович ФОГЕЛЬ
(27 февраля 1909 – 27 сентября 1977)

НАЦИОНАЛЬНЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
«ХАРЬКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»
ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. В. Н. КАРАЗИНА

Я. М. ФОГЕЛЬ

Физик. Учитель. Человек.

Ya. M. FOGEL'

Physicist. Tutor. Person.

Харьков
Видавництво «Підручник НТУ «ХП»
2010

УДК 537.534.8; 539.196

ББК 22.333

А 35

Составители:

Азаренков Н. А., проректор по научно-педагогической работе
ХНУ им. В. Н. Каразина, член-корр. НАН Украины, д-р физ.-мат. наук, проф.;
Бобков В. В., заведующий Проблемной лабораторией ионных процессов
ХНУ им. В. Н. Каразина, канд. физ.-мат. наук, доцент;
Грицына В. В., канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник
ХНУ им. В. Н. Каразина;
Слабостицкий Р. П., заместитель директора института физики высоких
энергий и ядерной физики ННЦ ХФТИ, д-р физ.-мат. наук.

До книги увійшли спогади дочки Якова Михайловича Фогеля, його учнів та соратників про нього – видатного вченого ХХ століття в галузі фізики електронних та атомних зіткнень і фізичної електроніки, людину універсальної наукової ерудиції, Вчителя, який виростив плеяду дослідників, що внесли помітний вклад у розвиток світової науки.

Я. М. Фогель. Физик. Учитель. Человек. : биобиблиогр. указатель
А35 / сост.: Н. А. Азаренков, В. В. Бобков, В. В. Грицына, Р. П. Слабостицкий. – Харьков : Вид-во «Підручник НТУ «ХПІ», 2010. – 308 с. : ил. – На рус. и англ. яз.

В книгу включены воспоминания дочери Якова Михайловича Фогеля, его учеников и соратников о нем – видном ученом ХХ столетия в области физики электронных и атомных столкновений и физической электроники, человеке универсальной научной эрудиции, воспитавшем плеяду исследователей, внесших заметный вклад в развитие мировой науки.

In the book there are the memoirs of Ya. M. Fogel's daughter, his disciples and colleagues about Him who was the eminent scientist of the XX century in physics of electron and atomic collisions and physical electronics, the person of universal science erudition. Ya. M. Fogel' was the Teacher, who trained the pleiad of disciples that noticeable contributed in the development of modern world sciences.

УДК 537.534.8; 539.196

ББК 22.333

© Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, 2010

© ННЦ «Харьковский физико-технический институт», 2010

© Видавництво «Підручник НТУ «ХПІ», 2010

ПАМЯТИ ЯКОВА МИХАЙЛОВИЧА ФОГЕЛЯ

В 2009 году исполнилось сто лет со дня рождения известного ученого-физика, одного из ведущих специалистов в области физики электронных и атомных столкновений и физической электроники, основателя и руководителя лаборатории атомных столкновений в Харьковском физико-техническом институте АН Украины, инициатора работ этого физического направления в Харьковском государственном университете, доктора физико-математических наук, профессора Якова Михайловича Фогеля.

С именем Я. М. Фогеля связаны оригинальные разработки аппаратуры для рентгеноструктурного анализа, масс-спектрографов молекулярных пучков, пионерские работы в физике электронных и атомных столкновений, развитие нового метода изучения процессов, протекающих на поверхности твердых тел – метода масс-спектрометрии вторичных ионов. Достижения Я. М. Фогеля в этих отраслях науки нашли большое признание как в нашей стране, так и за ее пределами.

Я. М. Фогель родился 27 февраля 1909 г. в городе Луганске Екатеринославской губернии в семье шахтера. Здесь он закончил механическую профшколу и в 1928 г. поступил на физико-математический факультет Харьковского физхиммат института (в настоящее время Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»). В 1931 г., еще будучи студентом, Я. М. Фогель начал свою научную деятельность в Украинском физико-техническом институте (УФТИ), где в 1932–1934 гг. молодым научным сотрудником принимал участие в проведении первых в Советском Союзе исследований по расщеплению атомных ядер лития и бора.

В 1934–1940 гг. Я. М. Фогель работал старшим научным сотрудником Украинского института прикладной химии. Уже в это время в его деятельности проявилась особенность, что стала определяющей во всей его последующей научной жизни – активный поиск новых идей и разработка нетрадиционных методов исследования. Разработанные и созданные при его участии первые в стране рентгеновские спектрографы и рентгеновские трубки большой светосилы позволили провести пионерские работы в рентгеновской спектроскопии сплавов – работы, которые были обобщены в кандидатской диссертации, что была защищена Я. М. Фогелем в 1940 г.

В те годы вместе с научными исследованиями Я. М. Фогель активно занимался и педагогической деятельностью. Он заведовал кафедрой физики в Харьковском гидрометеорологическом институте. В тяжелых условиях военного времени в полной мере проявились энтузиазм и исключительная

работоспособность Я. М. Фогеля, который сумел обеспечить бесперебойную деятельность возглавляемой им кафедры.

Вернувшись в УФИТИ после освобождения Харькова, Я. М. Фогель с 1943 по 1950 гг. занимался изучением вопросов магнитной фокусировки частиц с магнитным моментом и разработкой масс-спектрографов для молекулярных пучков – работами, которые стимулировались острой к тому времени проблемой сепарации изотопов. В 1950 г. в связи с необходимостью создания ионных источников для электростатических ускорителей Я. М. Фогель начал систематическое изучение элементарных процессов, протекающих при прохождении атомных и молекулярных пучков через разреженные и плотные среды. В результате многолетних исследований были определены характеристики процесса одноэлектронной перезарядки положительных ионов, впервые обнаружен и изучен процесс захвата двух электронов положительными ионами в одном акте столкновения, изучены процессы ионизации, диссоциативной ионизации и перезарядки двухатомных молекул в широком интервале скоростей столкновений, определены функции возбуждения частиц, образующихся в элементарных актах столкновений. Эти исследования сделали большой вклад в развитие представлений о механизмах процессов атомных столкновений и принесли Я. М. Фогелю широкое международное признание.

В 1961 г. Я. М. Фогель защитил докторскую диссертацию, содержание которой обобщало результаты изучения процессов, приводящих к возникновению отрицательных ионов при атомных столкновениях. В дальнейшем учениками Я. М. Фогеля на базе этих данных был предложен и разработан (впервые в мировой практике) метод зондирования горячей плазмы ускоренными пучками атомных частиц (нейтральных атомов водорода). Этот метод, основанный на взаимодействии (столкновениях) зондирующего пучка с частицами плазмы, был использован для определения основных параметров (плотность, температура) исследуемой плазмы в Харькове на плазменных потоках, в Ленинграде на установке «Альфа», а также в ее модификации в Америке. Следующим современным этапом развития этого метода является зондирование плазмы пучками тяжелых ионов (цезия, таллия и др.). В наше время эта модификация метода широко используется в мировой практике на современных термоядерных устройствах (токамаках, стеллараторах). С помощью этой методики ученики Я. М. Фогеля проводят измерения параметров плазмы в Харькове (Украина), Москве и Санкт-Петербурге (Россия), Мадриде (Испания), Грайсвальде (Германия), планируется ее использование в JET (Англия).

В послевоенные годы Я. М. Фогель активно продолжал заниматься педагогической деятельностью. С 1945 по 1958 гг. он читал лекции на физико-

математическом факультете Харьковского пединститута, а с 1952 г. – также и в Харьковском госуниверситете (Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина), где по 1973 гг. он руководил курсовыми и дипломными работами студентов.

С 1960 г. Я. М. Фогель – руководитель лаборатории атомных столкновений в Харьковском физико-техническом институте АН УССР (так тогда стал называться УФТИ). На основе предложенного им метода масс-спектрометрии вторичных ионов были начаты интенсивные исследования процессов, происходящих на поверхности твердых тел (адсорбция, катализ, газовая и электрохимическая коррозия, диффузия и ряд других). Результаты первых же работ показали исключительную перспективность нового метода исследований. Например, была предложена и обоснована новая трактовка механизма таких промышленно важных каталитических реакций, как окисление аммиака на платине и синтез аммиака на железе. Обладая широким научным кругозором, Я. М. Фогель сумел оценить государственную важность открытого им метода и с присущей ему энергией и энтузиазмом взялся за его пропаганду и внедрение в научные учреждения Советского Союза. На основании его доклада Президиум АН УССР в 1967 г. принял постановление о необходимости развития метода масс-спектрометрии вторичных ионов. За короткий срок при непосредственном участии Я. М. Фогеля этот метод исследований был освоен во многих научных центрах страны: в институте электросварки АН УССР им. Е. О. Патона (г. Киев), во Всесоюзном институте монокристаллов (г. Харьков), во Всесоюзном институте авиационных материалов (г. Москва), в институте газоразрядных приборов Министерства электронной техники (г. Рязань) и других.

У Я. М. Фогеля были ненасытная жажда познания, большой заряд научной любознательности. Наряду с напряженной и плодотворной деятельностью во главе лаборатории в Физико-техническом институте, по его инициативе и при его непосредственном руководстве в Харьковском государственном университете в 60-е годы начались исследования по двум направлениям: исследование взаимодействия быстрых электронов с молекулами и изучение радиационных повреждений приповерхностных слоев твердого тела и тонких пленок при ионном облучении. Вскоре эти исследования были расширены в направлении изучения процессов взаимодействия ионов средних энергий с твердым телом – явления вторичной ионной эмиссии (ВИЕ) и ионно-фотонной эмиссии (ИФЕ). Для проведения этих исследований в 1968 году в университете была создана проблемная научно-исследовательская лаборатория ионных процессов, первым руководителем, а затем научным руководителем которой был Я. М. Фогель.

Начатые в проблемной лаборатории исследования взаимодействия быстрых электронов с атмосферными газами были расширены на много-

атомные молекулы, что позволило сделать выводы о значительной роли излучения фрагментов диссоциации. Вследствие этого последующие исследования процессов взаимодействия электронов с молекулами были распространены на изучение распределения фрагментов диссоциации по разным степеням свободы и процессов диссоциативного возбуждения многоатомных молекул. Такие исследования дали важную информацию о перераспределении энергии, переданной электроном молекуле, внутри самой молекулы.

Начатые по инициативе Я. М. Фогеля в 60-х гг. прошедшего века в проблемной лаборатории университета исследования радиационных нарушений в тонких металлических пленках, облученных ионами средних энергий разных газов, проводятся и в настоящее время. Тонкопленочные металлические покрытия, на которые действуют потоки ионов, широко используются в разных отраслях техники (микроэлектроника, космические аппараты, ряд приборов ТЯР). Поэтому исследования радиационных дефектов в тонких металлических пленках являются весьма актуальными. При этом тонкие пленки – это абсолютно новый объект исследований, в котором в результате размерных эффектов наблюдается ряд особенностей в процессах образования и поведения радиационных дефектов.

С середины 60-х годов в проблемной лаборатории университета развиваются также исследования процессов на поверхности твердых тел с помощью предложенного Я. М. Фогелем метода МСВИ. В дальнейшем эти работы распространяются на исследование физико-химических процессов в мономолекулярных и субмономолекулярных слоях на поверхности металлов и полупроводников, а также на межфазных границах металл-диэлектрик-полупроводник (гетероструктуры). Результаты этих исследований нашли применение в ряде ведущих научных и промышленных учреждений страны. За цикл этих исследований ученики Я. М. Фогеля в 1981 г. получили премию 1-го Республиканского конкурса за лучшую научно-исследовательскую работу, выполненную в вузах УССР.

Кроме работ по практическому использованию явления ВИЭ для исследования физико-химических процессов на поверхности твердых тел проводится широкий цикл фундаментальных работ по изучению механизма явления ВИЭ металлов, полупроводников и диэлектриков.

В этот же период Я. М. Фогель предложил новое направление исследований процессов взаимодействия ионов средних энергий с твердым телом, которое основывается на исследовании излучения возбужденных частиц, отлетающих от поверхности твердого тела при облучении ионами средних энергий (1–100 кэВ), явление, в последствии названное ионно-фотонной эмиссией (ИФЭ). Это была абсолютно новаторская идея, и уже с конца 60-х

годов исследования ИФЭ широко распространились по всему миру. Хотя уже собрана обширная информация о закономерности явления ИФЭ, однако имеющиеся экспериментальные данные не удается описать в границах единой модели ИФЭ. Связано это с большой сложностью задачи, поскольку в рамках единых представлений необходимо принять во внимание параметры, характеризующие твердое тело (тип связи, электронная структура), динамику процессов взаимодействия частиц первичного пучка с частицами твердого тела, а также параметры, характеризующие состояние возбуждения отлетающей частицы. Вследствие этого эти исследования актуальны и сегодня, поскольку на базе ИФЭ разрабатываются методы исследования количественного и качественного состава твердых тел разного происхождения, в частности биологических объектов.

В 1962 г. Я. М. Фогель создает научные группы в Физико-техническом институте низких температур Академии наук Украины. Одна из них разрабатывала протонно-электронный инжектор на 200 кэВ, вторая проводила работы по созданию имитатора вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучения Солнца, предназначенного для исследования воздействия коротковолнового солнечного излучения на материалы космической техники. В основу работы имитатора был заложен предложенный Я. М. Фогелем новый метод генерации электромагнитного излучения, основанный на возбуждении сверхзвуковой струи газа в вакууме плотным электронным пучком. В дальнейшем метод был защищен тремя авторскими свидетельствами на изобретение. Уникальность метода заключается в возможности получать спектры разных агрегатных состояний вещества в струе в ряду атом-кластер-микрористалл. Благодаря этой возможности ученикам Я. М. Фогеля в дальнейшем удалось установить структурные, электронные и эмиссионные свойства кластеров инертных газов в широком диапазоне размеров и проследить эволюцию энергетического спектра и релаксационных процессов при квазинепрерывном переходе атома к твердому телу. Кроме того, был открыт новый тип излучения – поляризационное тормозное излучение (ПТИ) при рассеянии электронов на атомах инертных газов, возникающее в результате динамической поляризации атома в поле налетающего электрона, и установлены закономерности ПТИ и электронной составляющей ТИ в ультрамягком рентгеновском (УМР) диапазоне спектра. За данное открытие и исследования ПТИ Президиум НАН Украины присудил ученикам Я. М. Фогеля премию им. И. Пулюя в 2003 г.

В настоящее время различные варианты конструкций имитатора ВУФ и УМР излучения Солнца применяются при испытаниях элементов космической техники.

Интенсивно работая в области экспериментальной физики, Я. М. Фогель проводил большую научно-организационную деятельность. В течение

многих лет он был членом научных советов АН СССР по физической электронике и физике плазмы, членом комиссии по спектроскопии АН СССР. Отображением активной организационной деятельности Я. М. Фогеля, признанием его выдающегося вклада в ряд областей науки является факт его многолетнего участия в программных и организационных комитетах Всесоюзных и Международных конференций по физике электронных и атомных столкновений, эмиссионной электронике, физике столкновений атомных частиц с твердым телом, физике вакуумного ультрафиолета.

Количественный итог деятельности Я. М. Фогеля поражает: он опубликовал более трехсот научных работ, среди которых – ряд изобретений. Большое внимание Я. М. Фогель уделял подготовке квалифицированных научных кадров. Под его руководством выполнено и успешно защищено 30 кандидатских диссертаций. За большие заслуги перед наукой, за научно-педагогическую и активную организационную деятельность Я. М. Фогель был удостоен правительственных наград.

Я. М. Фогель имел универсальную научную эрудицию, отличался глубокой общей культурой. Наиболее ярко эти качества Якова Михайловича проявлялись в проведении научных семинаров. Семинары Якова Михайловича были школой научного мастерства, что работала с точностью часового механизма. неизменной чертой этих семинаров были его заключительные «два слова», в которых он после любого доклада или дискуссии четко и коротко обобщал все важнейшее из этого доклада, а также (и это главное) определял место этой работы в ряду подобных исследований, рассказывал об авторах этой работы и о других их работах. Понятно, что это мог сделать только ученый, владеющий энциклопедическими знаниями во многих областях науки.

Его научная деятельность отличалась динамизмом, упорством, и целенаправленностью. Яков Михайлович был широко эрудированным человеком. Он любил и хорошо знал музыку, особенно он любил творчество В. А. Моцарта, в частности, его симфонии. Хорошо знал живопись, был в восторге от портретов Рембрандта. Хорошо знал киноискусство, владел тремя иностранными языками (читал не только научную, но и художественную литературу на французском, немецком и английском языках). В то же время Яков Михайлович был скромным, доброжелательным и чрезвычайно чутким человеком. Для всех, кому повезло работать с Я. М. Фогелем, он навсегда останется образцом творческого, самоотверженного служения своему делу.

***В. М. Ажжжа, Н. А. Азаренков, В. Г. Баряхтар, И. А. Гирка,
А. Н. Довбня, И. И. Залюбовский, И. М. Карнаухов, А. Г. Наумовец,
Н. Г. Находкин, И. М. Неклюдов, Р. П. Слабоспицкий, В. Т. Толок,
а также ученики Я. М. Фогеля.***



Янек с мамой, Анной Михайловной Фогель
Yanya and his mother Anna Mikhailovna Fogel'



Яков Михайлович с женой Галиной Александровной
Yakov Mikhailovich with his wife Galina



Я. М. Фогель. Довоенные годы
Ya. M. Fogel' in prewar years



Яков Михайлович с другом. Довоенные годы
Yakov Mikhailovich with his friend. Prewar years



Яков Михайлович с женой Галиной Александровной и дочерью Ниной
Yakov Mikhailovich with his wife Galina and daughter Nina



Яков Михайлович с родственниками
Yakov Mikhailovich with relatives



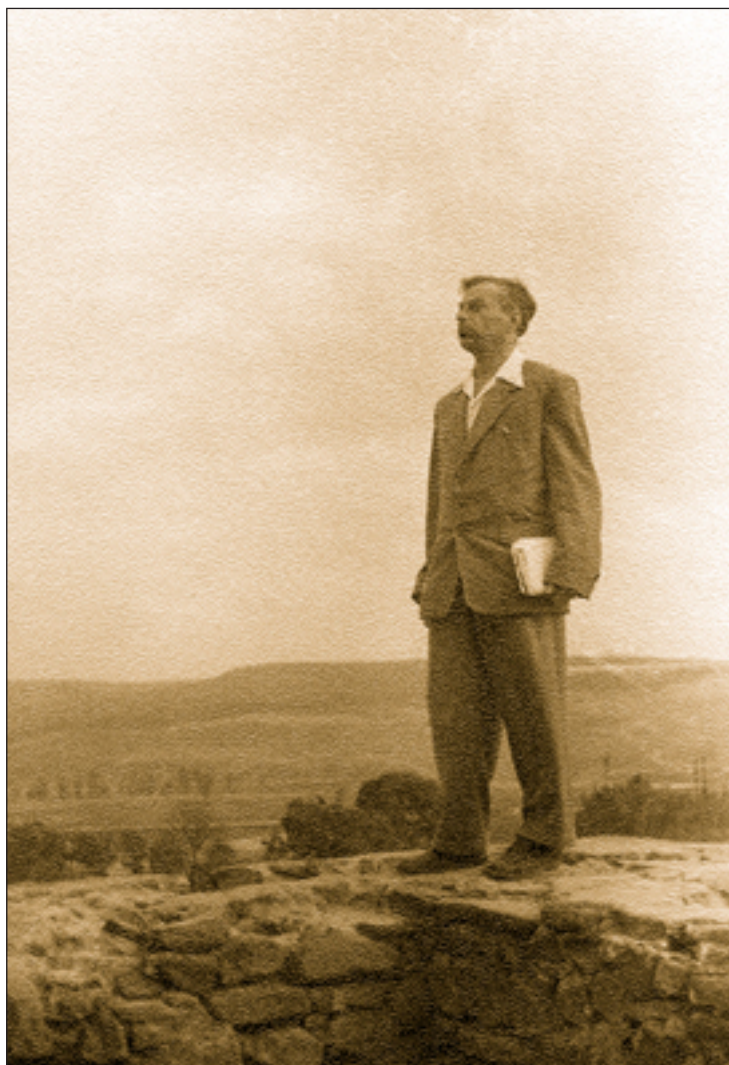
Яков Михайлович на отдыхе (Слева С. Брауде)
Yakov Mikhailovich on vacation (on his left S. Braude)



Яков Михайлович с друзьями (слева К. С. Гаргер, справа Витензон)
Yakov Mikhailovich with friends (K. S. Garger on his left, Vitenson on his right)



Яков Михайлович с друзьями (Одесса, 1947 г., слева Витензоны)
Yakov Mikhailovich with friends (Odessa, 1947; Vitensons on his left)







Яков Михайлович с внуком
Yakov Mikhailovich with his grandson



Знакомство с лабораторией участников Всесоюзной конференции
The acquaintance of the all-USSR conference participants with the Laboratory



Сотрудники лаборатории ХФТИ
Workers of KhPhTI Laboratory

YAKOV MIKHAILOVICH FOGEL'
(to the centenary of his birthday)

In 2009, we have marked a centenary of the birthday of the known physicist Yakov Mikhailovich Fogel', one of the leading experts in the physics of electronic and atomic collisions and physical electronics, the founder and the head of the Laboratory of Atomic Collisions at the Kharkov Institute of Physics and Technology (KhIPhT) of the National Academy of Sciences of Ukraine (NASU), the initiator of this physical direction at the Kharkov State University, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor. Ya. M. Fogel's name is connected with the elaboration of original facilities for x-ray diffraction analysis and mass-spectrography of molecular beams, the pioneer works in the physics of electronic and atomic collisions, the development of a new method for studying the processes that occur at the solid surface – the secondary ion mass-spectrometry (SIMS). His achievements in those scientific branches found a wide recognition both in our country and abroad.

Ya. M. Fogel' was born on February 27, 1909, in a town of Lugansk (in the Ekaterinoslav province at that time) in a miner's family. Here, he graduated from a mechanical professional school and, in 1928, entered the Physico-Mathematical Faculty at the Kharkov Institute of Physics, Chemistry, and Mathematics (now, the National Technical University "Kharkov Polytechnical Institute"). In 1931, being a student, Ya. M. Fogel' started his scientific activity at the Ukrainian Institute of Physics and Technology, where, in 1932–1934, he was a participant of the researches, the first in the Soviet Union, dealing with the splitting of lithium and boron atomic nuclei.

In 1934–1940, Ya. M. Fogel' worked as a senior scientific researcher at the Ukrainian Institute of Applied Chemistry. As early as that time, a certain feature revealed itself in his activity, which became later a key characteristic in all his following scientific work – the active search for new ideas and the development of nonconventional methods of study. The x-ray spectrographs and x-ray tubes with a high luminosity, which were the first in our country, were created with his participation. These devices allowed the pioneer works in the x-ray spectroscopy of alloys to be fulfilled. The results of those researches were generalized by Ya. M. Fogel' in his Ph. D. thesis, which was defended in 1940.

Along with scientific researches, Ya. M. Fogel' was actively engaged at that time in a pedagogical activity. He headed the Chair of Physics at the Kharkov Hydrometeorological Institute. Under hard conditions of the war-time,

the enthusiasm and an exclusive working ability of Ya. M. Fogel' revealed themselves in full. He managed to provide the chair headed by him to work continuously and without interruption.

After the liberation of Kharkov, Ya. M. Fogel' returned back to the Ukrainian Institute of Physics and Technology. In 1943–1950, he studied issues connected with the magnetic focusing of particles with a magnetic moment and developed mass-spectrographs for molecular beams. This activity was stimulated by the problem of isotope separation, challenging at that time. In 1950, owing to the necessity to create ionic sources for electrostatic accelerators, Ya. M. Fogel' began regular studies of elementary processes which run when atomic and molecular beams pass through rarefied and dense media. Long-term researches gave rise to the determination of characteristics of the process of one-electron recharge of positive ions. For the first time, the phenomenon of the capture of two electrons by positive ions in a single collision was found and studied. The processes of ionization, dissociative ionization, and recharging of two-atom molecules were studied in a wide range of collision velocities. The excitation functions of particles that are formed in elementary collision events were determined. Those researches made a large contribution to the development of the concept connected with mechanisms of atomic collision processes and provided a wide international recognition to Ya. M. Fogel'.

In 1961, Ya. M. Fogel' defended his doctoral thesis. Its contents generalized results obtained while studying the processes that generate negative ions at atomic collisions. On the basis of these data, Ya. M. Fogel's disciples proposed later and developed (for the first time in the world practice) a method for probing a hot plasma making use of accelerated beams of atomic particles (neutral atoms of hydrogen). This method, being based on the interaction (collisions) between the probing beam and plasma particles, was used to determine the key parameters (the density and the temperature) of plasma under investigation, in particular, in plasma fluxes (Kharkov), in an "Alpha" installation (Leningrad), and in its modification (the United States). The following stage in the development of this method is the plasma probing by heavy-ion beams (cesium, thallium, and so on). Nowadays, this modification is widely used in modern thermonuclear installations (tokamaks and stellarators) throughout the world. Ya. M. Fogel's disciples use this technique to carry out measurements in Kharkov (Ukraine), Moscow and Saint-Petersburg (Russia), Madrid (Spain), and Greifswald (Germany). It is also planned to be applied at the Joint European Torus (United Kingdom).

Along with the scientific and research activity, Ya. M. Fogel' was engaged in a pedagogical one. From 1945 to 1958, he lectured at the Faculty of Physics and Mathematics of the Kharkov Teachers College, and – from 1952, simultaneously – at the Kharkov State University (now, the V. N. Karazin Kharkov National University). From 1952 to 1973, he supervised over the yearly essays and degree works of university students.

Since 1960, Ya. M. Fogel' had been the head of the laboratory of atomic collisions at the KhIPhT of the Academy of Sciences of UkrSSR (AS UkrSSR). The secondary ion mass spectrometry method proposed by him made it possible to start intensive researches of the processes that occur at solid surfaces (adsorption, catalysis, gas and electrochemical corrosion, diffusion, and a number of others). Even the results of the first works revealed an exclusive potential of the new research method. For example, a new interpretation concerning the mechanism of such catalytic reactions important for industry as ammonia oxidation on platinum and ammonia synthesis on iron was suggested and substantiated. Possessing a wide scientific outlook, Ya. M. Fogel' managed to estimate the importance of the method discovered by him for the whole country. With an energy and an enthusiasm inherent to him, he began to popularize and introduce this method at scientific institutions of the Soviet Union. In 1967, on the basis of his report, the Presidium of the AS UkrSSR passed a resolution about the necessity of the development of the secondary ion mass spectrometry method. Within short terms and with Ya. M. Fogel's personal participation, this research method was adopted at a good many scientific centers of our country. In particular, these are the E. O. Paton Institute of Electric Welding of the AS UkrSSR (Kiev), the All-Union Institute of Single Crystals (Kharkov), the All-Union Institute of Aviation Materials (Moscow), the Institute of Gas-Discharge Devices of the Ministry of Electronic Engineering (Ryazan, Russia), and others.

Ya. M. Fogel' had an unquenchable thirst for knowledge and a large potential of scientific inquisitiveness. Working intensively and fruitfully as the head of a laboratory at the KhIPhT, he was an initiator and a manager of researches in two directions at the Kharkov State University in the 1960s: the interaction of fast electrons with molecules and damages in near-surface layers of solids and thin films induced by ionic irradiation. After a short period, the researches were extended by including the study of the interaction between medium-energy ions and solids; these are secondary ion emission (SIE) and ion-photon emission (IPhE). In 1968, the pioneer research group at the University served as a basis to

create a task-oriented research laboratory for studying ionic processes, and Ya. M. Fogel' became its first head and, then, a scientific manager.

The investigations of the interaction between fast electrons and atmospheric gases, which were started at this laboratory, were extended to include multiatomic molecules into consideration. As a result, a conclusion was drawn that the radiation emission by dissociation fragments plays a significant role. Therefore, according to Ya. M. Fogel's proposition, the researches of electron-molecule interaction processes were extended further to include the studies of dissociation fragment distributions over the degrees of freedom, as well as the processes of dissociative excitation of multiatomic molecules. These researches gave an important information about the redistribution of the energy, which was transferred by an electron to a molecule, within the molecule itself.

On Ya. M. Fogel's initiative, a comprehensive study of radiation-induced damages in thin metal films irradiated with medium-energy ions of various gases has been carried out at the task-oriented laboratory of the Kharkov University since the beginning of the 1960s. Thin-film metal coatings subjected to ionic irradiation are widely used in various branches of engineering (microelectronics, space vehicles, a number of devices for thermonuclear reactors, etc.). That is why the results of this research dealing with radiation-induced defects emerged in thin metal films due to ionic irradiation are quite topical. Moreover, the thin films compose an absolutely new object to study, because a number of specific features in the defects' behavior, owing to dimensional effects, can be observed both in the course of defect generation and during the defect lifetime.

Since the mid-1960s, the task-oriented laboratory of the Kharkov University study the processes running on solid surfaces making use of the SIMS method proposed by Ya. M. Fogel'. Later on, those researches have been extended upon physico-chemical processes running in monomolecular and sub-monomolecular layers on metal and semiconductor surfaces, and at the metal-insulator-semiconductor interfaces (heterostructures). The results of those investigations were used at several leading scientific and industrial institutions throughout the country. For a cycle of those researches, Ya. M. Fogel's disciples were awarded in 1981 by the prize of the First Republican Competition on the best scientific research work that had been fulfilled at higher schools of the UkrSSR.

Besides the works devoted to a practical application of the SIE phenomenon to studying the physico-chemical processes at the solid surfaces, Ya. M. Fogel' carried out a wide cycle of fundamental works aimed at researching the mecha-

nism of SIE from metals, semiconductors, and insulators. In the same time period, Ya. M. Fogel' put forward a new direction in the investigations of the interaction between medium-energy ions and solids. It is based on the analysis of the radiation emission by excited particles that leave the solid surface due to its irradiation with medium-energy ions (1–100 keV). Later on, this method was coined as ion-photon emission. It was an absolutely pioneering idea. Nevertheless, the researches of the IPhE phenomenon have been extended considerably over the world already since the end of the 1960s. A large information content concerning the regularities of the IPhE phenomenon has been collected. Unfortunately, the available experimental data cannot be described in the framework of a single IPhE model. This circumstance is associated with a great complexity of the problem, because the parameters, which characterize a solid (the bond type and the electron structure), the dynamics of the interaction between particles of the irradiating beam and particles of the solid, as well as the parameters that characterize the excitation state of a leaving particle, has to be taken into consideration from the viewpoint of common ideas. These researches still remain to be actual, because the IPhE phenomenon is the basis for the development of methods for quantitative and qualitative studies of compositions of solids with different origins, in particular, biological objects.

In 1962, Ya. M. Fogel' created two new scientific groups at the Kharkov Institute for Low Temperature Physics and Technology (KhILTPhT) of the AS UkrSSR. One of them was aimed at developing a 200-keV proton-electron injector. The other dealt with the creation of a simulator of the vacuum ultra-violet (VUV) radiation of the Sun, which was intended for studying the action of the short-wave Sun's radiation on the materials of space vehicles. The functioning principles of a simulator were based on a new method proposed by Ya. M. Fogel' for the electromagnetic radiation generation, namely, the excitation of a supersonic gas jet in vacuum with the help of a dense electron beam. Later on, the method was defended by three inventor's certificates. The uniqueness of the method consists in the capability to obtain the spectra of various substances in the jet that can be in different aggregate states belonging to the atom-cluster-microcrystal sequence. Then, owing to the new possibility, Ya. M. Fogel's disciples managed to establish the structural, electron, and emission properties of inert gas clusters in a wide dimension range and to trace the evolutions of the energy spectrum and the relaxation processes on the quasicontinuous transition of atoms to a solid. In addition, a new type of radiation emission – polarization bremsstrahlung (PB) on the electron scattering by inert-gas

atoms – which emerges due to the dynamic polarization of an atom in the field of an incident electron was discovered, and the regularities of PB and its electron component in the ultrasoft x-ray (USX) spectral range were found. For their discovery and researches, the Presidium of the NASU awarded Ya. M. Fogel's disciples the I. Pulyui Prize in 2003.

Today, various structural versions of the UVU and USX Sun's radiation simulators are used in testing the elements of space vehicles. In addition, the scientists of the KhILTPhT of the NASU use them to study the structure and emission properties of mixed van der Waals clusters.

Intensively working in experimental physics, Ya. M. Fogel' carried out a large scientific and managerial activity. For many years, he had been a member of Scientific Councils of the AS of the USSR on Physical Electronics and Plasma Physics and a member of the Spectroscopy Commission of the AS of the USSR. A reflection of active managerial activity of Ya. M. Fogel' and a recognition of his outstanding contribution to a number of scientific branches is the fact that, for many years, he had been a member of the program and organizing committees of All-Union and International conferences on the physics of electronic and atomic collisions, emission electronics, collisions of atomic particles with a solid, and vacuum ultraviolet physics.

The quantitative yield of Ya. M. Fogel's activity is amazing. He published more than three hundred scientific papers, including several invention certificates. Ya. M. Fogel' paid a large attention to the training of skilled scientific researchers. He was a supervisor over 30 Ph.D. theses successfully defended. For his great services to the Soviet science and for his scientific-pedagogical and active managerial activity, Ya. M. Fogel' was awarded government awards.

Ya. M. Fogel' had a universal scientific erudition. He was distinguished by his profound general culture. These qualities of Yakov Mikhailovich manifested themselves most brightly at scientific seminars. The seminars headed by him were a school of scientific skill which worked like a clock-work. His "a few words" at the end of seminars were their invariable feature: after any report or discussion, Ya. M. Fogel' precisely and shortly generalized all major things from that report. He also – and this is a cornerstone issue – determined the place of this work in a series of similar researches, told about the authors of those researches and about their other works. It is clear that only a scientist, who possesses the encyclopedic knowledge in a good many fields of science, can do it.

His work was marked by dynamism, zeal, and purposefulness. Yakov Mikhailovich was a widely erudite person. He loved music and knew it well.

W. A. Mozart was his favorite; especially, he enjoyed his symphonies. He knew painting well, and admired Rembrandt's portraits of old men. Ya. M. Fogel' was well acquainted with motion-picture art. He spoke three foreign languages and read not only scientific, but also belletristic literature in French, German, and English. At the same time, Yakov Mikhailovich was a modest, benevolent, and extremely sensitive person. For everyone, who was lucky to work together with Ya. M. Fogel', he will remain forever as an example of a creative unselfish service to his affair.

*V. M. Azhazha, N. A. Azarenkov, V. G. Bar'yakhtar,
I. A. Girka, A. N. Dovbnya, I. I. Zalyubovsky,
I. M. Karnaukhov, A. G. Naumovets,
N. G. Nakhodkin, I. M. Neklyudov,
R. P. Slabospitsky, V. T. Tolok,
and Ya. M. Fogel's disciples*

ЛУЧШИХ ОТЦОВ, ЧЕМ МОЙ ПАПА, НЕ БЫВАЕТ

Мой папа... Обожаемый. Значительный. Надежный, как скала. Добрый бесконечно. Скромный. Умный, как никто другой в моем окружении. Сильный, с потрясающей силой духа. Идеал, к которому я стремилась.

Он дал мне все... Не только свои, по-видимому, неплохие гены. Главное – он по существу определил, каким человеком я стану, за что я не перестану его благодарить до своего последнего дня.

Я не помню, чтобы он очевидным образом воспитывал меня, наставлял или наказывал. Слово «нельзя» практически отсутствовало в его лексиконе. Разве что «не стоит»... Я никогда не слышала от него слов осуждения, он никогда не читал мне морали, не ставил меня в угол, не кричал на меня, и его руки бывали только ласковыми. Он просто разговаривал со мной. Если оказывалось, что я провинилась в чем-то, о вине не говорил. Папа рассматривал мой проступок (подчеркиваю – не употребляя слов «вина», «проступок») как бы с «научной» и житейской точки зрения, рассказывал какие-то истории из своей жизни и просто истории. Не говоря прямо обо мне, давал мне возможность оценить себя со стороны. А уж я сама приходила к выводу, насколько я права или неправа, чего мне не следует повторять в дальнейшем, должна ли я кому-то принести извинения. В результате я понимала, что совершила глупость или не очень достойный поступок. Я сама с собой решала, что ничего подобного никогда в жизни я больше не совершу, и никогда этому своему решению не изменяла. Это становилось постулатом, частью моей натуры. А иногда достаточно было одной папиной шутки, чтобы я ясно поняла, какой грех совершила. Он всегда говорил со мной почти как со взрослой, начиная с моих 5 лет. Боюсь, что когда я растила своего сына, я не всегда умела быть такой же сдержанной и мудрой, как папа.

Я росла в удивительной семье, где никогда не случалось ни ссор, ни скандалов. Какие-то разногласия во мнениях, конечно, бывали, но они разрешались в ходе мирной дискуссии.

У нас в доме был заведен постоянный ритуал: на ночь, когда я ложилась в постель, папа читал мне какие-нибудь книги, большей частью стихи, но также рассказы и сказки. Особенно я запомнила Лермонтова, Бернса, Уткина («Под каждой крышей свои мыши» – осталось в моей памяти, как заповедь), баллады Вальтера Скотта и Шиллера в переводе Жуковского, многое из переводов Маршак, включая и некоторые сонеты Шекспира.

Многое из этого я потом с неизменным удовольствием читала сначала сыну, а позднее и внуку. Нам всем очень нравились, в частности, великолепные сказки Оскара Уайльда.

Папа родился в небольшом шахтерском городке Луганске на Украине. Он был пятым ребенком в семье, но все четверо его старших братьев умерли в младенческом возрасте. Папа каким-то чудом выжил. Его отец был управляющим небольшой шахтой, мама – домохозяйкой. Отец погиб при взрыве шахты, когда папе было около 8 лет. После отцовской смерти и, безусловно, в связи с этим, папа превратился в босняка – так тогда называли беспризорных детей. Маме пришлось тяжело работать, за сыном уследить не удавалось. Маленький Яня в компании ему подобных мотался по улицам, таскал яблоки из соседских садов, участвовал во всяких дерзких выходках. И разговаривал, естественно, как босяк. Иногда ему за все его «подвиги» крепко попадало. С другой стороны, он сильно отличался от других уличных мальчишек, в особенности своим увлечением книгами. Поначалу он читал все, что попадалось ему в руки, но со временем у него стал вырабатываться вкус к хорошей литературе. Он читал не только художественную литературу, но и то небольшое, что попадалось ему из научно-популярных изданий. Благодаря этому он всерьез увлекся естественными науками, в особенности астрономией. Еще одним его увлечением было занятие иностранными языками. И в юности, и в студенческие годы папа учил их самостоятельно – платить учителям возможности не было.

Способности, стремление к знаниям и упорство дали великолепный результат. Он стал интеллигентом в первом поколении, причем высочайшего класса. Каким блестящим физиком он оказался, я думаю, засвидетельствуют люди, с которыми он общался профессионально. Кроме того, он прекрасно разбирался в литературе, музыке, живописи. Его любимым художником был Рембрандт. Когда папе удавалось набрести на черном рынке на альбом Рембрандта, он его покупал, не глядя на цену. Помню, с каким благоговением он листал альбом, показывая его и мне с мамой, как он комментировал свои любимые картины, как он светился радостью. В музыке для него вершиной был Моцарт. Он мог его слушать сколь угодно много. Он мечтал собрать всего Моцарта и таки собрал большую коллекцию его пластинок. Я вспоминаю, что когда я отправлялась куда-либо в командировку – а ездила я довольно много – то первым делом клала в сумку копию известного Кюхелевского каталога (Köchel' catalogue) произведений великого композитора, в которой я отмечала все его произведения,

которые уже были в папиной коллекции. Если у меня не получалось найти ничего нового из Моцартианы, я ужасно огорчалась. Но чаще всего мне удавалось вернуться домой с новой добычей, и это была для нас всех большая радость. Среди поэтов у папы было много любимых, но все же, пожалуй, он особо выделял Лермонтова. Очень любил английскую художественную литературу. Англия представлялась ему лучшей страной из всех существующих государств. Он всегда мечтал там побывать, но... Конечно, он был невыездным.

Отмечу, что, сколько бы он ни читал, ни слушал, ни смотрел нового, его пристрастия почти не менялись со временем. А вот философией он не слишком увлекался. Может, этому помешало вдалбливание марксистско-ленинской философии в студенческие времена в Институте.

Широта папиного образования производила очень сильное впечатление.

Главное же, что выказывало в папе истинного интеллигента, это была глубокая нравственная основа, которая не позволяла ему действовать вопреки собственным принципам. Он был добр, отзывчив, постоянно помогал своим сотрудникам, да и просто знакомым, решать их личные проблемы, не жалея времени и усилий. Я уже не говорю о том необъятном времени, которое он посвящал каждому из своих учеников, чтобы приобщить их как к азам, так и к тонкостям науки. Не оставлял он без внимания и возможности прививать им культурные и нравственные ценности.

Хочу сказать несколько слов и о маме. Она принесла папе «приданное» в виде великолепной библиотеки. Мой дед, которому не удалось дожить даже до моего рождения, был собирателем книг. У него были все выпущенные издательствами Маркса, Сытина, братьев Пантелеевых, Сойкина и др. собрания сочинений от мало уже известных Шнитцлера, Шелера-Михайлова, д'Аннунцио и прочих до Диккенса, Джека Лондона, Достоевского, Толстого... На всем этом мама выросла. К сожалению, часть из этих книг погибла во время войны, когда ничего не оставалось делать, как растапливать ими буржуйку. Нашей семье, за исключением папы, пришлось ведь остаться в оккупированном немцами Харькове. Но об этом подробнее ниже. Книги были основным папиным хобби. Он был заядлым книжником, не пропускавшим ни разу воскресный книжный рынок. Хорошие книги тогда трудно было достать, как и почти все другое. Папа вовсе не относился к разряду людей, умеющих что-либо доставать. Именно поэтому его уделом был черный рынок. При очень скромном образе жизни он себе и мне в хороших книгах не отказывал, сколько бы они не стоили.

Маминими пристрастиями были музыка и кино. Мама окончила Харьковскую Консерваторию и неплохо играла. Музыка не стала маминной профессией, осталась только большой любовью (мама имела 2 высших образования – позднее она закончила Гидромет-институт, где они, кстати, познакомились с папой). Поэтому первым серьезным, а, может, и единственным послевоенным приобретением нашей семьи стал хороший салонный Беккеровский рояль. Маминым кумиром был Шопен, его она играла чаще всего. Шопена папа тоже слушал с превеликим удовольствием, а я Шопена полюбила не меньше мамы. Позднее мои вкусы поменялись, я стала увлекаться Рахманиновым, Брамсом, Гершвином, Шнитке. Но детская любовь к Шопену осталась. Если в начале моего жизненного пути Моцарт казался мне скучноватым и однообразным (исключение составляли только опера «Дон Жуан», Реквием и 21-й концерт), то со временем я стала понимать и ценить его гораздо больше. Список любимых произведений Моцарта значительно расширился. Но все равно самым любимым для меня он не стал.

Мы часто ходили всей семьей в театр, в оперу и никогда не пропускали концертов в филармонии. И папа, и мама были меломанами. Они всегда брали меня с собой. Это счастье, что музыки, настоящей музыки, в моем детстве и юности всегда было много.

Что касается кино, мама была настоящей киноманкой. В значительной мере она заразила этим и папу. Ни одного хорошего фильма они не пропускали. Некоторые из них смотрели по несколько раз. Они обожали неореалистическое кино. А мама была ходячей энциклопедией – она знала, кем и когда был поставлен тот или иной фильм, кто в нем играл, какие фильмы получали награды на кинофестивалях и тому подобное. Если папа собирал художественную и научную литературу, то мама покупала все книги и журналы, имеющие отношение к кино. Для себя я нашла собственную нишу в этом деле – я собирала стихи и художественные альбомы.

Вернусь, однако, к главному содержанию папиной жизни. Поскольку я сама стала (без сомнения, не без влияния папы, но и без малейшего давления, даже в виде советов, с его стороны) физиком, я могу достаточно квалифицированно и, надеюсь, непредвзято судить о его научных способностях и его устремлениях. С одной стороны, он был генератором многих ценных научных идей. Таких людей, способных к творческим озарениям в науке, да и в прочих областях жизни, появляется совсем немного. С другой стороны, он умел претворять свои идеи в жизнь. Такое сочетание ценных

качеств ученого в одном человеке встречается совсем уж редко. Как правило, одни генерируют идеи, другие являются хорошими исполнителями. Безусловно, и те и другие необходимы в науке. А наличие обоих качеств делает человека ученым от Бога.

Я знаю об этих его особенностях со времен своего детства, поскольку папа, как правило, приходя домой, рассказывал мне и маме, что у него в этот день происходило на работе интересного. У него была выдающаяся способность излагать самые сложные вещи популярно, увлекательно, как говорится, «на пальцах», пользуясь простыми аналогиями. Поначалу, когда я была в младших классах школы, я, в основном, слушала, а где-то с четвертого класса я уже задавала вопросы и даже пыталась строить гипотезы. Папа, когда ему в голову приходила новая идея, рассказывал ее таким «чайникам», как мы с мамой, а нам это действительно было интересно, мы просто заслушивались. Он говорил, какие надо провести эксперименты, чтобы прощупать правильность идеи. А потом в дальнейшем рассказывал, что получилось в результате измерений, и оказалась ли идея верной. У нас было ощущение, что он просто фонтанирует идеями.

Однако вернусь к некоторым подробностям папиной биографии. Уже в юности он, хотя и общался в основном с босяками, знал, чем ему хочется заниматься в жизни. Его увлекали естественные науки и, в особенности, как я уже упоминала, астрономия. В то время во всем громадном СССР существовал единственный факультет астрономии – в Ленинградском университете. Принимали на этот факультет каждый год только около 20 студентов. Папа поехал в Ленинград поступать. Не поступил. Экзамены он, конечно, не провалил. Просто оказался неподходящей персоной. В те времена пролетарской диктатуры при поступлении людей в ВУЗы обращали особое внимание в первую очередь на происхождение абитуриентов, а потом уже на полученные ими оценки. Все люди, поступающие в институты и университеты, были разбиты на 4 категории:

- Дети рабочих
- Дети крестьян
- Дети служащих
- Прочие.

Увы, папа попал в последнюю категорию, поскольку его отец не относился ни к одной из первых трех категорий. Дети рабочих имели наибольшие преимущества при поступлении в институты. Дальнейшие кате-

гории расположены здесь в порядке убывания льгот при поступлении в институты и реальных возможностей получить высшее образование.

После провала при поступлении на астрономический факультет папа сделал однозначный вывод, что при повторном поступлении на тот же факультет его шансы по-прежнему будут равны нулю. Надо было делать другой выбор. Довольно естественно, следующий его выбор пал на физику, поскольку увлечение этой наукой шло у него параллельно с увлечением астрономией. В отличие от ситуации с астрономией, факультетов с физическим уклоном было много, что сильно увеличивало вероятность поступления. Действительно, в 1928 году он поступил без проблем в Физико-Химико-Математический Институт в Харькове.

Еще будучи студентом четвертого курса, папа начал заниматься экспериментальной работой в Украинском Физико-Техническом Институте (УФТИ). Он попал в лабораторию А. И. Лейпунского, которая занималась тогда первыми в СССР опытами по расщеплению ядер легких атомов. Выбор профессии экспериментатора, а не теоретика, был для него естественен, как дыхание. Он всегда считал, что самая красивая, самая элегантная, сама выдающаяся теория, конечно, нужна и важна, но окончательное слово в установлении истины принадлежит Его Величеству Эксперименту.

После окончания Института папа попал на работу в ту же лабораторию в УФТИ в качестве младшего научного сотрудника. Через пару лет, перед отъездом Лейпунского в заграничную командировку к Резерфорду, папа перешел на работу в Украинский Институт Прикладной Химии (нынешний НИОХИМ). Там он защитил свою кандидатскую диссертацию под руководством Н. Борисова. Хотя течение жизни, в первую очередь война, разлучили ученика и его руководителя (Борисов после войны жил в Киеве), их теплые дружеские отношения всегда сохранялись.

Одновременно с экспериментальной работой папа много занимался преподавательской работой в разных ВУЗах Харькова. В предвоенные годы он становится заведующим кафедрой физики в Харьковском Гидрометеорологическом Институте.

Это обстоятельство позднее сыграло печальную роль в судьбе нашей семьи. В самом начале войны папа пытается уйти в действующую армию добровольцем. Ему категорически в этом отказывают – у него слишком сильная бронь, поскольку в то время Гидромет естественным образом включили в число военных ВУЗов. Тогда же папу назначают ответственным за эвакуацию Гидромета на восток.

У Гидромета были большие сложности с эвакуацией. Институт получил железнодорожный состав для эвакуации оборудования и сотрудников с их семьями всего за пару дней до захвата Харькова гитлеровцами, когда они находились уже в нескольких десятках километров от Харькова. Этот состав оказался последним, которому удалось покинуть Харьков перед тем, как немцы захватили город.

Папа находился в мучительнейшем состоянии. Ему пришлось решать трудную дилемму – брать с собой семью или не брать. В каком случае у семьи больше вероятность остаться в живых? Шансов прорваться у поезда почти не было. Жить в оккупации – очень тяжело. Но тогда советское радио ничего не рассказывало о зверствах, которые творили фашисты на оккупированных территориях. В сложившейся на день папиного отъезда ситуации папа, мама и бабушка, мать моего отца, которая жила с нами, вместе приняли решение, что мы все, кроме папы, остаемся. Они сочли, что наша семья меньше рискует погибнуть, оставаясь на месте, чем если мы поедем вместе с папой. А у папы, естественно, выбора не было.

Случилось так, что поезд, к счастью, каким-то чудом прорвался, несмотря на то, что его бомбили, и он подвергался артиллерийским обстрелам. Конечно, было немало жертв, но многие выжили и добрались до Ашхабада, где Институт работал во время эвакуации. А вот бабушка погибла. Ее расстреляли в Дробицком Яру вместе с остальными евреями. У нее были шансы выжить, ее внешность не была типично еврейской. Мамины русские родственники предлагали ей переехать жить к ним на Клочковскую, сменив имя. Но бабушка поблагодарила их и отказалась. Она не хотела подвергать их жизни опасности – ведь во всех листовках, развешенных гитлеровцами по городу, было написано, что укрывательство евреев грозит виновным в этом смертной казнью.

Наши соседи по коммунальной квартире были изрядными антисемитами, поэтому мама не рискнула оставить меня с собой дома. Мама в течение всей оккупации прятала меня у своих тети и дяди Натальи Васильевны и Ивана Федоровича Маликовых, которые фактически спасли мою жизнь. Их любви, доброте, преданности и мужеству не было предела. У них не было собственных детей, их любовь была сосредоточена на мне. Они любили и оберегали меня бесконечно. А чего это им стоило, почти ежедневно! Они жили в коммуналке, но никто из обитателей остальных 7 комнат этой квартиры во время оккупации ни разу меня не видел и не подозревал, что я у них живу. На счастье, из комнаты, в которой жили тетя Туся и дядя

Ваня, был прямой выход на черную лестницу, которая снизу была замурована, в связи с чем ею никто не пользовался. Одна только я. Если раздавался звонок в квартиру или в дверь стучали соседи, я хватала свое пальто и шапку (если это было холодное время), которые всегда лежали возле этой двери, и выскакивала на лестницу. Во многом моя судьба была схожа с той, которую пережила Анна Франк, но я избежала трагического конца, поскольку немцы меня не обнаружили. И, конечно, я никак не могла вести дневник – мне было во время оккупации от 3 до 5 лет. До конца своих дней тетя Туся и дядя Ваня оставались самыми близкими мне людьми.

Папе удалось вернуться в Харьков через несколько месяцев после его освобождения. Гидромет-институт, в котором он работал, был эвакуирован в Одессу вместо Харькова. Поскольку все знали, что его семья осталась в Харькове, папе позволили уволиться из Гидромета и поехать домой.

Папа узнал о гибели своей матери, только когда он вернулся из Ашхабада в Харьков. Это было одно из самых горестных событий в его жизни. Сразу же по возвращении папа устроился на работу в УФТИ, где и проработал непрерывно до того черного дня, когда его бессмысленно вышвырнули из института, несмотря на весь его сохранившийся творческий потенциал и очень успешную работу. Об этом я напишу подробнее ниже.

Работа всегда его увлекала и, конечно, в некоторой мере помогала отвлечься от горя. Думаю, что близкое общение со мной тоже было целительным фактором. Как ни странно это может показаться, я почти каждый день бывала у папы на работе. Я ходила в уфтинский детский сад, который располагался рядом с лабораторными зданиями. Садик был скромный, недооборудованный. В нем не было тогда спальных мест. Поэтому для дневного сна папа обзавелся для меня раскладушкой. Он обычно ставил ее в большущем помещении, где он тогда работал и где располагался громадный линейный ускоритель Ван-де-Граафа. Моя раскладушка ставилась обычно позади этого колоссального прибора высотой в 4 этажа. Я была любопытным существом и постоянно задавала вопросы. А зачем нужен этот ускоритель? А как он устроен внутри? А зачем эта заслонка или какая-то другая деталь? Папа отвечал на все мои вопросы на доступном для меня уровне. Не могу сказать, что я стала большим специалистом в ускорительной технике, зато с раннего детства в моем словаре появилось много физических терминов.

Я не запомнила папу довоенных лет, ведь мне не было еще и трех лет, когда фашисты заняли наш город. Я познакомилась с ним в свои 5 лет, когда папа вернулся из эвакуации. Он показался мне самым добрым, самым умным, самым замечательным, самым красивым из всех отцов, какие только бывают. Вся дальнейшая жизнь подтвердила мои первые впечатления.

Наша семья была уникальной. В ней, как я уже упоминала, царили доброта и спокойствие. Мне ни разу не приходилось быть свидетелем каких-либо ссор. Я никогда не слышала, чтобы папа или мама повышали голос, даже если возникали какие-либо недоразумения. Все разногласия решались методом консенсуса, хотя тогда это слово еще не использовалось в русском языке. Папа воспитывал меня твердой рукой, но при этом его руки всегда были ласковыми. Что значит твердой рукой? На меня не кричали, тем более не говорили чего-либо оскорбительного. Но меня не баловали, образ жизни в семье и у меня, соответственно, был спартанским. Папа никогда меня при этом не наказывал и строгих указаний не давал. Я очень рано узнала от папы 10 библейских заповедей. Опять-таки, они были преподнесены мне не в качестве предписаний, а как созданный почти на заре цивилизации фольклор, сохраняющий высшую мудрость наших древних предков и содержащий очевидную и непреходящую ценность для всех времен. Заповеди – это было Добро, их невыполнение – абсолютное Зло. Они настолько просты и доступны для понимания, что в объяснениях не нуждались. Естественно, Заповеди врезались в мою память и мое сознание навсегда.

После всех испытаний военных лет так случилось, что мне никогда не приходило в голову капризничать, я не осаждала своих родителей просьбами купить мне то или се. К игрушкам была вообще довольно равнодушна. А вот тряпичного самодельного зайца, которого папа привез мне из Ашхабада, я всегда любила и лелеяла. Место игрушек в моей жизни занимали книги. Возможно, это у меня было связано как с папиным увлечением книгами, так и с его прекрасной традицией читать мне все, что он считал лучшими произведениями литературы.

Меня не баловали и летом, во время каникул. Я ни разу не была в пионерском лагере. Папа считал неэтичным брать в институте для меня дешевые путевки в лагерь, потому что было много людей, которые нуждались в таких путевках больше, чем наша семья.

Мы в основном отдыхали либо в поселке Южный под Харьковом, снимая дачу на время папиного отпуска, либо на Ворскле в маленьком ху-

торе Скельке, большей частью в компании наших хороших друзей. Папа с удовольствием занимался теннисом (на территории УФТИ была теннисная площадка), который он со временем, к сожалению, забросил, потому что не хотел отнимать время от работы. На отдыхе мы много играли в волейбол, играли во всякие интеллектуальные игры, которые на тот момент существовали, путешествовали на лодках по Ворскле, совершали пешие путешествия по округе. Только один раз мы отдыхали в Крыму, в Алуште – дикарями. В Алуште было неплохо, но я предпочитала сельский отдых. И мама тоже. В редких случаях папа часть своего отпуска проводил в Крыму, но без нас с мамой.

Папина работа шла весьма успешно. Но очень сложными были годы в районе 1950-го, когда Сталин затеял борьбу с так называемым космополитизмом. Все и тогда знали, что слово «космополит» было в то время фактически синонимом слова «еврей» (как сказали бы теперь, слово «космополит» было политкорректным выражением иного понятия – «еврей»). Многих евреев, включая и таких известнейших ученых, как Корсунский, Пинес, изгнали из УФТИ. Увольнения затронули очень многих евреев. Заодно с увольнением у них часто отбирали служебные квартиры, в свое время предоставленные Институтом. Папу, как ни удивительно, тогда не тронули. Не тронули, хотя за ним водились «грехи» – например, еще до войны он принял к себе на кафедру сына арестованного «врага народа». Я все тогда знала о волне увольнений евреев, которая шла не только в УФТИ, но и в других научно-исследовательских институтах. У меня долгое время был перед глазами наглядный пример того, что может происходить с уволенными. Подобное случилось с одной из семей, живших в нашем подъезде. Их выгнали из квартиры, и они около полугода ютились со всеми своими вещами в подъезде под лестницей.

Мне никогда не приходило в голову задать папе вопрос, почему он не стал жертвой той кампании. Ответ мне казался абсолютно очевидным – он был слишком нужным, незаменимым. Папа тогда работал в отделе Корсунского, и с увольнением последнего, если бы и папу вышвырнули с работы, было бы обезглавлено целое направление. Теперь я не исключаю, что папу отстоял замдиректора института Антон Карлович Вальтер, который очень высоко оценивал папину работу и у которого с папой были очень хорошие отношения. Но это только догадка. Папе достался удар с другой стороны – в эту же волну увольнений попала неожиданно моя мама. Стопроцентная русская Быкова Галина Александровна, которая ра-

ботала в том же отделе. Возможно, маму уволили потому, что в отчетах, которые требовала НКВД, был пункт «Жены и мужья евреев/евреек».

Могу сказать с полной определенностью, что папа отлично понимал все, что происходило в стране, что представлял собой Сталин, НКВД и другие зловещие органы. Папа всегда обсуждал с мамой все события в нашей стране, в том числе бесчисленные аресты и расправы конца 30-х годов, а не только борьбу с «космополитизмом». Все это говорилось в моем присутствии. Однажды только папа спросил меня: «Ты ведь понимаешь, что ничто подобное, сказанное дома, ты не должна никогда повторять где бы то ни было?». Я, естественно, понимала. Папа мне абсолютно доверял, поэтому не было ни единого случая, чтобы при моем появлении разговор прекращался.

Потом пришло потрясение в виде известного «дела врачей». Вся наша семья очень переживала и тревожилась, пока это дело тянулось. И все мы с облегчением вздохнули, когда тиран умер. Когда у нас в школе проходил траурный митинг, я не могла плакать, как плакали все вокруг. Мне пришлось изобразить слезы с помощью слюны. Выделяться среди всех остальных было страшно.

Несмотря на тяжелейшую обстановку, папа продолжал плодотворно трудиться, создавая вместе со своими сотрудниками источники ионных пучков нового типа. Пользуясь этими источниками, он активно занимается изучением атомных и молекулярных столкновений и вскоре становится одной из самых известных фигур в мире в этой области физики.

Он снова начинает заниматься преподаванием, на этот раз на физико-математическом факультете Харьковского университета. Там же он начинает организовывать новую экспериментальную лабораторию ионных процессов. Он создает новое направление, изучая взаимодействие ионных пучков с поверхностями твердых тел и вторичную ионную эмиссию. Значительную часть времени папа занимается этой деятельностью на общественных началах. Со временем по решению коллегии Госкомитета по науке и технике Совета Министров СССР лаборатория приобретает официальный статус, папа становится ее руководителем.

С 1972 г., после вступления в силу Указа Совета Министров СССР о запрещении совмещения руководящих должностей в научных учреждениях и вузах, заведующим этой лабораторией становится доцент А. Г. Коваль, а папа остается научным руководителем многих проводившихся в ней работ на общественных началах.

Наряду с напряженной и плодотворной деятельностью во главе лабораторий во ФТИ АН УССР и в ХГУ, он также дополнительно руководил научной группой во ФТИНТ АН УССР, которая занималась разработкой комплекса устройств для имитации солнечного излучения.

На папином счету большие достижения в нескольких областях физики. Не будем забывать еще о его довоенных работах в области рентгеновской спектроскопии, которые он проводил на заре возникновения этой области знаний.

Как мы знаем из истории Советского Союза, высокое научное имя, широкая известность в стране и за рубежом, выдающиеся успехи в научной деятельности ничего не значили в нашей стране. Сколько выдающихся ученых – таких как Шубников, Вавилов – было уничтожено в сталинские времена! С Львом Ландау, будущим Нобелевским лауреатом, могло бы случиться то же самое, если бы не вмешательство Капицы. Во времена застоя, конечно, режим был уже не таким чудовищным, Но его основные постулаты сохранялись. Это трагически отразилось и на папиной судьбе. В один «прекрасный» день начала семидесятых папа был вынужден уйти из института.

В этой труднейшей в его жизни ситуации папа вел себя более чем достойно. Он никому не жаловался, не демонстрировал никогда подавленности и отчаяния, которые, я уверена, были в его душе из-за отлучения от любимой работы. Он продолжал работать со своими университетскими учениками, как будто ничего не случилось. Ведь физика была главной любовью его жизни. Работал на общественных началах, т.е. без какой-нибудь оплаты, но с прежним энтузиазмом. Там он и продолжал трудиться почти до последних своих дней.

Внешне он оставался таким же, каким был ранее. Но все же оказалось, что перенесенный им и, я уверена, переносимый им ежедневно сильнейший стресс стоил ему жизни.

Папа был человеком высочайшей пробы во всех отношениях, и я всегда старалась выстроить свою жизнь «по папе». Надеюсь, что мне хоть в какой-то мере это удалось.

Н. Я. Фогель

доктор физ.-мат. наук, почетный профессор.

Окончательный вариант текста не согласован с Ниной Яковлевной в связи с ее кончиной 03.05.2010 в Израиле.

МОЙ ПЕРВЫЙ УЧИТЕЛЬ. ОТРЫВКИ ИЗ КНИГИ «ЖИЗНЬ МОЯ...». 2006.

В начале 1951-го года я, студент 5-го курса спецфака при физмат факультете Харьковского госуниверситета, появился в знаменитом ФТИ АН УССР (УФТИ), как оказалось, на последующие 36 лет. Мне повезло: взял меня в свою научную группу для выполнения дипломной работы Яков Михайлович Фогель. На хорошем экспериментальном оборудовании и, главное, с таким учителем, я досрочно на приличном «фогелевском» уровне выполнил работу по высокочастотному источнику ионов для электростатического ускорителя. Еще до защиты диплома она была опубликована в печати. Тогда у Я. М. Фогеля нас было двое дипломников. Со своим напарником Янькой Шварцем мы частенько «вкалывали» по 11–12 часов в сутки, выполняя самую разнообразную работу. Уставали неимоверно, но энтузиазм не иссякал, знали, что выполняли конкретное задание напряженного тематического плана института.

(Замечу, когда я в то время женился, то получил у Фогеля для оформления брака полдня: в ЗАГС и обратно).

Яков Михайлович Фогель был физиком «от Бога». Его неофициальная школа, думаю, подготовила не менее трех десятков отличных специалистов, задававших впоследствии тон не только в работе института. Человек он был прямой, временами резкий, позволявший себе порою нелестные высказывания в сторону «вышесидящего» начальства (что, к сожалению, сказалось потом на его судьбе). Он мог задавать нам с Янькой головоломку за малейшие упущения, но обеспечивал все условия для работы, дошн объяснял непонятное. И задавать ему вопросы было интересно и полезно. Мы, начинающие трудиться в настоящей экспериментальной лаборатории, видели в нем пример настоящего физика-экспериментатора. Высшей, редкой для нас, мерой поощрения могло быть отсутствие «разноса» при вечернем подведении итогов рабочего дня.

Он, мой первый настоящий учитель, привил мне не только любовь к эксперименту, к поиску, но и научил скрупулезно вести измерения и записи в лабораторных журналах. Как часто потом в моей дальнейшей работе именно точные записи помогали дать объяснение возникающим трудностям, сопоставить прежний результат со «свежим», уточнить выводы. К сожалению, это качество я замечал потом не у всех научных сотрудников.

Много лет спустя, мой второй учитель в институте – Л. И. Болотин, в научную группу которого я пришел после выполнения дипломной работы у Я. М. Фогеля, рассказал, что демонстрировал молодым сотрудникам мой, «фогелевский» лабораторный журнал, как образец ведения эксперимента.

Были у меня в дальнейшем и другие учителя: великий Кирилл Дмитриевич Синельников, передавший мне руководство исследованиями по проблеме управляемых термоядерных реакций; принимал участие в моей научной судьбе Игорь Васильевич Курчатов, поручив разработку стеллараторного направления; была действенная поддержка в развитии исследований по вакуумно-плазменной технологии со стороны Бориса Евгеньевича Патона.

Но с огромной благодарностью я всегда буду помнить моего Первого Учителя, давшего мне путевку в прекрасную науку – физику, Якова Михайловича Фогеля.

В. Т. Толок,

член-корр. АН Украины,

доктор физ.-мат. наук, профессор.

Я. М. ФОГЕЛЬ. УЧИТЕЛЬ И НАСТАВНИК

Сохраняйте только память о нас, и
мы ничего не потеряем, уйдя из жизни.

Уиттьер

Трудно начинать воспоминания более чем полувековой давности.

А именно тогда, осенью 1948 года к нам, студентам третьего курса физико-математического факультета Харьковского госуниверситета, в небольшую аудиторию на лекцию по ускорителям заряженных частиц вошёл подтянутый, среднего роста лектор, сразу же огорошивший нас сообщением, что все, что он будет нам рассказывать на занятиях, мы не найдем ни в одной книжке технического издательства и, тем более, в рекомендованных студентам учебниках.

Этим лектором был сотрудник Украинского физико-технического института (УФТИ) Яков Михайлович Фогель. А лекции его, не включенные в традиционную университетскую программу, были целиком построены на материалах текущей научной периодики, статьях и коротких журнальных заметках.

На эти лекции он всегда приходил с кипой новых иностранных журналов и рассказывал нам, желторотым третьекурсникам, о новых исследованиях в молодой отрасли науки – атомной и ядерной физике и связанных с ними технических достижениях. И хотя Яков Михайлович не был маститым профи-лектором, его лекции оставили самые яркие воспоминания и были активно посещаемы всеми студентами. Но в дополнение к этой не обычной форме проведения лекций мы были удивлены и отношением Якова Михайловича к нам как к будущим физикам. Вскоре он предложил нам выбрать небольшие научные темы, разобраться в них с помощью опубликованных материалов и провести совместные обсуждения. Эти обсуждения проводились весьма серьезно без скидки на ограниченность наших знаний и сопровождались длительными, доверительными разговорами-беседами о наших планах на будущее, взглядах на жизнь и самое главное – о месте науки в нашей жизни.

Для самого Якова Михайловича НАУКА была главным смыслом всей его жизни, а его увлеченность научной деятельностью и откровенные размышления на эту тему стали для меня главными отеческими наставлениями, которым я следую и по сей день.

Наверное, встреча в начале вступления во взрослую жизнь с человеком, который определит твою дальнейшую дорогу, важна для любого из нас, а особенно в те знаменательные, переломные годы в середине XX века. Эйфория победоносного окончания Второй мировой войны не могла не отразиться на наших молодых умах и надеждах всеобщего благополучия и равенства, но уже нависшая тень холодной войны с союзниками и установившаяся с начала века конфронтация двух мировых систем, жёстко закреплённая политикой Советского Союза, охладили эти надежды. Эти реалии, к сожалению, отразились и на жизни науки и её служителях. Атомная и ядерная физика оказались под неусыпным контролем Л. П. Берии. Большинство научно-исследовательских институтов и лабораторий, занимающихся этой тематикой, попали в разряд «закрытых» организаций. Не остались без «внимания» и физические факультеты и кафедры университетов.

На физико-математическом факультете Харьковского госуниверситета была создана так называемая спецкафедра под эгидой министерства среднего машиностроения, на которую были отобраны по специальной анкете студенты из многих городов Советского Союза – Ленинграда, Одессы, Ростова-на-Дону, Днепропетровска и др. В старом маленьком здании на Университетской улице, где в старинных корпусах размещались

в то время главный офис университета, физико-математический и химический факультеты, были выделены небольшие комнаты, именуемые аудиториями, на дверях которых красовались сургучные печати, и вход в которые был строго по пропускам. Конспекты лекций разрешалось записывать в специальные тетради, с пронумерованными и скрепленными печатью страницами. Учитывая то обстоятельство, что нас под крышу спецкафедры собрали на третьем курсе, то в конспектах по общей физике, в основном, фигурировали законы Ома, Фарадея и пр., и совершенно очевидно, что секретность содержимого этих тетрадей необходимо было строго охранять. Все тетради после лекций сдавались неукоснительно «хранителю печатей».

В таких непростых и не совсем обычных для студенчества условиях и состоялась встреча с Яковом Михайловичем Фогелем – человеком, который, несмотря на все, мягко говоря, несуразности той жизни, вводил нас в современную науку, и лекции которого мы ждали с необычным для студентов желанием.

Научная жизнь послевоенного УФТИ после окончания войны и возвращения из эвакуации приобрела жёсткий характер закрытого ведомственного учреждения. Научная работа велась строго по плановой тематике, спускаемой из комитета по атомной науке и технике, находящегося в Москве, и под бдительным оком Л. П. Бериин.

Малейшее невыполнение плановых разработок или даже задержка с их выполнением карались строго, вплоть до увольнения ученых и закрытия лабораторий. Под этот каток попала и лаборатория, руководимая проф. М. И. Корсунским, в которой работал Яков Михайлович. Задержка в получении нужного результата на новой разработанной в лаборатории установке для разделения изотопов методом магнитного резонанса вызвала негативную реакцию со стороны высоких инстанций, последовали строгие санкции и лаборатория была ликвидирована.

М. И. Корсунский, выдающийся ученый и автор популярнейших в те годы монографий по атомной физике, на которых воспитались многие студенты и школьники и которые способствовали приходу в современную ядерную физику нового поколения энтузиастов, был полностью отстранен от исследований и вынужден был переехать в Казахстан.

Тематика по разделению изотопов была закрыта, а небольшое количество ученых, оставшихся в институте, вынуждено было начать работать в других областях физики.

Яков Михайлович в создавшейся ситуации открыл для себя новое направление исследований, которое лежало в области атомной физики, а именно, в исследовании процессов элементарных атомных столкновений. Исследования этих процессов в экспериментальной физике только начинались и были весьма актуальны для понимания строения атомов и природы актов взаимодействия сталкивающихся частиц.

В СССР передовые позиции в этой области занимали учёные Ленинградского физико-технического института, который является отцом-основателем УФТИ и который в те времена ещё не носил имя А. Ф. Иоффе, т. к. знаменитый папа-Иоффе в то время лично возглавлял своё детище. Там группа физиков под руководством Владимира Марковича Дукельского занималась изучением процессов столкновения атомных частиц, измерением сечений процессов перезарядки, ионизации и пр.

Со статьями В. М. Дукельского, Н. В. Федоренко, Э. Я. Зандберг, Н. И. Ионова и др., напечатанных в Журнале Технической Физики, Яков Михайлович пришел к нам, студентам, на «хутор», так мы называли наши закрытые аудитории. Статьи были прочитаны, обсуждены методики проведения измерений и полученные результаты. А Яков Михайлович, проведя соответствующую работу с руководством отделения, принял за организацию экспериментальной лаборатории на «хуторе». К всеобщему удовлетворению в кладовых факультета в наличии оказалось довольно значительное количество стандартного довоенного лабораторного оборудования: форвакуумные и маломощные диффузионные масляные насосы, ртутные манометры Мак-Леода, струнные гальванометры и пр. Эту старую экспериментальную технику первой половины XX века теперь не встретишь даже в закоулках современных лабораторий, но полученные навыки работы на ней стали для нас пропуском в настоящую науку. К тому же на факультете была неплохая механическая мастерская с хорошими, немолодыми, знающими специфику экспериментальной техники файн-механиками. Необходимые мелочи и изделия стеклодувов, без которых в те времена не существовало ни одной серьезной установки, Яков Михайлович приносил из института. Работа закипела и студенческая лаборатория атомной физики начала своё существование.

Всё свободное время и справедливости ради надо признаться, что не только свободное от лекций время, мы проводили в лаборатории. К приходу «шефа», а теперь Яков Михайлович действительно для нас им стал и

так и именовался между нами, надо было выполнить намеченные задания и что-нибудь продемонстрировать новенькое.

Здесь очень хочется отметить, насколько терпеливо и уважительно относился Яков Михайлович к нам, зеленым студентам, и насколько серьезные и актуальные задачи он ставил перед нами для проведения экспериментальных работ.

Одной из поставленных задач была разработка источника ионов, основанного на эффекте термоионной эмиссии. К моменту начала этих работ было известно, что некоторая смесь солей, нанесенная на спираль или металллическую подложку, при нагревании эмитирует ионы.

Разработке ионных источников в 40–50-е годы XX века уделялось большое внимание, так как они стали широко использоваться в ускорителях ионов, экспериментах с использованием ионных пучков для измерения констант ядерных реакций, в физике элементарных атомных столкновений и пр. Понимая актуальность этих разработок, Яков Михайлович в УФТИ уже начал разработку высокочастотных источников ионов и, получив рекордные по тому времени интенсивности водородных ионов, впервые в мировой практике с успехом установил высокочастотный источник в электростатический генератор (ускоритель) Ван-де-Граафа.

Нам же, студентам, была поручена задача разработки источника иного типа, основанного на эффекте термоионной эмиссии, способного эмитировать в основном ионы щелочных металлов. Мы с энтузиазмом погрузились в освоение процесса спекания солей, создание долгоживущего эмиттера и исследования характеристик термоионного источника. Созданный нами источник в дальнейшем с успехом использовался для получения ускоренных ионных пучков щелочных элементов и в исследованиях элементарных процессов атомных столкновений.

Не могу удержаться, чтобы не рассказать здесь о том, что сейчас, в конце первого десятилетия XXI века, имея за плечами более чем пятидесятилетний стаж научной деятельности в разных областях экспериментальной физики, я с успехом использую эти наши старые студенческие разработки по созданию термоионных источников на современных установках управляемого термоядерного синтеза, токамаках и стеллараторах. Разработанные к настоящему моменту в Харькове термоионные источники обладают уникальными параметрами и активно используются в Испании, Германии, России и других странах.

Я об этом здесь рассказала, чтобы подчеркнуть удивительную способность нашего шефа заглянуть вперед и предвидеть актуальность своих научных начинаний. Примеров этому много и я буду еще о них здесь вспоминать.

На пороге начала дипломной работы в 1951 году было очевидно, что моего мужа, Сафронова Бориса Георгиевича, участника Отечественной войны и студента той же спецкафедры, Яков Михайлович берет к себе в институт для выполнения дипломной работы. Со мной вопрос почему-то оставался неясным, а ближайшее институтское окружение при разговоре о моем возможном появлении в УФТИ в качестве дипломницы Якова Михайловича загадочно ухмылялось. Однако в один прекрасный день шеф наконец-то обрадовал меня извещением о том, что после длительного размышления и колебаний он берет меня второй студенткой для выполнения дипломной работы в стенах УФТИ. При этом он с улыбкой добавил, что не только он станет моим руководителем и воспитателем, но что он надеется на то, что и я послужу для него неким воспитательным субъектом. Смысл этого шутливо произнесенного заявления разъяснился позже, когда я уже находилась в стенах институтских лабораторных комнат, в которых мы собирали установки для дипломных работ.

Тематика дипломных работ лежала в области физики атомных столкновений – направления, совершенно нового для института. Эта научная ниша была открыта Яковом Михайловичем на основании глубокого понимания проблем современной физики и в результате изучения последних научных публикаций. Получив образование в очень непростые для становления советской интеллигенции 30-е годы, годы рабфаков и группового овладения знаниями, Яков Михайлович при этом был человеком обширных энциклопедических знаний и высокой культуры. Будучи специалистом в области естественных наук, он прекрасно знал мировую художественную литературу, был заядлым библиофилом и владельцем богатой библиотеки, которую в послевоенные годы можно было создавать, в основном, пользуясь «услугами» базарных спекулянтов. Имена многих иностранных и «неудобных» русских писателей мы впервые услышали от шефа, т. к. официальная школьная программа тех лет была основательно выхолощена чиновниками образования.

Знание основных трёх иностранных языков, немецкого, английского и французского, давало возможность Якову Михайловичу знакомиться с научными новинками сразу же после их появления в иностранных журналах и корректировать свои планы в соответствии с ними.

Библиотеки в УФТИ (а их на старой и единственной в те годы площадке института на улице Чайковского было две) были богаты научной и художественной литературой. Директор института К. Д. Синельников и научная общественность заботились о регулярной подписке на большинство научных журналов и получении новинок художественной литературы. Учитывая, что никаких компьютеров и тем более Интернета тогда и в помине не было, своевременное знакомство с научными публикациями в журналах было крайне необходимым для успешной работы.

В то время в институте существовал хороший обычай, который позволял старшим научным сотрудникам пользоваться ключами от библиотеки в нерабочее время. И очень часто вечерами после выключения нами вакуумных насосов Яков Михайлович спускался с третьего этажа, где находилась библиотека главного корпуса, в лабораторию и рассказывал о последних публикациях, касающихся наших исследований, или о сенсационных новинках в науке. Зачастую эти посиделки переключались на обсуждение новинок литературы или кино и продолжались до полуночи. Естественно, что нам, только начавшим свою взрослую жизнь, такой поводирь с безграничной увлеченностью наукой и большими знаниями в широких областях общечеловеческой культуры, помог определить дальнейший путь и обозначил вехи исповедуемых в жизни принципов.

Оставшиеся после разгрома лаборатории М. И. Корсунского сотрудники были влиты в лабораторию Александра Яковлевича Таранова, человека спокойного, выдержанного и лояльно настроенного к группе Я. М. Фогеля и его научным начинаниям. Начальник отдела и глава ядерной физики в те времена в УФТИ академик Антон Карлович Вальтер поддержал предложенную шефом тематику атомных столкновений и в дальнейшем, до конца своей жизни, всячески помогал и поддерживал Якова Михайловича. Работа группы стала активной, целенаправленной и успешной. А нам пришлось познакомиться и подчиниться стилю работы шефа. Он был строгим, почти суровым, спланированным до мелочей и нацеленным на результат.

Начинать новую тематику пришлось с создания экспериментальных установок, а это, стало быть, тесные контакты с конструкторами, технологиями и, главное, с мастерами.

В своё время М. И. Корсунский привез из Германии по репарации уникальный парк станков и создал великолепную мастерскую. Эта мастерская была сохранена и замечательные мастера своего дела Митя Бронников и Жора Пешков начали создавать установку для изучения процессов

перезарядки и ионизации при столкновении ускоренных ионов с атомами и молекулами атомных частиц. Работали эти мастера без технических чертежей, пользуясь только нашими эскизами, и хорошо понимали задачу, для которой создавалась установка.

В один прекрасный день, в самом начале моего появления в институте мы сидели в комнате, сопредельной с мастерской, и чертили эскизы, когда за дверью послышался разговор, а через щель в дверь заглядывали любопытные глаза. Так продолжалось довольно долго. Наконец я не выдержала, подошла к двери и, резко открыв её, спросила, что тут происходит. Через некоторое время выяснилось, что шеф, всегда очень уважительно относившийся к мастерам, в напряженные моменты невыполнения заданий или, хуже того, при «запарывании» изготавливаемых деталей, начинал разговаривать с ними на понятном традиционном «русском наречии», которым он овладел, работая на угольных шахтах Донбасса, откуда он происходил родом.

И вот сейчас мастеровых очень заинтересовало, что за мымру женского пола допустил Яков Михайлович в лабораторию, которую не устрасит употреблявшийся в соответствующей ситуации рабочий диалект. Тут-то мне и стало понятным замечание шефа, что моё присутствие должно стать красным светом для употребления этого жаргона. И это таки да – произошло.

Но если серьезно говорить, то все работники вспомогательных науке служб, будь то конструктора или рабочие мастерских, все они ценили очень уважительные отношения с шефом, который всегда готов был, не жалея времени, объяснять задачу и цель изготавливаемого изделия, понимал их технические возможности и помогал в решении многих проблем, включая и бытовые.

Время шло. Дипломы были защищены. Б. Г. Сафронов был отдан в распоряжение К. Д. Синельникова для становления лаборатории масс-спектрометрических исследований, а я по заявке шефа была оставлена в качестве младшего научного сотрудника в группе Я. М. Фогеля. Исследования элементарных атомных процессов успешно продолжались и расширялись, в группу вливались новые сотрудники и приходили новые дипломники. Яков Михайлович установил тесный контакт с Ленинградской лабораторией В. М. Дукельского. Начался плодотворный обмен идеями, результатами исследований, научными планами, визитами.

Ещё при выполнении моей дипломной работы Яков Михайлович обратил внимание на новый процесс образования отрицательных ионов водорода и гелия при захвате в одном акте столкновения двух электронов с положительными ионами. Это наблюдение было на уровне научного открытия, т. к. процесс двойного захвата до сих пор никем не наблюдался. В те времена, о которых я сейчас вспоминаю, не было принято официально оформлять новые научные наблюдения. Полученные новые результаты попадали в научную печать и тем самым научный приоритет считался установленным.

Следует упомянуть и о полезных технических новинках, предложенных шефом, которые и до настоящего времени не потеряли своей оригинальности и с успехом используются в современной экспериментальной технике. Для примера могу назвать сверхзвуковую струю паров вещества, которая была предложена в качестве перезарядной мишени в экспериментах по атомным столкновениям. Это устройство до сих пор является лучшей разработкой для преобразования ускоренных атомных пучков в пучки частиц с разными зарядовыми состояниями.

Но совершенно уникальным надо признать научное предвидение шефа, приведшее к становлению в начале 60-х годов нового научного направления, а именно физики вторичной ионной эмиссии. В 50-е годы в нашу лабораторию к Якову Михайловичу часто приезжал из Днепропетровска его друг и соученик по институту, фамилию которого я, к сожалению, запамтовала (может быть, кто-нибудь из его сотрудников вспомнит её). Он занимался экспериментальной физикой в Днепропетровском университете и очень ценил советы и предложения шефа.

Однажды он привез результаты своих экспериментов по взаимодействию ускоренных пучков ионов с металлическими мишенями, в которых регулярно наблюдались ионы в отраженных от поверхности потоках. До сих пор существовало представление, что упавшие на металлическую мишень ионы нейтрализуются на ней и отражаются в нейтральном состоянии. Были и эксперименты, подтверждающие этот факт. Яков Михайлович с большим интересом воспринял наблюдения коллег-днепропетровца, стимулировал их развитие и сам, серьезно увлекшись этой проблемой, начал заниматься изучением процессов взаимодействия ускоренных атомных пучков с поверхностью твердого тела.

К этому времени в Харьковском Госуниверситете существовала группа студентов, приобщаемая шефом к науке, которая в скором времени пре-

вратилась в большую лабораторию с коллективом научных работников. Эта группа была в основном и нацелена шефом на изучение физики взаимодействия пучков с поверхностью. Якова Михайловича чрезвычайно воодушевляли эти исследования, он неустанно повторял нам, что за этим научным направлением большое будущее. И исследования велись успешно и результативно. Конечно, экспериментальная техника тех времен не позволяла получать желаемые результаты. Отсутствие необходимой продуктивной «безмасляной» откачки и довольно низкий предельный вакуум, доступный масляным насосам, способствовали образованию пленок на поверхности металла и не давали возможности проводить чистые эксперименты. Но явление вторичной ионной эмиссии при взаимодействии атомных пучков с поверхностью твердого тела устойчиво наблюдалось и его свойства успешно исследовались.

Развитие исследований по изучению элементарных процессов в физике атомных столкновений и взаимодействию ускоренных атомных пучков с мишенями привело к установлению новых научных контактов.

Частым гостем нашей лаборатории в конце 60-х годов стал сотрудник Киевского института металлофизики В. Т. Черепин. Область вторичной ионной эмиссии была главным его интересом. Проходили длинные дискуссии с шефом, а в дальнейшем наступили и более тесные взаимоотношения. На работу в Киев поехали успешные дипломники Якова Михайловича, выпускники Харьковского университета. Лаборатория В. Т. Черепина широко развернула исследования вторичной ионной эмиссии, а затем появилась и его монография, посвященная этому физическому явлению. И сейчас, к сожалению, большинство из сегодняшних ученых – физиков не связывает установление этого явления, его изучение и предсказание важности его прикладного значения с именем Я. М. Фогеля.

В 1961 году Яков Михайлович благословил меня на самостоятельную научную деятельность. В эти годы в УФТИ зарождалось новое направление, всячески стимулируемое нашим министерством в Москве и поддерживаемое И. В. Курчатовым. Это направление управляемого термоядерного синтеза. В институте были созданы пять лабораторий, объединенных в отдел, руководимый К. Д. Синельниковым. Я была привлечена Кириллом Дмитриевичем к этим задачам, как специалист, имеющий опыт работы в области атомных столкновений, области, достаточно задействованной в термоядерной физике. И хотя теперь административно я находилась в другой епархии, «расставания» с шефом в плохом смысле этого слова не произошло, да и

не могло произойти. Яков Михайлович всегда был для нас с Б. Г. Сафоновым другом нашего дома, а для меня самым главным советником во всех моих научных начинаниях.

Так было и с моей первой самостоятельной разработкой. Опираясь на свой предыдущий опыт, я начала исследования плотных плазменных потоков с помощью просвечивания (зондирования) их ускоренными пучками нейтралов и ионов. Измеряя продукты реакций столкновений частиц зондирующего пучка с частицами плазмы и используя известные сечения этих реакций, можно было определять параметры плазмы: её плотность, температуру и в ряде случаев концентрацию. Этот метод исследования нашел свое применение и развитие в других лабораториях, занимающихся термоядерными исследованиями, и получил название активной корпускулярной диагностики плазмы. Эта диагностика до сих пор широко применяется в исследованиях на современных установках управляемого термоядерного синтеза. Яков Михайлович сразу одобрил это начинание и всячески поддерживал его. А поддержка была необходима, т. к. вначале эта идея не понравилась К. Д. Синельникову, и он настойчиво пытался меня переориентировать на другие задачи. Тем не менее, без широкой огласки работа была начата и первые полученные результаты были апробированы в Ленинградском физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе. Она нашла понимание и признание со стороны Н. В. Федоренко и в дальнейшем была применена на установке «Альфа» А. И. Кисляковым. Доклады на всесоюзных и международных конференциях по физике атомных столкновений в начале 60-х годов были первыми моими сообщениями о разработке этой диагностики. Конечно, результаты этих работ дошли до К. Д. Синельникова и он, не будучи ретроградом, оценил своевременность и многофункциональность активной корпускулярной диагностики для термоядерной плазмы и в дальнейшем всячески поддерживал и пропагандировал её применение. Вот такой своевременной оказалась первая поддержка шефа на моем самостоятельном пути, она же была и не последней.

Нарушая хронологический порядок, не могу не остановиться еще на одном примере научного предвидения Якова Михайловича и плодотворном развитии и применении нового метода исследования. Ранее упоминалось, что в самом начале 50-х годов в первых работах по изучению сечений атомных столкновений был замечен эффект образования отрицательных ионов водорода и гелия. Отрицательные ионы не были тогда популярным объектом исследований. Однако, Яков Михайлович, спустившись как всегда

вечером из библиотеки, увлек нас очередной своей идеей. В 1948 году американский физик О. Альварец опубликовал предложение о возможности удвоения (в принципе умножения) энергии ускоряемых ионов. В основном идея состояла в том, чтобы перезарядить ускоренные до определенного напряжения отрицательные ионы в положительные на высоковольтном конце ускорителя с последующим их доускорением к заземленному концу. Харьковский УФИ с самого своего возникновения занимался разработкой и созданием электростатических генераторов (ускорителей) Ван-де-Граафа. Сам изобретатель Ван-де-Грааф принимал в 30-е годы участие в наладке и запуске первого в Харькове воздушного генератора на энергию 1.5–2 МэВ. Прямое увеличение энергии этих машин представляло тогда невероятно трудную задачу. Поэтому использование принципа Альварца было очень заманчиво и актуально. Однако существовавшие в то время источники отрицательных ионов создавали пучки ничтожно малой интенсивности, которая не могла иметь практического применения в ускорителях. По настоянию Якова Михайловича в нашей группе закипела работа. Мы начали разрабатывать источники отрицательных ионов, основанные на преобразовании положительных ионов в отрицательные при прохождении их через мишени. Использовались газовые и фольговые мишени, тут же родилась и сверхзвуковая пароструйная мишень, упоминавшаяся ранее.

В результате на свет появился источник отрицательных ионов водорода, с рекордной для того времени интенсивностью до 70–100 микроампер, на который приезжали «полюбоваться» заморские гости, в частности, и из высоковольтной американской лаборатории, основанной Ван-де-Граафом. Сразу же после получения достойных интенсивностей отрицательных ионов в УФИ был разработан проект создания первого перезарядного электростатического генератора. Позже аналогичная разработка была начата под эгидой харьковчан и в Московском институте атомной энергии им. И. В. Курчатова. Перезарядный электростатический генератор в Харькове был запущен в конце 60-х годов и до сих пор находится в рабочем состоянии.

К 70-м годам вокруг Я. М. Фогеля создалась школа молодых ученых и студентов-старшекурсников. К тому времени уже было выполнено около двух десятков дипломных работ и защищено более десяти кандидатских диссертаций под руководством шефа. Непрерывно публикуются статьи в советских научных журналах: ЖТФ, ЖЭТФ, Приборы и техника эксперимента.

Публикация в иностранных журналах нашим ученым была в те времена запрещена.

В СССР регулярно проходили Всесоюзные конференции и школы по физике атомных столкновений и взаимодействию пучков с поверхностью твердого тела, организатором и активным участником которых был Яков Михайлович со своими сотрудниками. Участие в регулярных международных конференциях было для группы в основном недоступно, однако визиты иностранных ученых в институт, дискуссии с ними и показ лабораторий были разрешены под бдительным оком наблюдателей. Таким образом и состоялись наши встречи с ведущим английским ученым, крупным специалистом в области атомных столкновений и автором монографии, переведенной на русский язык, Д. Хастедом, ведущим американским физиком и также автором большого манускрипта Д. Файтом, югославами Б. Перович, Б. Чопич и др.

Яков Михайлович был центральной фигурой этих встреч. Он очень активно проводил дискуссии и, конечно, не укладывался в отпущенное программой время, чем вызывал нешуточный гнев наблюдающего и лишние нарекания при разборке «полетов». Но это было потом, а зато сами дискуссии были настолько интересными и полезными, что после них мы чувствовали себя причастными к мировой науке в нашей области знаний, и это давало возможность дальнейшей коррекции наших планов и расширения программы исследований.

Я всячески затягиваю момент перехода в своих воспоминаниях к событиям, которые невозможно было понять и тем более объяснить. Яков Михайлович был лишен допуска к работе в УФТИ. В качестве причины был выставлен смехотворный факт отсылки оттисков своих статей, напечатанных в научных советских журналах, без санкции соответствующих служб. Это при том, что материал, попадавший в статьи, всегда получал разрешение на открытую публикацию и, стало быть, априори не мог содержать какой либо государственной тайны. Тут надо с удивлением, скорее возмущением, сказать, что ученики шефа, достигшие к тому моменту «известных высот», не сочли себя обязанными «разрулить» эту абсурдную ситуацию. И Яков Михайлович остался сотрудником Госуниверситета, где к тому времени он передал своему ученику А. Ковалю организованную им лабораторию, а затем и вообще стал пенсионером.

Тяжелый осадок от этих событий хочу немного растворить в воспоминаниях о еще одном, я бы сказала, почти гениальном научном предвидении шефа и очередной поддержке, неоднократно мне оказываемой. В начале 60-х годов появилось много лабораторных исследований на объектах

с плотной и горячей плазмой, предшествовавших экспериментам на крупных термоядерных установках. Колоссальное количество теоретических и расчетных работ было посвящено вопросам удержания и нагрева плазмы в этих установках. Предсказывалось множество нестабильностей, паразитных эффектов, мешающих выходу на термоядерные параметры. Мне тогда показалось перспективным начать эксперименты по исследованию взаимодействия плотной плазмы с поверхностью твердого тела. Среди научной общественности бытовало мнение, что этим заниматься нецелесообразно. Теоретики, с одной стороны, утверждали, что все процессы, происходящие на поверхности разрядной камеры, можно разложить на процессы взаимодействия отдельных, составляющих плазму компонент: электронов, ионов и электромагнитного излучения. Экспериментаторы и вовсе упрощали ситуацию, заявляя, что надо научиться удерживать плазму магнитными полями и не допускать её попадания на стенки камеры.

Вопреки всем этим утверждениям, я все же начала исследования взаимодействия плотных плазменных потоков с металлической поверхностью и сразу же увидела нечто новое и интересное. Яков Михайлович, конечно же, был первым извещен о результатах и с интересом их выслушал. Но начало новых исследований в институте всегда должно быть согласовано с существующими научными планами и одобрено ученым советом. Тут и случилась заминка с моими предложениями, выставленными на обсуждение ученого совета. Предвидя это, я попросила прийти на совет шефа. Развернулись бурные дебаты, результатом которых было решение эти работы не начинать. Яков Михайлович был очень раздосадован таким решением и в резких тонах высказал свое мнение о близорукости членов совета и о том, что в самое ближайшее время большое число серьезных институтов и научных лабораторий займется этими исследованиями, и они будут актуальны и востребованы. Как же он был прав!! Более тридцати лет прошло с тех пор, а поток научных публикаций, посвященных этой проблеме, превысивший многие сотни статей, не ослабевает до сих пор.

Последний год жизни Якова Михайловича был омрачен тяжелой неизлечимой болезнью, которая, конечно же, развилась на фоне вынужденного отрыва от его детища – лаборатории в УФИИ, и связанного с этим ограничения научных контактов с коллегами и учениками. 27 сентября 1977 года Якова Михайловича Фогеля не стало. Да сохранится о тебе Светлая память, мой учитель!

Л. И. Крупник, канд. физ.-мат. наук.

УЧИТЕЛЬ, НАСТАВНИК, БОГ – Я. М. ФОГЕЛЬ

Я пришел к Я. М. Фогелю в 1958 году, будучи студентом 2-го курса ядерного отделения ХГУ (Харьковский государственный университет). Это произошло совершенно случайно. Мой друг и земляк В. А. Стратиенко рассказал мне, что есть в ХГУ доцент, который привлекает к участию в своих работах студентов-энтузиастов и выводит их в люди. Дело в том, что я прекрасно разбирался в математике и в теоретических дисциплинах, но не имел никакого опыта и знаний в области практической физики.

Поэтому на время летних каникул я напросился в лабораторию молекулярной физики ХГУ и начал по заданию преподавателей изготавливать различные радиоэлектронные устройства: усилители, дискриминаторы и т. п. Если говорить откровенно, в то время у меня был нулевой уровень в этой области. Благодаря преподавателям я постиг азы ламповой электроники, а затем и полупроводниковой. И вот в таком виде я предстал перед Яковом Михайловичем и попросил его взять меня на любые работы, которые были бы связаны с физикой.

У Я. М. Фогеля было несколько комнат на втором этаже физического корпуса ХГУ, где в это время разрабатывались и монтировались несколько установок.

В одном помещении создавалась установка для изучения свечения различных газов под ударом электронного пучка (выяснение природы полярных свечений). Главным действующим лицом там была Галина Полякова, потом к этим работам подключился Виктор Рыбалко.

В другой комнате заканчивался монтаж установки, в которой сверхзвуковой поток ртути взаимодействовал с пучком частиц. Помню, что там вначале работал А. Коваль, а затем Анатолий Абраменко.

В третьей комнате уже действовала установка по изучению вторичной ионной эмиссии и изучению эффекта Берхоера. На этой установке работали Лариса Рекова и Владимир Колот.

Именно здесь Яков Михайлович задумал создать высоковольтную установку для получения различных сортов ионов и их взаимодействия с различными материалами. Здесь он и определил главную для меня задачу: создать эту установку.

В качестве шефа для меня был назначен замечательный человек – Виктор Федорович Козлов, аспирант Я. М. Фогеля, который на своих установках в ХФТИ исследовал процессы перезарядки ионов.

Могу сказать, что четыре года, которые я проработал у Якова Михайловича, были для меня временем непрерывного образования, а также приобретения навыков коллективного труда.

После первой установки была изготовлена вторая установка для моей дипломной работы по измерению сверхмалых потоков заряженных частиц.

Перечень навыков и специальностей, полученных мною в школе Якова Михайловича: конструирование установок и узлов, вакуумная техника, электротехника, радиотехника, электроника, детекторы частиц, оптика, ускорители Ван-де-Граафа, стеклодувные технологии и многое другое.

Ярким воспоминанием для меня были семинары Якова Михайловича. Работая после окончания ХГУ в отделе И. А. Гришаева и будучи там куратором семинара, я несколько раз приглашал Якова Михайловича для прочтения лекций по тематике его лаборатории. Я помню, как однажды результаты его последних исследований подсказали нам, как удлинить время работы мощных стеклянных тиратронов и как эмиссия галогенов может значительно влиять на срок службы мощных вакуумных приборов.

Оглядываясь на прошедшие 50 лет, я могу сказать, что созданная Яковом Михайловичем школа – это яркая страница в развитии ХФТИ и ХГУ.

Р. S. В качестве юмора. Когда Яков Михайлович был сердит или недоволен, он обычно просил женщин выйти из комнаты на минутку и после этого высказывал свое недовольство в резкой форме с применением «народного фольклора». Почему-то я этот прием усвоил очень хорошо и поступаю так же вот уже 50 лет.

*А. Н. Довбня,
член-корр. НАНУ,
заместитель директора ННЦ ХФТИ.*

РАБОТА С Я. М. ФОГЕЛЕМ

Первое знакомство связано с курсом лекций по ускорителям, который читал Яков Михайлович Фогель. Лекции читались динамично, увлекательно, на высоком уровне. Лектор вел себя непринужденно и демократично. Тогда же мы начали получать информацию, что Яков Михайлович большой ученый, что его сотрудники весьма быстро защищают кандидатские диссертации, что Яков Михайлович склонен в общении к нецензурной лексике. Он сообщил нам о наличии его лаборатории в университете и пригласил нескольких студентов начать работу в этой лаборатории в свобод-

ное от занятий время. В университетской лаборатории Якова Михайловича исследовались процессы атомной перезарядки (атомные столкновения). Студенты были вовлечены в процесс исследований, осваивали достаточно сложную экспериментальную технику – вакуум, высоковольтную технику, ионные пучки, а также получали первый опыт проектирования научного оборудования. Трудно переоценить значение этого процесса учебы под непосредственным и непрерывным контролем Якова Михайловича. Нужно в связи с этим упомянуть, что непосредственно процессом исследований в университетской лаборатории Якова Михайловича руководил замечательный ученый и человек А. Тимофеев. Довольно быстро я и мои друзья студенты В. Ф. Рыбалко и О. И. Ехичев освоили установку и научились самостоятельно проводить измерения и обрабатывать экспериментальные результаты. Но главное начиналось потом, нужно было защитить эти результаты в жестком диспуте с Яков Михайловичем. Он не терпел неточностей, был исключительно требователен к достоверности результатов, лукавство (а тем более фальсификации) пресекал самым жестким образом, учил и требовал надлежащей фиксации результатов и их обработки. Мы также получали первый опыт написания научных рефератов, а впоследствии и научных публикаций. Этот постоянный жесткий тренинг только по прошествии времени я смог оценить в достаточной мере.

Когда я уже свыкся с мыслью, что моя дипломная работа будет связана с атомными столкновениями и, по-видимому, будет посвящена двойной перезарядке, Яков Михайлович предложил мне совершенно другую тему: «Масс-спектрометрическое исследование вторичной ионной эмиссии». Это было связано с интересом Якова Михайловича к этой теме, и которая стала на длительный срок одной из ведущих в лаборатории Якова Михайловича. Начинать пришлось с разработки и создания установки и главной ее части – масс-спектрометра. Конечно, много оборудования было использовано от других установок, но электростатическую фокусировку для магнитного анализатора пришлось с листа рассчитать, изготовить и ввести в эксплуатацию. Довольно быстро установка была запущена и проведены первые эксперименты. Хочу отметить в связи с созданием этой установки замечательные условия для этого в ХФТИ и особенно вклад нашего выдающегося механика Александра Григорьевича Шевченко, виртуоза токарных, фрезерных, сборочных работ. Так как вакуумные условия в установке были недостаточно чистыми и неподходящими для исследований закономерностей вторичной ионной эмиссии, то были проведены исследования, связанные с выяснением механизма каталитических реакций, в частности,

на платине. Создавая установку по исследованию масс-спектрометрического состава вторичной ионной эмиссии, Яков Михайлович изначально планировал прикладное направление этих исследований. Мой дипломный проект был завершен и успешно защищен, и я был направлен на работу в ХФТИ в лабораторию Якова Михайловича.

Начались рутинные исследования, появились дипломники, и с Яковом Михайловичем установились замечательные взаимоотношения.

Через два года работы эти взаимоотношения начали давать трещину в силу несовместимости характеров, как в семейной жизни. В одном из мелких случаев Яков Михайлович понял, что я не очень «дрожу» при его регулярных наездах, и он совершенно сознательно начал процесс моей перековки. Однако я патологически не могу переносить насилие над собой. Хотя исследования от этого не страдали, однако после очередной накачки я заявил Якову Михайловичу, что при продолжении таких взаимоотношений я от него уйду. И процесс, как говорится, пошел и завершился двумя совместными с Яковом Михайловичем походами к Антону Карловичу Вальтеру. Нужно отметить, что к тому времени А. Я. Таранов и Антон Карлович, по-видимому, имели на меня какие-то виды и я, оглядываясь потом на этот период, понял, что без их поддержки я вряд ли был бы способен на уход от Якова Михайловича, несомненно, связанный с потерей темпа в моих исследованиях и в карьерном росте.

Сегодня я во многом связываю свое положение в науке с тем, что в качестве ученика Я. М. обучился тактике и стратегии научных исследований и закалил характер для преодоления трудностей.

Однако мои взаимоотношения с Яковом Михайловичем на этом 4-летнем взаимодействии не закончились. С 1961 года я практически самостоятельно начал заниматься в лаборатории А. Я. Таранова разработкой источника поляризованных протонов (дейтронов), ускорением поляризованных частиц и исследованиями с поляризованными частицами. По несколько раз в день я проходил мимо кабинета Якова Михайловича и, естественно, встречался с ним. При каждом случае я всегда говорил «Здравствуйте, Яков Михайлович», но он не отвечал и демонстративно отворачивался. Понимая свою значительную долю вины, я не обижался на Якова Михайловича и продолжал при встречах вести себя подобным же образом. В 1965 году я написал кандидатскую диссертацию и, хотя особой огласки об этом не было, при очередной встрече в коридоре с Яковом Михайловичем на мое «Здравствуйте, Яков Михайлович» впервые последовал ответ:

«Ваня, я слышал, что Вы написали диссертацию. Дайте я вычитаю». Яков Михайлович был непревзойденный специалист в написании и правке научных публикаций и достаточно быстро (менее чем через месяц) он позвал меня и ознакомил со своими правками и замечаниями.

Далее начинается новый этап наших взаимоотношений. Он был оппонентом на внутренней и официальной защитах моей кандидатской диссертации, и далее я постоянно имел возможность консультироваться у него и получать поддержку. Хочу отметить, что Яков Михайлович отлично разбирался в получении поляризованных атомарных пучков, так как в лаборатории № 1 он под руководством М. И. Корсунского занимался разработкой метода обогащения урана, используя его разделение по магнитным моментам в неоднородном магнитном поле.

Совершенно неожиданным для меня стало известие об увольнении Якова Михайловича из института. Я понимал, что для такого исключительно деятельного, посвятившего себя полностью науке человека, это будет страшный удар с катастрофическими последствиями, однако руководство института ничего не сделало, чтобы не допустить этого беспредела.

Так оно и случилось. Хотя Яков Михайлович некоторое время активно развивал свои исследования в Харьковском университете, он не смог перенести этого супернадругательства и вскоре ушел из жизни.

По прошествии многих лет, анализируя роль Я. М. Фогеля в развитии научных исследований в ХФТИ, хочу отметить огромное влияние такой цельной, колоритной личности на множество научных направлений института, а также его исключительную порядочность, непревзойденную жесткость в отстаивании истины и, конечно, настоящий педагогический талант.

И. М. Карнаухов,

член-корреспондент НАНУ,

заместитель директора ННЦ ХФТИ.

ПРЕДАННЕЙШИЙ СЛУГА НАУКИ

Яков Михайлович Фогель – преданнейший слуга науки, более 30 лет проработал в Харьковском Физико-техническом институте. За эти годы ему впервые в Харькове и в Украине удалось создать новое научное направление – исследование атомных процессов, а также создать научную школу молодых исследователей, которые внесли заметный вклад в разви-

тие мировой науки. Созданное новое научное направление и школа его учеников принесли Я. М. Фогелю мировое признание.

Быстро развивающиеся после Отечественной войны новые разделы науки и техники: физика плазмы, ускорители заряженных частиц и газовые разряды, астрофизика и физика высоких слоев атмосферы, радиационная химия, исследование поверхностей металлов и сплавов и другие – требовали детального исследования атомных процессов. Я. М. Фогель сумел своевременно сориентироваться и начал проводить принципиально новые научные исследования, создавать необходимые для этого экспериментальные установки, собирать и обучать научные кадры.

Для исследования различных атомно-атомных процессов нужны были положительные ионы и Я. М. Фогель вместе со студентами-дипломниками В. Т. Толоком, Б. Г. Сафроновым и Л. И. Крупник начинает изучать процессы образования ионов в ионных источниках: высокочастотном, дуговом и термоионном. Пройдут годы и В. Т. Толок станет член-корреспондентом АН УССР и руководителем крупнейшего в ХФТИ научного направления «Физика плазмы». Для дальнейших исследований нужны будут отрицательные ионы и Я. М. Фогель совместно с Л. И. Крупник начинает создавать и исследовать сверхзвуковые струи вещества для перезарядки положительных ионов в отрицательные. Для детального исследования физики процессов двухэлектронной перезарядки однозарядных положительных ионов в различных газах Я. М. Фогель вместе с Р. В. Митиным и В. А. Анкудиновым строит сложные масс-спектрометрические установки и на них получает принципиально новую информацию о закономерностях различных атомных процессов. Полученные новые экспериментальные результаты вывели работы Я. М. Фогеля на уровень лучших мировых достижений. Эти исследования в дальнейшем были развиты в работах Д. В. Пилипенко, А. Д. Тимофеева, А. Г. Коваля и др.

Для исследования процесса взаимодействия ионов с поверхностями различных металлов Я. М. Фогель совместно с Р. П. Слабоспицким построил принципиально новую установку и провел исследования механизма образования различных химических соединений на поверхности металлов, находящихся при различных температурах. Эти исследования в дальнейшем были развиты с целью поиска оптимальных катализаторов химических процессов. Совместно с Л. П. Рековой, В. Я. Колотом и др. изучалось влияние различных газов на термоионную эмиссию никеля, платины и вольфрама.

Постепенно работы по двухэлектронной перезарядке переходят в изучение спектров свечения различных разреженных газов, что представляло значительный интерес для геофизики и астрофизики. Я. М. Фогель совместно с Г. Н. Поляковой в сотрудничестве с Крымской Астрофизической Обсерваторией АН СССР и Институтом Физики Атмосферы АН СССР выполнили большой цикл исследований и установили очень важные закономерности свечения разреженных газов.

Проводимые в ХФТИ исследования взаимодействия ускоренных частиц с различными газами и с поверхностями металлов были затем продолжены и развиты в Харьковском Государственном Университете в лаборатории ионных процессов. Там же начались исследования новых процессов, ранее не проводимых в ХФТИ. Я. М. Фогель и в ХГУ создал свою школу физиков, которые продолжали исследования и после его смерти.

*Р. П. Слабоспицкий,
доктор физ.-мат. наук,
заместитель директора ННЦ ХФТИ.*

НЕСКОЛЬКО СЛОВ О Я. М. ФОГЕЛЕ

Когда в теперь уже далёком 1957 году я начал заниматься исследованием столкновений ионов с поверхностью твёрдого тела, атомами и молекулами газа, в нашей стране во главе этого направления в физической электронике стояли Л. Н. Добрецов, В. М. Дукельский, Н. В. Федоренко, А. Р. Шульман, В. Н. Лепешинская, Н. И. Ионов, Э. Я. Зандберг в Ленинграде, С. А. Векшинский, Г. В. Спивак в Москве, Н. Д. Моргулис в Киеве, Г. Н. Шуппе в Ташкенте. Я. М. Фогель в Харькове принадлежал к этой плеяде физиков, которые сочетали исследования физических явлений с их приложением к электронной технике. Особенностью работ Якова Михайловича было то, что он исследовал как эмиссионные явления на поверхности, так и элементарные процессы столкновений атомов. Первая область тогда называлась катодной электроникой, а вторая – физикой газового разряда. Я. М. Фогель был одним из тех, кто видел общность этих процессов и внёс большой вклад в их соединение в единую науку, которая включала в себя как физику атомных столкновений, так и физику плазмы.

Мои собственные контакты с Яковом Михайловичем начались с того, что он обратил моё внимание на обнаруженную им совместно с одним из его учеников странную нелинейную зависимость логарифма сечений двух-

электронной перезарядки от обратной скорости столкновения ионов с атомами, которая отклонялась от известного правила Х. С. У. Месси – выдающегося английского учёного, члена Королевской академии наук. Решение этой задачи потребовало ввести понятие реального времени атомного столкновения, которое не совпадало со временем взаимного пролёта сталкивающихся частиц. Это не только объяснило обнаруженный Яковом Михайловичем эффект, но и оказалось плодотворным для решения других задач атомных столкновений. Через много лет обнаруженный в Харькове эффект и его объяснение отмечались на юбилее английского учёного.

Меня поражала в Якове Михайловиче его исключительная увлечённость наукой. Другой его чертой была способность работать с молодёжью – он всегда был окружён учениками. Они его и теперь не забывают. Я с большим удовлетворением отмечаю всё то, что делается в Харькове для сохранения памяти об этом замечательном учёном и человеке.

*Э. С. Парилис,
доктор физ.-мат. наук, профессор,
Пасадина, Калифорния.*

УЧИТЕЛЬ

Над моим рабочим столом уже много лет висит фотопортрет Якова Михайловича, который когда-то по моей просьбе сделал Харлов А. А., многолетний главный фотограф ХФТИ. Портрет большой, примерно 60×35 см, увеличен с фотографии из личного дела Я. М. Фогеля, качество высокое, никакого зерна, отличная контрастность.

Я перевозжу этот портрет за собой последние лет 20. Сначала он висел у меня в кабинете в ХФТИ, потом, после того, как я ушел из института, – в моей рабочей комнате в технопарке «Институт монокристаллов», теперь в моем кабинете на 8 этаже исторического Госпрома, где я теперь работаю в региональном центре инновационного развития. Под портретом подпись «Фогель Яков Михайлович». Новые люди почти всегда спрашивают, кто это. Я обычно отвечаю: «Мой Учитель». И, как правило, немного рассказываю о нем.

Яков Михайлович один из тех людей, которые в наибольшей мере повлияли на мое развитие, на мою жизнь. Конечно, первая из них – это мама, с которой я прожил, не разлучаясь, 45 лет (мы всегда жили вместе). Был у меня тренер по гребле, незаурядный человек Виктор Николаевич Гаври-

лов, заметно повлиявший на мое физическое и психологическое развитие в юношеском возрасте. И, наконец, Яков Михайлович, работа и общение с которым в значительной мере сформировали мои взрослые качества, мое отношение к работе и к людям.

Прежде чем рассказать об этом, поделюсь тем, как я понимаю теперь, что за человек был Яков Михайлович. Кое-что мне о нем рассказала моя мама еще до личного с ним знакомства. Оказалось, что двоюродная сестра Якова Михайловича (ее звали Клара Матвеевна) была давней знакомой моей мамы, и когда я рассказал дома, что определяюсь на дипломную практику в лабораторию Фогеля (это был 1963 год), мама поговорила с Кларой Матвеевной и рассказала мне, что мой будущий научный руководитель – человек известный, и не только как ученый, но и как строгий руководитель и трудоголик, требующий высокой дисциплины и самоотдачи от сотрудников. И что работа в его лаборатории гарантирует приобретение хороших навыков в исследовательской деятельности и весомые шансы на научную карьеру. Стало понятным, что свободная, вольготная жизнь последних курсов университета заканчивается и нужно впрягаться. Тогда и начались мои почти 15 лет работы и жизни рядом с Я. М. Фогелем.

По-моему, Яков Михайлович был очень азартным человеком. И в науке, и в жизни он был очень соревнователен, любил и умел выигрывать. И в этом отношении он был настоящим ученым, поскольку настоящая наука – глубоко соревновательная сфера деятельности, область соревнования репутаций. А Яков Михайлович очень дорожил своей научной и человеческой репутацией.

Азарт к жизни вообще был, по-моему, тем главным стимулом, который побуждал Фогеля работать, не покладая рук, активно отдыхать, осваивать классическое искусство, музыку и литературу, с искренним интересом общаться с молодежью. Глядя на него, человека небольшого роста, тонкокостного, почти изящного, можно было диву даваться его энергии, а также множеству знаний, освоенных им и переработанных. Где это все помещалось?

Теперь расскажу о двух самых сильных его влияниях.

Во-первых, это книги.

Сегодня у меня за плечами почти 50 лет сосредоточенного книжного собирательства и около 6 тыс. томов собранной библиотеки, главная часть которой – это иллюстрированные издания и издания по графике, в первую очередь книжной графике. Эта книжная ориентация всегда была заметной

в нашей семье, в ней всегда были книгочеи, моя мама сразу после войны стала регулярно покупать художественную литературу и приучать меня к систематическому чтению. Поэтому к окончанию школы я в этом деле уже изрядно поднаторел и книгу, как мне казалось, достаточно знал. Однако вскоре оказалось, что знал далеко не все. Первым открыл мне это мой студенческий приятель, математик Илья Брискин, показавший у себя дома какое-то количество библиофильских (коллекционных) изданий русской поэзии 20–30-х годов. Это были небольшие изящно сделанные книжечки Гумилева, Белого, Мандельштама – поэтов, мне тогда практически не известных. А тиражи этих изданий были от 1000 до 5000 экз., т. е. ничтожные по советским нормам послевоенных времен, когда небольшим тиражом были цифры в 10 и даже 20 тыс. экз. Тут я впервые понял, что книжки можно ценить не только (а, нередко – и не столько) по содержанию, но можно рассматривать их как сделанные со вкусом вещи, предметы материальной культуры. Тогда я и стал заболеть красиво сделанными книгами, и эта «болезнь» резко усилилось после знакомства с библиотекой Якова Михайловича и книжных с ним разговоров.

Яков Михайлович не был книжником-коллекционером в чистом виде, т. е. человеком, неистово ищущим книжные редкости и пыль сдувающим с обретенных раритетов. В первую очередь он был читателем, очень внимательным и интенсивным. Но книг у него было очень много! И не только русских. Он много читал на немецком, английском и французском. Поэтому у него было множество изданий, отпечатанных в Германии, Франции, Англии, нередко еще в начале и середине XIX ст. А в то время, должен я сказать, европейские книжки делали очень качественно, на хорошей бумаге, с оригинальными гравюрами в качестве иллюстраций и, нередко, в художественных переплетах, часто кожаных и с затейливым золотым тиснением. Именно тогда я впервые увидел это великолепие, впервые подержал такие книги в руках. И заболел окончательно. Я стал целенаправленно искать и покупать книги, какие видел у Якова Михайловича, стал потихоньку разбираться в графических техниках, в особенностях бумаги и переплетов. Стал входить в мир книжников, куда впервые попал тоже благодаря Я. М. Фогелю. Дело в том, что у каждого настоящего книжника-собирателя всегда есть помощники – книжные поставщики. Это люди, немало зарабатывающие на услугах в поиске и доставке книг. Был такой помощник и у Якова Михайловича, в те годы еще молодой человек, Володя Старченко, приносивший домой Якову Михайловичу редкие книги,

а также литературу по киноискусству (которое Яков Михайлович прекрасно знал и любил) и билеты на кинопросмотры, что тогда организовывались в клубах культуры (клуб Строителей, например). Этот Володя был сыном известного в Харькове еще с довоенных годов букиниста, который вплоть до конца 50-х активно работал на этом полуофициальном рынке. А Володя наследовал его «профессию» и до сих пор трудится на этой ниве, совсем, конечно, уже не такой молодой, каким я его узнал когда-то. Теперь этот Володя помогает уже мне находить и приобретать искомое. Тогда Яков Михайлович познакомил меня с Володей, а уж тот постепенно перезнакомил меня и со многими другими собирателями. За что я ему искренне признателен, как и многим другим людям, однажды заболевшим книгами. Еще раз подчеркну свое впечатление от знакомства с библиотекой Якова Михайловича: книг было очень много, книг разноязычных, в которых их хозяин великолепно разбирался. И поразило меня даже не то, что Яков Михайлович много читал на нескольких языках (мой родной дядя, Владимир Никифорович Кривенко, был настоящим полиглотом и одним из лучших переводчиков в Харькове в те годы), сколько то, насколько глубоко он проникал в прочитанное, насколько близки становились для него его любимые авторы и герои. Например, он подолгу мог говорить об «Очарованной душе» и «Жане Кристофе» Р. Роллана, великом «Фаусте» или романах Ч. Диккенса. За прошедшие полвека в мире книг мне пришлось повидать практически всех ведущих книгособирателей города, и я должен сказать, что по части содержательного освоения классической литературы Яков Михайлович, безусловно, в самых их первых рядах.

Сегодня в моей книжной коллекции есть несколько превосходно изданных французских книг из библиотеки Я. М. Фогеля, подаренных мне не так давно его дочерью Ниной Фогель.

И второе его влияние – принципиальность и независимость.

Одной из определяющих черт характера Якова Михайловича было чувство собственного достоинства и умение отстаивать это достоинство, умение быть независимым. Независимым от авторитетов, начальства, внешнего влияния. В этом отношении он был далеко не рядовым человеком, эта его черта характера угадывалась очень быстро и была известной всем его окружавшим. Любому внимательному новому знакомому Фогеля практически сразу становилось понятным, что Яков Михайлович ориентируется в жизни и науке, определяет свое отношение к событиям и окружению, полагаясь, в первую очередь, на свое, а не привнесенное мнение.

И оценивает происходящее в соответствии со своими взглядами и принципами. Последние же у него были очень твердыми. Как мне кажется, он никому их не навязывал, но и высказывать не стеснялся. Как говорится, в рот он никому не заглядывал.

Одним из таких принципов, которые он твердо отстаивал, было его право устанавливать в своем научном кругу, в своей лаборатории такие формы работы и нормы отношений, какие он считал наиболее продуктивными. И решительно возражал, если по каким-то причинам в исследовательский процесс привносились чуждые и вредные этому процессу элементы. А это было очень не простым делом. Нужно помнить, что все это происходило в конце 60-х и 70-е годы, когда жизнь страны, в т. ч. и науки, все в большей мере стала регламентироваться, в нее стали активно вмешиваться партийные, комсомольские, профсоюзные органы, появились советы трудовых коллективов, повсюду внедрялись разные формы соревнования и т. д. Резко усиливались режимные требования, контроль со стороны служб техники безопасности и пожарной безопасности. Яков Михайлович конечно понимал, откуда идет этот новый порядок и какие силы за ним стоят. Это была государственная мобилизационная политика. Однако он, как руководитель подразделения, не только этому не способствовал (что тогда требовалось), но всеми правдами и неправдами старался не допустить внутрь лаборатории наиболее одиозные из навязываемых форм деятельности. Например, внутри нашей лаборатории достаточно долго не было социалистического соревнования, мы не принимали социалистических обязательств и не проводили продолжительных собраний по подведению его итогов. И так бывало и с другими подобными начинаниями, вводимыми в то время. Я знаю, что в институте тогда бытовало мнение, что мы (сотрудники его лаборатории) живем за Яковом Михайловичем, как за стеной. Яков Михайлович однажды просто спас меня от яростного наезда очень активного в то время начальника техники безопасности института, который, обнаружив в моей комнате во время работы экспериментальной установки определенные нарушения, стал угрожать тут же отключить электропитание. Я тоже разнервничался, и произошла почти рукопашная стычка. На шум из соседней комнаты вышел Яков Михайлович, в очень резкой форме высказался в обе стороны конфликта, погасил его, а затем «взял меня на поруки», поручившись, что сам проследит за освоением его сотрудником азов техники безопасности. Авторитет Якова Михайловича был высок, а его характер хорошо известен. И дело было улажено.

Еще один случай, в котором ярко проявился характер Я. М. Фогеля и его гражданская позиция. В 1969 году в Харькове арестовали и осудили за антисоветскую деятельность (фактически – за правозащитную деятельность) нескольких человек, в числе которых был Генрих Алтунян, впоследствии известный народный депутат Украины, и Володя Пономарев. Жена последнего, Ирина Рапп работала тогда на кафедре оптики в ХГУ им. А. М. Горького и сразу после ареста мужа была отстранена от работы в университете под предлогом возможного «дурного влияния» на студентов и аспирантов. Понятно, что трудоустроиться по специальности в то время жене «антисоветчика» было крайне непросто. Так вот, Яков Михайлович, прекрасно зная все перипетии этой истории, взял ее научным сотрудником в проблемную лабораторию ХГУ, которой тогда руководил, где Ирина благополучно работала многие годы.

Принципиальность и неуступчивость Якова Михайловича хорошо знали, и с ним мало кто хотел вступать в конфликты. За эту принципиальность и независимость очень многие относились к нему с уважением. Но были и другие, терпевшие его до поры, до времени. Эта пора наступила, когда в 1972 году претензии к Якову Михайловичу предъявила служба режима ХФТИ. Повод, насколько мы могли судить (а вокруг этого дела тогда намеренно наворачивали всяческие слухи), был не очень серьезный – нарушение недавно принятого порядка отправки зарубежной научной корреспонденции. Придравшись к тому, что Яков Михайлович продолжал свою многолетнюю практику почтовых коммуникаций с зарубежными учеными со своего домашнего адреса, а не через спецотдел института, его лишили допуска к секретным работам, что автоматически влекло за собой увольнение из института. Но это был не рядовой научный сотрудник, а ученый с европейской известностью, и уволить его так просто директор института не решался. Тем более что они долгие годы жили в одном доме, их жены были дружны, а директор в свое время работал инженером в группе Я. М. Фогеля. Возникла парадоксальная ситуация. Доктор наук, начальник лаборатории не имел права входа на территорию института, но продолжительное время продолжал числиться в его штате, работать дома и получать заработную плату. Чего только мы не предпринимали тогда, чтобы восстановить Якова Михайловича в институте! Ходили во все местные партийные и советские инстанции, делегировали ходоков в дирекцию, писали письма-обращения. Но ничего не менялось. Наконец академик Веркин Б. И., принимавший живое участие в попытках разрешить возникший

конфликт, посоветовал нам написать письмо с просьбой помочь в три инстанции: в ЦК КПСС секретарю Суслову М. А., в ЦК компартии Украины первому секретарю Щербицкому В. В. и президенту Украинской академии Патону Б. Е. Такое письмо было написано и за подписью двух сотрудников лаборатории ушло по инстанциям. Через какое-то время его авторов вызывали в обком партии, туманно намекали на какую-то активность вражеских разведок по этому поводу и, вообще, страшали. Обращались мы также за поддержкой к людям, влиятельным в научных кругах Киева, Москвы и Ленинграда, посылали туда ходатаев. Не помогли и там, нам давали понять, что дело это «мертвое», что в стране в очередной раз запустили кампанию «противостояния мировому сионизму», и что Якову Михайловичу не повезло и он попал на подъём этой волны. Долго тогда не покидало противное чувство.

Школа Я. М. Фогеля для меня оказалась очень полезной, я много из нее вынес. И один из главных ее уроков – ценность независимой позиции и умение ее защищать.

В. А. Гусев,
*директор Северо-восточного регионального центра
инновационного развития, Харьков.*

ПАМЯТИ НЕЗАБЫВАЕМОГО УЧИТЕЛЯ Я. М. ФОГЕЛЯ

В мае 1960 г. Яков Михайлович сделал доклад на кафедре ТНВ Харьковского политехнического института (ХПИ) о разрабатываемом в его лаборатории методе вторичной ионно-ионной эмиссии, высказал предположение о возможности его применения для изучения механизма химических реакций на поверхности металлического катализатора.

Зав. кафедрой проф. Атрощенко Василий Иванович, который всегда стремился осуществить новые идеи, задумал поддержать эти исследования. Как раз в это время я поступила в аспирантуру, и он предложил эту работу мне.

Таким образом, мне посчастливилось работать под руководством Якова Михайловича.

На первом этапе работа выполнялась в ФТИ АН УССР (так тогда назывался УФТИ). Я изучила экспериментальную установку, освоила технику эксперимента.

Вспоминается такой эпизод.

Как-то во время обсуждения результатов эксперимента Яков Михайлович в ответ на высказанное мной предложение говорит:

– Ну, Вы, Ирина, рассуждаете как химик!

– Яков Михайлович, а кто же я? – отвечаю.

– Как кто? Физик.

Мне было очень приятно: меня признали.

Обсуждение результатов всегда протекало интересно и поучительно, хотя я всегда трепетала от волнения. Мы учились вникать в суть явлений, анализировать, сопоставлять факты, делать выводы.

Как-то Яков Михайлович поручил мне написать статью в журнал по результатам экспериментов. Довольно долго помучившись, я принесла ему эту статью

Яков Михайлович сказал:

– Хорошо, я прочту.

Через несколько дней он принес мне материалы:

– Я, Ирина, прочел Вашу статью и немного над ней поработал.

Оказалось, что он заново написал статью по этим данным. А я, сопоставив оба текста, поняла, как надо писать статьи. Так Яков Михайлович меня этому научил.

После экспериментов в УФТИ встал вопрос о создании подобной установки в ХПИ. Такая установка создавалась на базе серийного изотопного масс-спектрометра МИ-1305. Под руководством Якова Михайловича ее проектировали Рыбалко Виктор Федосеевич и я. Главные узлы установки изготавливались в УФТИ. С благодарностью вспоминаю технолога Романа Березу, выдающегося механика Александра Григорьевича Шевченко и многих других. Стеклодувные работы делались золотыми руками незабываемого Егора Васильевича Петушкова.

Установка работала много лет. На ней были изучены процессы, протекающие на поверхности катализаторов в ряде реакций. Очень важным был переход на работу к нам ученика Я. М. Фогеля, Сахарова Алексея Алексеевича. С ним мы и проводили исследования.

По запросам копии чертежей этой установки были переданы в физико-химический институт им. Карпова (Москва) и институт катализа АН СССР (Новосибирск).

Когда требовался ремонт узла установки в мастерских ФТИ, Яков Михайлович помогал нам всегда. А отремонтированный узел выносил

в своем объемистом портфеле и передавал нам уже за проходной. Это был риск, но Яков Михайлович – человек великого мужества и преданности науке.

Без помощи Якова Михайловича и его сотрудников создать такую установку и обеспечить ее работу было бы невозможно.

Я бесконечно благодарна судьбе, что мне посчастливилось общаться с Яковым Михайловичем и учиться у него. Память о нем навсегда останется в моем сердце, как об истинно преданном науке ученом и великом педагоге. Его методика проведения научных семинаров и подготовки студентов к защите дипломных работ внедрена на нашей кафедре в ХПИ.

И. Е. Коробчанская,

канд. хим. наук, старший научный сотрудник.

ВОСПОМИНАНИЯ О Я. М. ФОГЕЛЕ

Моя научная деятельность развивалась под влиянием и постоянным вниманием двух известных людей – профессора Якова Михайловича Фогеля и директора Физико-технического института низких температур (ФТИНТ), академика Бориса Иеремиевича Веркина. Первый был моим учителем по жизни, второй – «оберегом» и работодателем интересных научно-технических проектов в период моей профессиональной зрелости. Судьба свела меня с этими людьми в начальный период становления ФТИНТа, в годы, когда после полета Гагарина в космос, начало интенсивно развиваться новое направление исследований – космическое материаловедение. Именно в это время «в ногу со временем» во ФТИНТе активно ведутся работы по созданию имитационных устройств факторов космоса (глубокого вакуума, электромагнитного излучения Солнца, потоков разного вида заряженных частиц и т. д.) с целью исследований воздействия этих факторов на материалы космической техники. В этот период Б. И. Веркин привлекает Я. М. Фогеля с группой его учеников для создания инжектора протонов и электронов с энергиями от 30 до 200 кэВ, а также имитатора вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучения Солнца. Того излучения, которое не доходит до поверхности Земли из-за поглощения атмосферой, но активно воздействует на объекты в космическом пространстве. Я. М. Фогель выдвигает идею о варианте имитатора ВУФ, основанном на новом физическом принципе: возбуждении сверхзвуковой струи газа в вакууме плотным

электронным пучком. В качестве ответственного исполнителя работ по созданию имитатора ВУФ он предлагает Б. И. Веркину мою кандидатуру. С первых же дней работы, я поняла, что имитатор ВУФ по идее Я. М. Фогеля – это многогранная проблема, находящаяся на стыке разных наук: газовой динамики, физики конденсированного состояния вещества в струе, физики атомных и электронных столкновений, ВУФ спектроскопии, физики кластеров и т. д. Поэтому мне, молодому специалисту без должного кругозора и опыта работы, решение этой проблемы казалось неосуществимым. Но моим руководителем был Я. М. Фогель, незаурядная личность, эрудит, ученый с широким физическим кругозором, хорошо владеющий техникой эксперимента и имеющий опыт работы в разных областях физики. Как оказалось, он был очень требовательным (а иногда жестким) к работе, простым в общении и скромным в быту. В то же время Яков Михайлович никогда не был безучастным к жизненным проблемам и нуждам работающих с ним людей, всегда оказывая им реальную помощь

Я. М. Фогель меня многому научил, а если говорить по существу, научил с «нуля» создавать новую оригинальную экспериментальную технику, тщательно отрабатывая все элементы ее конструкции; до совершенства доводить методику экспериментов; получать достоверные результаты путем многократных измерений; тактически и стратегически мыслить. Совершенно недопустимым считалось опубликование мало проверенных результатов (особенно сенсационных), полученных не совсем в чистых экспериментальных условиях. Этой заповеди я следовала на протяжении всей своей творческой деятельности. Но Яков Михайлович научил меня не только этому. Неисчерпаемым источником знаний оказался сам предложенный им новый метод генерации электромагнитного излучения, т. е. сверхзвуковая струя газа в вакууме, возбужденная электронным пучком. Уникальность метода обнаружилась в возможности получать спектры различных агрегатных состояний вещества в струе в ряду атом-кластер-микрористалл, а также в возможности производить перестройку спектра изменением среднего размера кластеров в струе. Благодаря широким возможностям метода нам удалось промоделировать спектральное распределение энергии ВУФ излучения Солнца в лабораторном эксперименте.

Впоследствии газоструйный метод был защищен тремя авторскими свидетельствами на изобретение, а первый опытный образец имитатора ВУФ, продемонстрированный в павильоне «Космос» на ВДНХ в г. Москве был удостоен одной золотой, двух серебряных и одной бронзовой медалей.

Вся работа от апробирования новой идеи метода через фундаментальные исследования его потенциальных возможностей с выходом на прибор для космического материаловедения проводилась в подразделении СКТБ ФТИНТа при постоянном внимании и поддержке Б. И. Веркина. Именно в СКТБ Б. И. Веркин осуществлял свои научно-технические замыслы, превратив его в мощное подразделение ФТИНТа прикладного значения. После одного из очередных дискуссионных совещаний Борис Иеремиевич поручает мне во главе с сектором, преобразованным впоследствии в отдел, работу по созданию имитатора инфракрасного (ИК) излучения верхней атмосферы Земли для отработки охлаждаемых оптико-электронных систем, работающих в ИК области спектра.

Газоструйный метод, модернизированный учениками Я. М. Фогеля под поставленную задачу, проявляет и здесь уникальную особенность – возможность имитировать ИК излучение в естественных процессах верхней атмосферы Земли. В этот же период был расширен спектральный диапазон газоструйного имитатора коротковолнового излучения Солнца в ультрамягкую рентгеновскую (УМР) область спектра.

Благодаря широким потенциальным возможностям газоструйного метода ученикам Я. М. Фогеля удалось в дальнейшем решить ряд актуальных задач в области фундаментальной физики. В частности, удалось установить структурные, электронные и эмиссионные свойства кластеров инертных газов в широком диапазоне средних размеров и проследить эволюцию энергетического спектра и релаксационных процессов при квазинепрерывном переходе от атома к твердому телу. Выдающийся результат получен в области физики атомных и электронных столкновений. При рассеянии электронов на атомах инертных газов был открыт новый вид тормозного излучения. Это – так называемое поляризационное тормозное излучение (ПТИ), возникающее вследствие динамической поляризации атома в поле налетающего электрона. По результатам открытия и исследования ПТИ Президиум НАН Украины присудил Э. Т. Верховцевой и Е. В. Гнатченко премию им. И. Пулюя в 2003 г.

В настоящее время различные варианты конструкций имитатора ВУФ и УМР излучения Солнца используются в России, Германии и Китае. Кроме того, проводятся исследования структурных и эмиссионных свойств смешанных Ван-дер-Ваальсовских кластеров в отделе «Спектроскопия конденсированных молекулярных систем» ФТИНТ НАН Украины.

Таким образом, газоструйный метод генерации электромагнитного излучения, предложенный Я. М. Фогелем и максимально использованный Б. И. Веркиным для осуществления масштабных научно-технических проектов, является основой новых направлений исследования в разных областях физики.

В настоящее время с нами нет Якова Михайловича Фогеля. Нет и Бориса Иеремиевича Веркина. Они ушли от нас, оставив неизгладимый след и память на Земле.

*Э. Т. Верховцева,
канд. физ.-мат. наук,
старший научный сотрудник.*

Я. М. ФОГЕЛЬ В ХАРЬКОВСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

В 60-х годах по инициативе и при непосредственном руководстве Якова Михайловича Фогеля, начальника лаборатории атомных столкновений ХФТИ, в ХГУ начались исследования по двум направлениям: взаимодействие быстрых электронов с молекулами и радиационные нарушения тонких пленок. Вскоре исследования были расширены за счет исследований процессов взаимодействия ионных пучков средних энергий с твердым телом – это масс-спектрометрия вторичных ионов и ионно-фотонная эмиссия. В 1968 году на основе этой научной группы в ХГУ была создана проблемная научно-исследовательская лаборатория ионных процессов, первым руководителем которой был Я. М. Фогель.

Мое знакомство с Я. М. Фогелем состоялось в декабре 1963 г., когда Яков Михайлович после моего окончания университета предложил мне пойти к нему в аспирантуру. В то время я еще мало кого знал из ученых ХФТИ, поэтому такое предложение воспринял достаточно спокойно. Видя такое состояние, мой руководитель диплома Р. П. Слабоспицкий сказал, что мне очень крупно повезло, так как я имею уникальный шанс работать у такого человека. Я тогда еще не знал, что Я. М. Фогель окажет такое большое влияние на всю мою жизнь, несмотря на то, что время нашей совместной работы было не так уж и велико.

Яков Михайлович был и Великий Ученый, и Великий Учитель. В таком сочетании за всю свою жизнь я больше не встретил ни одного человека,

так безмерно преданного науке и видящего смысл своей жизни не только в проведении научных исследований самому, но и в воспитании такой же преданности у молодых ученых.

Наиболее ярко лучшие качества Якова Михайловича проявлялись в проведении научных семинаров. Семинар у Я. М. Фогеля – это была школа научного мастерства, которая работала с точностью часового механизма. Но самой замечательной частью семинаров были «два слова» Якова Михайловича, в которых он после любого доклада и дискуссии давал четко и кратко все самое важное из этого доклада, а также, и это главное, о месте этой работы в ряду аналогичных исследований, об авторах этой работы и других работах этих же ученых, что мог сделать только ученый, обладающий энциклопедическими знаниями во многих областях науки. Эти семинары все очень любили. К сожалению, семинаров такого уровня я больше нигде не встречал.

Итак, мне было предложено заняться исследованиями процессов взаимодействия быстрых электронов с молекулами атмосферных газов, что я с энтузиазмом молодости и начал делать.

Одной из особенностей Якова Михайловича было неприятие работы «на таблицу». Поэтому исследования шли, непрерывно развиваясь вширь и вглубь. Так я, начав с простых исследований в видимой области спектров молекул при возбуждении быстрыми электронами, перешел к исследованиям в инфракрасной области спектра (до $11500 \text{ \AA}$) с использованием одно- и трех каскадных электронно-оптических преобразователей, что в то время было достаточно экзотичными измерениями. Затем, пройдя широкий диапазон энергий электронов от 20 кэВ до 100 эВ, перешел к измерениям сечений и функций возбуждения для этих же молекул (N_2 , O_2 , CO , CO_2 , NO , N_2O), попутно решив несколько сложных технических задач, таких как: получение сверхчистых газов, (примесь даже 0,01% посторонних газов таких как N_2 или O_2 , уже проявлялась в спектрах излучения), измерения абсолютного давления газовой мишени, создание чувствительной системы измерения интенсивностей излучения.

Так пришлось разработать и изготовить манометр Мак-Леода с параметрами, превосходящими (по литературным данным) все манометры такого типа в Советском Союзе, кстати, он позволил даже измерять давления таких конденсирующихся газов, как C_4H_{10} или $\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$.

Основными результатами этих исследований стали выводы о том, что энергетическая зависимость сечений возбуждения в широком диапазоне

энергий для разрешенных оптических переходов соответствует первому Борновскому приближению $\sigma \sim \ln E/E$, для запрещенных $\sigma \sim 1/E$, а для процессов с обменом электрона $\sigma \sim 1/E^n$, где $n \sim 3$. Второй существенный вывод был о том, что в спектрах излучения молекул, особенно многоатомных, огромную роль играет излучение фрагментов диссоциации, исследование которого может дать ценную информацию о перераспределении энергии, переданной электроном молекуле, внутри самой молекулы.

Поэтому по предложению Я. М. Фогеля дальнейшие исследования процессов взаимодействия электронов с молекулами, проводимые Б. М. Физгеером и Н. П. Данилевским, были посвящены изучению распределений фрагментов диссоциации по различным степеням свободы (Б. М. Физгеер) и изучению процессов диссоциативного возбуждения многоатомных молекул (Н. П. Данилевский). Самым главным выводом этих исследований было то, что при наличии 3 фрагментов диссоциации, энергия, передаваемая электроном молекуле, распределяется по уровням вращательной и колебательной энергии согласно статистике, т. е. 3 фрагмента – это уже много; а также вывод о том, что сечения образования фрагмента зависит от минимальной энергии процесса, в результате которого образуется данный фрагмент.

Я. М. Фогель обладал поразительной научной интуицией. В этой связи вспоминается начало исследований по ионно-фотонной эмиссии, невольным свидетелем которых я стал. Итак, 1965 год, университет, лаборатория, где я проводил исследования взаимодействия быстрых электронов с разреженными газами. Яков Михайлович предлагает В. В. Грицыне, своей новой аспирантке, тему для диссертации – заняться изучением свечения, возникающего при облучении поверхностей твердых тел, в частности металлов, ионным пучком. Аргументы «за»: это еще никто не исследовал и даже не видел, это очень интересно, это позволит далеко пройти в понимании процессов взаимодействия ионов средних энергий с твердым телом, ну и так далее. На замечание Грицыны В. В., что раз его никто не видел, то, наверное, свечения или нет вовсе, или оно такое слабое, что не будет возможности его зафиксировать, Яков Михайлович ответил, что, по его оценкам, интенсивности свечения будет достаточно для регистрации нашими приборами. Здесь вклинился я и подтвердил, что интенсивности, действительно, достаточно для регистрации. Яков Михайлович ко мне – откуда я это знаю? Я – да я такое свечение вижу почти каждый день и даже использую практически для настройки ионного пучка относительно

диафрагмы из тантала. Яков Михайлович ко мне – так почему же я о свечении ничего не говорил? Я – а я не знал, что это не виденное никем свечение. Здесь необходимо отметить, что в это время мы выполняли нашу первую хоздоговорную работу по распылению металлических пленок ионным пучком диаметром 200 мкм, а для коллимации ионного пучка применяли как раз танталовые диафрагмы. Так вот, на следующий день мне пришлось все это показывать на действующей установке. И первые исследования ИФЭ Грицыной В. В. были, как раз, проведены на тантале. Этот случай на меня произвел очень сильное впечатление: Яков Михайлович не видел свечения ИФЭ, по литературным данным другие тоже не видели, но Яков Михайлович был абсолютно уверен, что свечение не только есть, но и что интенсивности вполне достаточно для регистрации. И Яков Михайлович как всегда оказался прав. Для меня это было хорошим уроком; по крайней мере, в своей работе я всегда пытался оценить возможности аппаратуры и ожидаемые результаты исследований.

По результатам исследований процессов взаимодействия электронов с молекулами были защищены 3 кандидатские диссертации: Коппе В. Т. (1973 г.), Физгеер Б. М. (1976 г.) и Данилевский Н. П. (1979 г.).

В. Т. Коппе,

канд. физ.-мат. наук,

старший научный сотрудник.

РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

С 60-х годов прошлого века в проблемной научно-исследовательской лаборатории ионных процессов (ПНИЛ ИП) Харьковского университета развивается начатое по инициативе Я. М. Фогеля и руководимое им новое направление исследований в радиационной физике твердого тела – изучение радиационных нарушений в тонких металлических пленках. Проведение исследований в этой области было большой научной интуицией великого ученого-новатора. Вначале работа носила чисто прикладной характер. Сотрудниками Крымской обсерватории АН СССР была высказана просьба: выяснить влияние облучения протонами с энергией, равной энергии протонов «солнечного ветра», на оптические постоянные тонких пленок алюминия и серебра, что позволило бы получить сведения об изменении

коэффициента отражения зеркальных покрытий под влиянием воздействия «солнечного ветра». Исследования прошли успешно, удалось найти и устранить причину ухудшения зеркальности тонкопленочных металлических покрытий.

Как ученый, обладающий огромной научной интуицией, Я. М. Фогель прекрасно понимал актуальность изучения процессов образования радиационных дефектов в тонких металлических пленках в связи с их широким применением не только в приборах для космоса, но и в других областях науки и техники. Для науки это был совершенно новый объект исследований, который из-за размерных эффектов мог иметь никем еще не изученные особенности в процессах образования и поведения радиационных дефектов. К тому времени были опубликованы единичные работы других авторов, которые содержали отрывочные сведения об изменении некоторых физических свойств облученных тонких металлических пленок.

Поражает правильность подхода и динамизм целеустремленного учебного, каким был Я. М. Фогель, в решении данной проблемы. Первоначально исследования закономерностей накопления и отжига радиационных дефектов, включая кинетику процесса отжига дефектов и энергию активации их перемещения, были проведены на наиболее простой модели. В качестве такой модели использовалась тонкая пленка серебра, облученная протонами в широком интервале температур – от температуры жидкого азота до комнатной. Сопоставлены результаты изучения процессов образования радиационных дефектов в тонких пленках и массивном серебре. В дальнейшем исследования радиационных нарушений в тонких пленках металлов совершенствовались и углублялись.

Впервые Я. М. Фогелем был предложен, а его учениками использован комплекс методов исследования радиационных нарушений в тонких металлических пленках, включающий измерение удельного электросопротивления, периода кристаллической решетки с привлечением прецизионной рентгенодифрактометрии, изучение термической десорбции имплантированных частиц в процессе облучения и последующего нагрева, а также электронно-микроскопические исследования газовой пористости и других структурных дефектов. Сочетание нескольких физических методов в исследовании одного и того же объекта в то время еще практически не использовалось и было новым и наиболее перспективным для получения данных о закономерностях расположения ионно-имплантированных частиц в кристаллической решетке. Это позволило определить механизмы диффузии

имплантированных частиц к поверхности и последующей десорбции их в вакуум, а также описать начальные стадии образования газовых пор. Рентгенодифрактометрия тонкой металлической пленки без формирования пакетов также ранее никем не проводилась.

Претворяя в жизнь идеи Я. М. Фогеля, его ученики моделировали радиационные нарушения в приповерхностном слое сложных металлических сплавов и соединений исследованиями тонких металлических пленок. Параллельно изучали образование радиационных дефектов в пленках модельных металлов (Cu, Ag, Au) и металлов (V, Ni, Nb, Cr, Fe) – компонентов сложных сплавов и соединений. Перспективные композиционные структуры с напыленной пленкой вольфрама, которые применяются в устройствах современных установок термоядерного синтеза, являются объектом настоящих исследований.

Работая долгие годы под руководством Я. М. Фогеля мы, его ученицы, многим ему обязаны в своем становлении. Такие качества как целеустремленность, упорство, трудолюбие, тяга к новизне перешли от Якова Михайловича и остались в его воспитанниках. Пришли мы когда-то к Я. М. Фогелю, чтобы выполнить курсовые и дипломные работы и, встретив такого ученого и человека, расстаться с ним уже не смогли. Память о совместной работе с Яковом Михайловичем сохранится в наших сердцах навсегда. Все его ученицы защитили кандидатские диссертации: В. В. Чечетенко (1971 г.), Л. П. Тищенко (1980 г.) и Т. И. Перегон (1993 г.), получили 3 свидетельства на изобретение, опубликовали свыше 150 научных работ.

*Л. П. Тищенко,
канд. физ.-мат. наук,
старший научный сотрудник.*

ФИЗИК, УЧИТЕЛЬ, ЧЕЛОВЕК

В начале 60-х годов XX столетия Я. М. Фогель предложил новое направление в исследованиях процессов взаимодействия ионов средних энергий с твердым телом, которое связано с исследованием излучения возбужденных частиц, отлетающих от поверхности твердого тела при его облучении ионами средних энергий (1–100 кэВ). В дальнейшем это явление получило название ионно-фотонной эмиссии (ИФЭ). Это была абсолютно новаторская идея, тем не менее, уже с конца 60-х годов исследования основных закономерностей явления ИФЭ начали проводиться во всем мире

(Украина, Россия, Узбекистан, Голландия, США, Канада, Франция, Австралия). К настоящему моменту собрана значительная информация о закономерностях явления ИФЭ, однако имеющиеся экспериментальные данные невозможно объединить в рамках единой модели ИФЭ. Связано это с большой сложностью задачи, так как в рамках единых представлений необходимо учесть параметры, характеризующие твердое тело (тип связи, электронная структура), динамику процессов взаимодействия частиц первичного пучка с частицами твердого тела, а также параметры, которые характеризуют состояние отлетающей возбужденной частицы. Поэтому эти исследования актуальны и сегодня, тем паче, что на базе явления ИФЭ разрабатывается научно-исследовательский метод количественного и качественного анализа состава поверхности твердых тел разного происхождения, в частности биологических объектов. По данному направлению исследований были защищены 3 кандидатские диссертации: В. В. Грицына (1973 г.), Т. С. Киян (1980 г.) и С. П. Гоков (2004 г.), получены 4 свидетельства на изобретение, опубликовано свыше 200 научных работ.

Помимо того, что Яков Михайлович был генератором научных идей, он много внимания уделял научному становлению молодых сотрудников. Еженедельно проводилось детальное обсуждение полученных результатов, планирование дальнейших исследований. На этих обсуждениях присутствовали все сотрудники научной группы, начиная со студентов и кончая кандидатами наук. Каждый мог высказать свою идею, но она должна была быть аргументирована или результатами своей работы, или ссылкой на литературу. Сам Яков Михайлович тщательно следил за научной литературой, вел обширную картотеку по многим научным направлениям, которой, зачастую, пользовались и сотрудники.

Яков Михайлович был широко эрудированным человеком. Он любил и хорошо разбирался в музыке, особенно любил творчество В. А. Моцарта, в частности, его симфонии. Хорошо разбирался в живописи, был в восторге от портретов «Стариков» Рембрандта. Любил и прекрасно понимал киноискусство, владел тремя иностранными языками (читал не только научную, но и художественную литературу на французском, немецком и английском языках). В то же время Яков Михайлович был скромным, доброжелательным и чрезвычайно чутким человеком. Для всех, кому повезло работать с Я. М. Фогелем, он навсегда останется примером настоящего Человека.

В. В. Грицына,

канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник.

НЕСКОЛЬКО ЭПИЗODOB ИЗ ОБЩЕНИЯ С УЧИТЕЛЕМ

Студенческая молва всегда эмоциональна и не пропускает «проколов (boner)» преподавателей. Ответы же на мои расспросы о Якове Михайловиче были только уважительны и чаще всего восторженны.

Первая моя встреча с Яковом Михайловичем произошла в поселке Южном под Харьковом, куда мы с товарищем Алексеем Сахаровым поехали на встречу с ним. Август, Яков Михайлович, как всегда, работал с литературой, писал статьи, подбирал оттиски статей для молодой научной поросли. При этом считалось, что он активно отдыхает.

Нас рекомендовали для поступления в аспирантуру, и у научного руководителя было естественное желание поговорить с потенциальными сотрудниками. Поступление в аспирантуру к Я. М. Фогелю для нас было очень важной задачей. И все же было интересно узнать сразу как можно больше о возможном научном руководителе. После месяца пребывания в Карелии я – заросший, ни разу не бритый, а Алексей – свежевыбритый, включая голову, второй наглец. Наше собеседование показало, что с чувством юмора у Якова Михайловича проблем нет, а за вольности надо платить, отвечая на явно непростые дополнительные вопросы по университетским дисциплинам.

В аспирантуру я был принят, но не сразу, а после полугода практически ежедневной работы вечерами до 22 часов по окончании штатной работы. Это был не просто испытательный период, а прекрасная школа от шефа по формированию вкуса к экспериментальным исследованиям и аналитическому мышлению.

Школа жизни продолжалась и в дальнейшем. В качестве значимого для меня примера является одно из обсуждений результатов исследований. Атмосфера разговора была создана Яковом Михайловичем такой, что исчезла грань между безоговорочным авторитетом и «зеленым» экспериментатором. Шеф был достаточно терпелив при общении с молодежью, но в данном случае я, вероятнее всего, преодолел границу его терпения и в результате был послан в нужном направлении – у него это иногда прекрасно получалось. Самое неожиданное для меня произошло через день. По существовавшему у него плану встреч он должен был обсуждать результаты с другой научной группой. Медленно открывается дверь в лабораторию, я оборачиваюсь от письменного стола. В дверном проеме появляется голова Якова Михайловича: «Валентин, у вас найдется сегодня время продолжить

незаконченный разговор?» Согласитесь, что это было много для аспиранта. Во время этой встречи он согласился с одним из моих предложений по объяснению полученных результатов, но преобразовал мои рассуждения в более совершенную гипотезу, где доля моего предложения оказалась лишь небольшой составляющей. Затем быстро поднялся, быстро подошел к дверям и уже оттуда с улыбкой сообщил мне, что относительно второго вопроса он своего мнения не изменил...

Я полагаю, что отдельные эпизоды общения с интересным человеком являются определяющими в создании взаимоотношений с ним.

В лаборатории считалось нормой, что домой мы уходили не по окончании формального рабочего дня, а значительно позже. Это приводило к тому, что выполнение домашних обязанностей иногда находилось на грани срыва. При этом трудно было выкраивать время на чтение художественной литературы и тем более следить за ее новинками. Яков Михайлович это понимал и поэтому в ненавязчивой форме по окончании деловых бесед часто рассказывал о прочитанных им художественных произведениях и о своем отношении к ним.

Невозможно забыть мне и последнюю нашу встречу в больнице. Мы вышли на улицу, сели на скамейку, и я услышал от него много важного для себя. В разговоре им не было высказано никаких отрицательных суждений ни о состоянии своего здоровья, ни о существовавшей тогда жизненной ситуации, когда он был практически отключен от самого значимого в его жизни – от науки. В заключение нашей беседы он попросил меня выполнить без возражений его просьбу. Я, конечно же, не мог отказаться. А просьба, как выяснилось, заключалась в том, чтобы в дальнейшем, когда придет время защиты мною диссертации, я ни в коем случае не отказывался от предложения нового научного руководителя.

Заботиться о судьбе мальчишки в такой серьезный период своей жизни – это многого стоит и во многом характеризует настоящего человека.

В. В. Бобков,
*доцент, зав. Проблемной научно-исследовательской
лаборатории ионных процессов ХНУ им. В. Н. Каразина.*

ОБРАЗОВАНИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ПРИ АТОМНЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ

Я. М. Фогель

[Успехи физических наук, 1960 г. Июнь. – Т. LXXI, вып. 2. – С. 243–287]

І. ВВЕДЕНИЕ

Со времени второго издания монографии Мессі [1] посвященной отрицательным ионам, было выполнено значительное число экспериментальных и теоретических исследований, давших значительный вклад в эту область физики.

Повышенный интерес к отрицательным ионам, выявившийся в последние годы, объясняется тем, что элементарные процессы, приводящие к образованию и разрушению отрицательных ионов, играют значительную роль в астрофизике и физике высоких слоев атмосферы, в газовом разряде и радиационной химии, в масс-спектрометрии и технике ускорения заряженных частиц.

Отрицательные ионы образуются:

а) на поверхности твердого тела при взаимодействии с ней газа, молекулярных и ионных пучков (отрицательная поверхностная ионизация, вторичная отрицательная ионная эмиссия);

б) при соударениях медленных электронов с молекулами газов;

в) при соударениях ионов и атомов с молекулами газов.

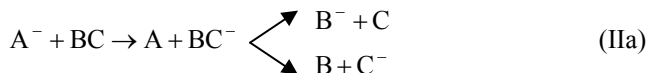
Результаты изучения процессов а) и б) достаточно полно изложены в ряде монографий и обзорных статей [2–5], поэтому в настоящей статье будут рассмотрены только процессы образования отрицательных ионов при соударениях тяжелых частиц, изучение которых началось совсем недавно.

Процессы образования отрицательных ионов при атомных столкновениях можно подразделить на два класса. К первому классу относятся процессы образования быстрых отрицательных ионов, возникающих при прохождении быстрых положительных ионов или атомов через разреженный газ, в результате элементарных процессов захвата быстрой частицей одного или нескольких электронов из электронной оболочки молекулы газа. Процессы этого класса могут быть представлены схематической формулой

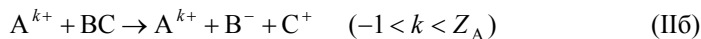


В этой формуле A^{k+} представляет собой быструю частицу, которая в зависимости от значения k может быть положительным ионом или нейтральным атомом ($0 < k < z_A$), а B представляет частицу газа. Естественно, что такие процессы могут иметь место только для частиц A , обладающих положительным электронным сродством.

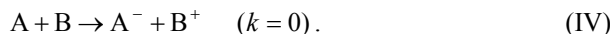
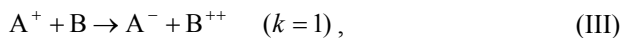
Ко второму классу относятся процессы образования медленных отрицательных ионов. Такими процессами являются: 1) перезарядка отрицательных ионов с молекулами газов



2) диссоциация молекулы газа на положительный и отрицательный ионы ударом быстрой тяжелой частицы



Процессы второго класса, несмотря на их важность для радиационной химии, изучены еще слабо, поэтому настоящая статья главным образом будет посвящена процессам первого класса. Среди процессов этого класса, вплоть до настоящего времени, были изучены только два, а именно: захват двух электронов однозарядными положительными ионами (двухэлектронная перезарядка) и захват одного электрона нейтральными атомами. На основании формулы (I) эти процессы могут быть представлены следующим образом:



Как выяснится из дальнейшего изложения, эффективные сечения процессов (III) и (IV) меньше, чем эффективные сечения других процессов захвата электронов положительными ионами. В частности, они гораздо меньше сечений весьма подробно изученного процесса захвата одного электрона однозарядными положительными ионами (обычная или одно-

электронная перезарядка). В связи с этим возникает вопрос о том, какими соображениями можно оправдать изучение этих явлений, обладающих сравнительно небольшой вероятностью, и что может дать для физики атомных столкновений их изучение. Для ответа на этот вопрос необходимо кратко изложить современное состояние этой области атомной физики.

Одной из главных задач при изучении некоторого процесса атомного столкновения является вычисление или экспериментальное определение функции $\sigma(v)$, т. е. зависимости эффективного сечения процесса от относительной скорости сталкивающихся частиц. Теоретический расчет эффективных сечений неупругих процессов при столкновениях тяжелых частиц может быть проведен только в ограниченном числе случаев, а именно для частиц с небольшим числом электронов в оболочке. Даже в этих случаях расчет возможен либо при медленных столкновениях, когда $v \ll v_0$, либо при быстрых столкновениях, когда $v \gg v_0$ (v – относительная скорость сталкивающихся частиц, v_0 – скорость электронов в сталкивающихся частицах) (см. обзор [6]).

Вычисление эффективных сечений захвата электронов может быть сделано также в тех немногочисленных случаях, когда известны кривые потенциальной энергии для начального и конечного состояний сталкивающихся частиц. В этих случаях для расчета сечений используется метод, предложенный Л. Д. Ландау [7–9]. Во всех остальных случаях некоторые суждения о кривой $\sigma(v)$ могут быть сделаны, исходя из адиабатической гипотезы Месси [10]. Основные положения этой гипотезы связаны с вели-

чиной так называемого адиабатического параметра $\frac{a|\Delta E|}{hv}$ (постоянная a – расстояние, на котором действуют силы взаимодействия между сталкивающимися частицами*, ΔE – дефект резонанса, т. е. изменение внутренней энергии частиц в результате процесса, h – постоянная Планка). Эти положения следующие:

1) в области малых скоростей (адиабатическая область), когда имеет место условие $\frac{a|\Delta E|}{hv} \gg 1$, эффективные сечения неупругих процессов очень малы и растут с увеличением скорости соответственно формуле

* Другое истолкование величины a , входящей в адиабатический параметр, дано в работе [11].

$$\sigma = \sigma_0 e^{-k \frac{a|\Delta E|}{h\nu}}; \quad (1)$$

2) максимальное значение эффективного сечения $\sigma_{\max}$ достигается при скорости $v_{\max}$ удовлетворяющей условию

$$\frac{a|\Delta E|}{h\nu_{\max}} \cong 1. \quad (2)$$

После прохождения максимума эффективное сечение монотонно убывает с дальнейшим увеличением скорости, и, следовательно, с точки зрения адиабатической гипотезы кривая $\sigma(v)$ должна представлять собой простую кривую с одним максимумом.

Работами Хастеда и его сотрудников [12–17] было показано, что адиабатическая гипотеза Мессе полностью применима ко многим процессам захвата одного электрона однозарядными положительными ионами. В частности, было установлено, что кривые $\sigma_{10}(v)^*$ для многих пар ион-молекула имеют простой характер и положение максимума на них определяется адиабатическим критерием (2). В случаях одноэлектронной перезарядки в благородных газах величина a , входящая в критерий (2), мало изменяется при переходе от одной пары ион-молекула к другой и в среднем равна 8 Å. Ход сечения $\sigma_{10}(v)$ в адиабатической области соответствует формуле (1). Однако для некоторых пар ион-молекула имело место явное несоответствие хода кривой $\sigma_{10}(v)$ с требованиями адиабатической гипотезы. Это несоответствие двоякого рода: 1) кривая $\sigma_{10}(v)$ имеет сложную структуру с двумя, а иногда даже с тремя максимумами; 2) в области малых скоростей эффективные сечения σ_{10} имеют аномально большие значения. Наличие нескольких максимумов на кривой $\sigma_{10}(v)$ в действительности не противоречит адиабатической гипотезе и объясняется тем, что в изучаемом процессе, помимо частиц, находящихся в основных состояниях, участвуют также и возбужденные частицы. Аномально большие сечения в области малых скоростей связаны с нарушением условия адиабатичности

* σ_{ik} – эффективное сечение процесса, при котором частица с зарядом ie превращается в частицу с зарядом ke .

$\frac{a|\Delta E|}{\hbar v} \gg 1$ в этой области. Такое нарушение, как показали Бэйтс и Мессис [18], может возникнуть в тех случаях, когда кривые потенциальной энергии начального и конечного состояний системы сталкивающихся частиц сближаются при некотором междядерном расстоянии R_M настолько, что минимальная разность потенциальных энергий $\Delta V(R_M)$ делается много меньше, чем ΔE . Характер потенциальных кривых зависит от природы сталкивающихся частиц, и поскольку в подавляющем большинстве случаев потенциальные кривые неизвестны, то вопрос о применимости адиабатической гипотезы к данному неупругому процессу может быть разрешен только с помощью эксперимента.

Из вышесказанного следует, что на современной стадии развития физики атомных столкновений, когда не существует теории, позволяющей вычислять эффективные сечения различных процессов, очень важно накопление нового экспериментального материала, на основе которого будет возможно в дальнейшем создание такой теории. Еще очень трудно сказать, какие экспериментальные исследования окажутся наиболее полезными для создания будущей теории атомных столкновений, однако некоторые общие положения можно попытаться сформулировать.

Прежде всего желательно исследование возможно большего числа различных процессов атомных столкновений, так как сопоставление свойств различных процессов может оказаться весьма поучительным. Очень важно при этом выяснить применимость адиабатической гипотезы к изучаемому процессу. Объектом изучения должны быть как полные сечения процесса, так и дифференциальные сечения рассеяния. Большой интерес представляют потери энергии быстрой частицы, а также угловое и энергетическое распределение образующихся при столкновении медленных частиц. Желательно также, как нам кажется, изучение таких процессов, для которых форма кривой $\sigma(v)$ для изучаемого процесса не искажена наличием возбужденных частиц в начальном состоянии системы либо их возникновением в ее конечном состоянии. Следует также отметить, что для теории могут оказаться интересными процессы с малой величиной сечений, а также процессы, сопровождающиеся слабым рассеянием.

Можно указать на следующие особенности процессов (III) и (IV), оправдывающие интерес к их изучению.

1) Эти процессы ранее не изучались.

2) В случае процесса (III) для некоторых пар ион–молекула (H^+ в H_2 и He , ионы щелочных металлов от термоионного источника в H_2 и He) получаемая кривая $\sigma(\nu)$ не искажается участием частиц в возбужденном состоянии. Форма такой «чистой» кривой может представить для теории атомных столкновений значительный интерес.

3) Дефект резонанса процесса (III) в том случае, когда все участвующие в процессе частицы находятся в основных состояниях, вычисляется по формуле

$$\Delta E_0 = (S_A + V_A^I) - (V_B^I + V_B^{II}) \quad (3)$$

где S_A и V_A^I –электронное сродство и первый ионизационный потенциал частицы А, V_B^I и V_B^{II} –первый и второй ионизационные потенциалы частицы В. Из формулы (3) следует, что ΔE_0 всегда отрицательно (процесс эндотермический) и имеет большую величину, достигающую во многих случаях нескольких десятков эв. Большая величина ΔE_0 для процесса (III) делает мало вероятным сближение потенциальных кривых начального и конечного состояния системы при тех междядерных расстояниях, которые достигаются при энергиях порядка десятков кэв, а отсюда возникает возможность применения адиабатической гипотезы к процессу $\text{A}^+ \rightarrow \text{A}^-$. С другой стороны, большая величина ΔE_0 облегчает изучение адиабатической области,, определяемой значением величины $\frac{a|\Delta E|}{h\nu}$, поскольку при

больших значениях ΔE эта область соответствует большим скоростям частиц первичного пучка, чем, например, для одноэлектронной перезарядки, для которой ΔE в большинстве случаев невелико.

4) Процесс (IV) интересен тем, что в отличие от захвата электронов одно- и многозарядными положительными ионами в нем захват электрона происходит на уровень электронного сродства с малой энергией связи.

Следует также указать на то, что изучение процессов (III) и (IV) представляет также и практический интерес с точки зрения создания источника отрицательных ионов для электростатических ускорителей перезарядного типа [19]. В этих источниках используется преобразование положительных ионов в отрицательные при прохождении пучка положительных ионов

через вещество, причем весьма существенную роль играют процессы (III) и (IV).

В настоящей статье дается описание аппаратуры и методики, применяемых для измерения эффективных сечений образования отрицательных ионов при атомных столкновениях, обсуждаются результаты измерений эффективных сечений процессов (III) и (IV) и рассматриваются следующие вопросы:

а) зависимость формы кривой: $\sigma(v)$ от природы пары сталкивающихся частиц;

б) интерпретация формы кривой $\sigma(v)$ на основании адиабатического критерия Мессе с учетом участия в процессе возбужденных частиц;

в) ход кривой $\sigma(v)$ в области малых скоростей $\left(\frac{a|\Delta E|}{hv}\right) \gg 1$);

г) ход кривой $\sigma(v)$ в области $v > v_{\max}$;

д) зависимость сечения в максимуме от различных факторов;

е) сопоставление сечений различных процессов захвата электронов.

В заключение статьи приводятся некоторые данные по образованию медленных отрицательных ионов при атомных столкновениях.

II. АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для измерения сечений σ_{1-1} и σ_{0-1} процессов (III) и (IV) неприменимы широко использовавшиеся ранее (и в настоящее время) методы Вина [20] ослабления пучка и собирания медленных ионов на измерительный электрод, подробно разобранные в обзорной статье Аллисона [21]. В этом легко убедиться на примере наиболее простых процессов $H^+ \rightarrow H^-$ и $H^0 \rightarrow H^-$. Пучок, образующийся при прохождении частиц H^+ и H^0 через вещество, представляет собой трехкомпонентную систему, содержащую водородные частицы в трех зарядных состояниях (H^+ , H^0 , H^-), а метод Вина пригоден только для определения сечений σ_{10} и σ_{01} двухкомпонентной системы H^+ и H^0 . Метод ослабления пучка дает для пучка H^+ сумму сечений $\sigma_{10} + \sigma_{1-1}$, а для пучка H^0 – сумму сечений $\sigma_{01} + \sigma_{0-1}$. Метод собирания медленных ионов на измерительный электрод в сочетании с масс-спектральным анализом состава медленных ионов дает сумму сечений

$\sigma_{1-1} + \sigma_{02}^i$ (σ_{02}^i – сечение ионизации с отщеплением двух электронов от молекулы газа мишени).

Измерение сечений σ_{1-1} и σ_{0-1} производилось с помощью масс-спектрометрического метода, который был впервые применен Корсунским и сотрудниками [22] для измерения сечений потери электронов ионами Li^+ и Na^+ , а затем одновременно и независимо разрабатывался Я. М. Фогелем с сотрудниками [23–28] и В. М. Дукельским и Н. В. Федоренко [29, 30].

Сущность масс-спектрометрического метода проще всего иллюстрировать примером трехкомпонентной системы, которая возникает при прохождении протонов через вещество. Состав пучка, образовавшегося в результате прохождения протонов через вещество, описывается дифференциальными уравнениями:

$$\frac{dN^+}{d(nx)} = -(\sigma_{10} + \sigma_{1-1})N^+ + \sigma_{01}N^0 + \sigma_{-11}N^- \quad (4a)$$

$$\frac{dN^0}{d(nx)} = \sigma_{10}N^+ - (\sigma_{01} + \sigma_{0-1})N^0 + \sigma_{-10}N^- \quad (4б)$$

$$\frac{dN^-}{d(nx)} = \sigma_{1-1}N^+ + \sigma_{0-1}N^0 - (\sigma_{-11} + \sigma_{-10})N^-, \quad (4в)$$

где N^+ , N^0 , N^- – количество протонов, нейтральных атомов водорода и отрицательных ионов водорода в пучке; n – число атомов газа мишени в 1 см^3 , X – длина пути в газе.

Из уравнения (4в) при использовании начальных условий $nx = 0$, $N^+ = N_0^+$, $N^0 = 0$, $N^- = 0$ легко получается следующая формула для определения эффективного сечения захвата протоном двух электронов:

$$\sigma_{1-1} = 1,08 \cdot 10^{-19} \left(\frac{T}{L} \right) \left[\frac{d \left(\frac{I^-}{I_0^+} \right)}{dp} \right]_{p=0}$$

где L – эффективная длина камеры столкновений, T – температура и давление газа в камере столкновений, I^- – ток отрицательных ионов водорода в прошедшем пучке, I_0^+ – ток пучка протонов, поступающих в камеру столкновений.

Метод измерения сечения σ_{1-1} , вытекающего из формулы (5), заключается в том, что изучается зависимость отношения $\frac{I^-}{I_0^+}$ от давления газа p

в камере столкновений. По линейному участку этой зависимости, наличие которого обуславливается образованием отрицательных ионов при однократных столкновениях протонов с молекулами газа, определяется стоящая в (5) производная, и затем по формуле (5) вычисляется искомое сечение.

В некоторых случаях, для того чтобы удовлетворить условию однократности столкновений, необходимо изучить зависимость от давления газа при очень низких давлениях. Однако сечение σ_{1-1} может быть определено также и в том случае, когда условие однократности столкновений не удовлетворено. Для этого надо воспользоваться решениями дифференциальных уравнений (4), имеющими следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} N^+ &= a_0 + a_1 e^{-r_1 nx} + a_2 e^{-r_2 nx}, \\ N^0 &= b_0 + b_1 e^{-r_1 nx} + b_2 e^{-r_2 nx}, \\ N^- &= c_0 + c_1 e^{-r_1 nx} + c_2 e^{-r_2 nx}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где величины r_1 , r_2 , a_0 , a_1 , a_2 и т. д. – функции шести сечений, входящих в дифференциальные уравнения (4). При достаточно малых значениях $r_1 nx$ и $r_2 nx$ выражения (6) для N^+ и N^- могут быть разложены в ряд. Поделив N^- на N^+ и пренебрегая степенями nx выше второй, мы получаем:

$$\frac{I^-}{I_0^+} = \sigma_{1-1} nx + \frac{1}{2} (\sigma_{10} \sigma_{0-1} + \sigma_{1-1} \sigma_{10} + \sigma_{1-1}^2 - \sigma_{1-1} \sigma_{-10} - \sigma_{1-1} \sigma_{-11}) (nx)^2 \quad (7)$$

Таким образом, в области давлений газа в камере столкновений, когда, с одной стороны, уже начинают сказываться многократные столкно-

вения частиц пучка с молекулами газа, а с другой, эти давления еще не очень велики, зависимость отношения $\frac{I^-}{I^+}$ от давления выражается формулой

$$\frac{I^-}{I^+} = \gamma p + \delta p^2, \quad (8)$$

где

$$\gamma = \sigma_{1-1} \frac{L}{kT}, \quad \delta = \frac{1}{2} (\sigma_{10} \sigma_{0-1} + \sigma_{1-1} \sigma_{10} + \sigma_{1-1}^2 - \sigma_{1-1} \sigma_{-10} - \sigma_{1-1} \sigma_{-11}) (nx)^2. \quad (9)$$

Обработав экспериментальные данные по методу наименьших квадратов, можно определить коэффициент γ при линейном члене в формуле (8) и, следовательно, вычислить сечение σ_{1-1} .

Отбор точек, удовлетворяющих формуле (8), можно сделать, построив зависимость выражения $\frac{I^-/I^+}{p}$ от p . Легко видеть, что точки, лежащие на прямолинейной части этой зависимости, будут удовлетворять формуле (8).

Наличие или отсутствие линейного участка зависимости $\frac{I^-}{I^+} = f(p)$ в исследованной области давлении определяется величиной выражения $\frac{\delta}{\gamma} p$. Если во всей исследованной области давлений условие $\frac{\delta}{\gamma} p \ll 1$ не удовлетворяется, то линейный участок отсутствует. При выполнении этого условия в исследованной области давлений будет иметь место линейная зависимость I^-/I^+ от p .

Для однозарядных ионов, более сложных, чем протон, метод определения сечения σ_{1-1} остается тем же самым. Разница заключается только в том, что прошедший через газ пучок перестает быть трехкомпонентной системой, так как в этом пучке могут содержаться, кроме однозарядных положительных ионов, нейтральных атомов и отрицательных ионов, также

двухзарядные, трехзарядные и т. д. ионы, возникшие благодаря процессам потери электронов при столкновениях частиц первичного пучка с молекулами газа. В этом случае увеличивается как число членов в каждом уравнении системы (4), так и число самих уравнений, равное числу зарядных состояний в прошедшем через вещество пучке. Однако формула (5) для вычисления сечения σ_{1-1} и выражение (8) для отношения I^-/I^+ остаются в силе с тем только различием, что коэффициент δ в формуле (8) будет функцией большего числа сечений.

Большим преимуществом масс-спектрометрического метода является то, что он пригоден для измерения сечений σ_{ik} любых процессов, при которых частица первичного пучка с зарядом ie превращается в частицу с зарядом ke . Это обстоятельство позволяет определять сечения σ_{1-1} и σ_{01} на одной и той же установке. Разница в условиях эксперимента при определении этих сечений заключается в том, что для определения сечения σ_{0-1} в камеру столкновений входит пучок нейтральных атомов, а в прошедшем пучке определяется зависимость отношения $\frac{N^-}{N^0}$ от давления в камере столкновений.

Как вытекает из предыдущего рассмотрения масс-спектроскопического метода, экспериментальная установка, позволяющая производить этим методом измерения эффективных сечений процессов, сопровождающихся изменением зарядного состояния быстрых частиц, должна состоять из следующих основных узлов: 1) системы, создающей моноэнергетический и однородный по составу пучок первичных частиц, направляемых в камеру столкновений, 2) камеры столкновений, представляющей собою проточную газовую мишень с толщиной l , которую можно изменять и измерять с достаточной точностью, и 3) системы, производящей разделение пучка, вышедшего из камеры столкновений, на компоненты с различными зарядными состояниями и обеспечивающей измерение интенсивности каждой компоненты.

Схема установки, примененной для измерения сечений σ_{1-1} и σ_{0-1} приведена на рис. 1. Пучок однозарядных положительных ионов создавался ионной пушкой, состоявшей из высокочастотного ионного источника 1, трехэлектродной линзы 2 и ускорительной трубки 3.

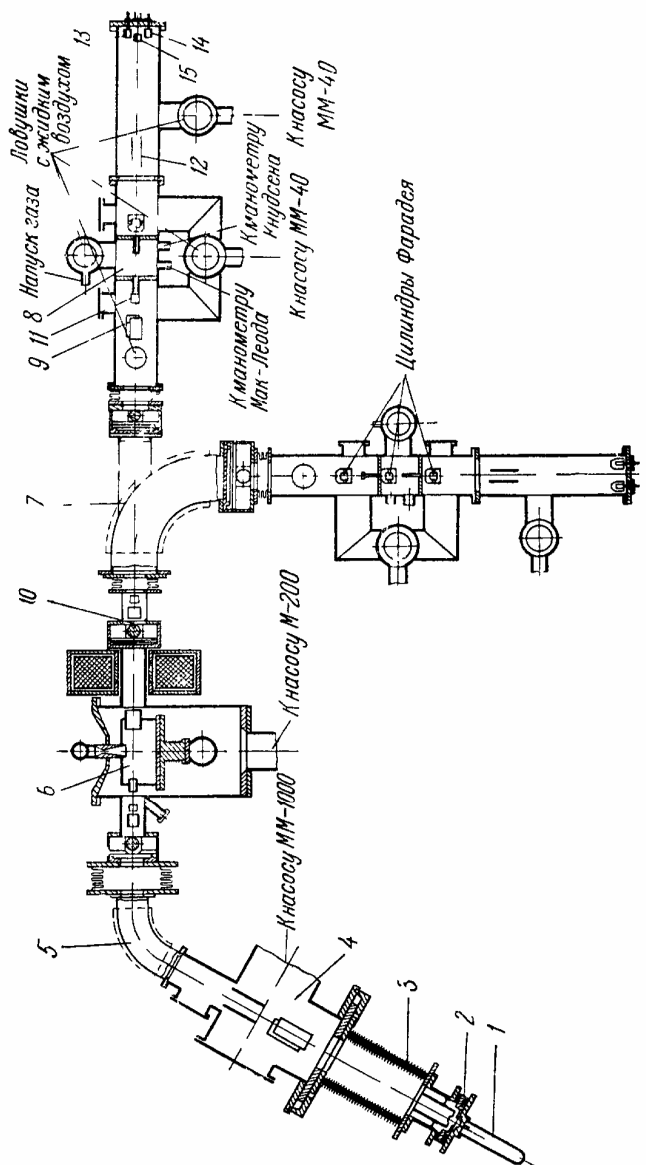


Рис. 1.

С помощью плоского шлифа и электростатического корректора 4 можно было смещать и поворачивать ионный пучок. Магнитный масс-монохроматор 5 выделял из ионного пучка моноэнергетическую и однородную по величине $\frac{m}{e}$ компоненту и направлял ее в камеру паро-ртутной мишени 6. Паро-ртутная мишень представляет собой сверхзвуковую струю паров ртути, вытекающую в вакуум. Подробное описание паро-ртутной мишени содержится в работах [31, 32], поэтому здесь мы на нем останавливаться не будем. В результате захвата и потери электронов при столкновениях ионов пучка с атомами ртути в струе, вышедший из нее пучок, кроме частиц, сохранивших первоначальное зарядное состояние, будет содержать также частицы в других зарядных состояниях, в частности, нейтральные атомы и отрицательные ионы. Второй магнитный анализатор 7 отделяет заряженные частицы от нейтральных. Пучок нейтральных частиц, коллимированный двумя диафрагмами 10 и 11 с диаметрами 3 и 2 мм соответственно, направлялся в камеру столкновений 8. Небольшая примесь заряженных частиц в атомном пучке появляется благодаря столкновениям атомов пучка с молекулами остаточного газа на пути от магнитного анализатора 7 до входной диафрагмы камеры столкновений 8. Для удаления этих заряженных частиц из нейтрального пучка, поступающего в камеру столкновений, перед входом в нее расположен плоский конденсатор 9. Пучок входил и выходил из камеры столкновений через каналы диаметром 5 мм и длиной 50 мм. Расстояние от выходной плоскости входного канала до входной плоскости выходного канала было равно 50 мм.

Разделение пучка, вышедшего из камеры столкновений, на нейтральную, положительную и отрицательную компоненты, производилось электрическим полем плоского конденсатора 12. Измерение токов заряженных компонент производилось при помощи цилиндров Фарадея 13 и 14, соединенных с ламповыми электрометрами ЭМУ-3 с максимальной чувствительностью 10^{-14} а/дел. Для абсолютных измерений интенсивности нейтрального пучка применялся вакуумный термоэлемент 15, соединенный с зеркальным гальванометром М107/3 чувствительностью $2 \cdot 10^{-8}$ в/дел. Конструкция этого термоэлемента и методика работы с ним описаны в работах [27, 33].

Вторая камера столкновений, ось которой перпендикулярна к оси первой камеры, предназначена для изучения процессов захвата и потери электронов положительными и отрицательными ионами. Ее конструкция

и размеры такие же, как и у первой камеры. Для получения пучка протонов и He^+ в баллон источника напускается водород и гелий, ионов C^+ и O^+ – углекислый газ, ионов B^+ и F^+ – BF_3 , ионов Cl^+ – CCl_3F_2 и ионов Li^+ , Na^+ и K^+ – пары LiCl , NaCl и KCl . Ионы Li^+ , Na^+ , K^+ на установке, описанной в работе ³⁴, получались от термоионного источника, представлявшего собой вольфрамовую спираль, на которую были нанесены алюмосиликаты Li , Na и K .

При измерении сечений σ_{1-1} масс-спектрометрическим методом ряд причин может привести к систематическим ошибкам. Эти причины следующие:

а) ПРИМЕСЬ К ПЕРВИЧНОМУ ПУЧКУ ИОНОВ ДРУГОЙ ПРИРОДЫ,
НО С ТЕМИ ЖЕ МАССОЙ И ЗАРЯДОМ

Единственным таким случаем в описанных ниже опытах была возможная примесь к пучку ионов F^+ ионов H_3O^+ , которые могли образоваться в плазме ионного источника благодаря ионно-молекулярной реакции $\text{H}_2\text{O}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}$ [35]. Однако в масс-спектре высокочастотного разряда в BF_3 ионы H_2O^+ не были обнаружены. С другой стороны, изучение масс-спектра ионов, полученных из высокочастотного разряда в парах воды, показало, что интенсивность пучка ионов H_3O^+ примерно в 7–8 раз меньше интенсивности пучка ионов H_2O^+ . Кроме того, было измерено сечение σ_{1-1} для ионов H_3O^+ в Ag при энергии 30 кэВ, которое оказалось на два порядка меньше сечения σ_{1-1} для ионов F^+ при тех же условиях. Все это позволяет сделать вывод, что результаты измерения эффективных сечений σ_{1-1} для ионов F^+ не могут быть искажены за счет примеси к пучку ионов H_3O^+ .

б) ПРИМЕСЬ ОСКОЛОЧНЫХ ИОНОВ К ПЕРВИЧНОМУ ПУЧКУ

В случае использования в качестве рабочего вещества ионного источника сложных химических соединений возможно загрязнение первичного пучка осколочными ионами, возникающими благодаря диссоциации более тяжелых молекулярных ионов в пространстве между ионным источником и масс-монохроматором. Такое загрязнение возможно, когда кажущаяся масса m^* осколочного иона близка к массе иона первичного пучка

$$\left(m^* = \frac{m_1^2}{M}, \text{ где } m_1 - \text{масса осколочного иона, } M - \text{масса молекулярного} \right.$$

нона до диссоциации). Такое загрязнение было возможно только в одном случае, а именно при получении ионов Cl_{35}^+ из разряда в CCl_2F_2 . Кажущуюся массу, близкую к 35, могли иметь ионы ClF^+ и CCl^+ , возникающие вследствие диссоциации ионов CClF_2^+ и CClF^+ . Чтобы убедиться в отсутствии этих ионов в пучке ионов Cl^+ , этот пучок пропусклся через камеру столкновений, и вышедший из нее пучок подвергался анализу с помощью электростатического анализатора. Так как электростатический анализатор разделяет ионы по энергиям, то ионы ClF^+ и CCl^+ , имеющие энергию, меньшую, чем ионы Cl^+ , должны были отделиться от таковых. В энергетическом спектре пучка с массой 35 эти ионы не были обнаружены. Таким образом, величина сечения процесса $\text{Cl}^+ \rightarrow \text{Cl}^-$ не могла быть искажена примесью осколочных ионов. Этот вывод подтверждается, кроме того, контрольными измерениями сечения σ_{1-1} использованием ионов Cl^+ , полученных из разряда в парах CCl_4 . В этом случае загрязнение первичного пучка осколочными ионами невозможно, а величина сечения σ_{1-1} получилась такой же, как и для пучка Cl^+ , полученного из разряда в CCl_2F_2 .

в) ПРИМЕСЬ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ К ПЕРВИЧНОМУ ПУЧКУ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ИОНОВ

В первичном пучке всегда имеется некоторая примесь нейтральных атомов, образовавшихся вследствие нейтрализации ионов на входной диафрагме камеры столкновений, а также при столкновениях ионов с молекулами остаточного газа на их пути от масс-монокроматора до входной диафрагмы. Если концентрация нейтральных атомов в первичном пучке равна

$$K, \text{ то измеряемое сечение } \sigma_{1-1} \text{ будет больше истинного в } \left(1 + K \frac{\sigma_{0-1}}{\sigma_{1-1}} \right) \text{ раз,}$$

т. е. систематическая ошибка, связанная с примесью нейтральных атомов, будет малой при условии $K \frac{\sigma_{0-1}}{\sigma_{1-1}} \ll 1$

С целью уменьшения этой ошибки в пространство между масс-монокроматором и камерой столкновений помещается ловушка с жидким азо-

том, понижающая давление остаточного газа в этом пространстве; кроме того, применяются входные диафрагмы с достаточно острыми краями.

Помимо этого, проводились контрольные опыты с целью выяснения величины рассматриваемой систематической ошибки. Эти опыты заключались в том, что с помощью помещенного непосредственно после входного канала камеры столкновений плоского конденсатора, создающего поперечное электрическое поле, из входящего в камеру пучка устранялись заряженные компоненты. Примешанные к пучку нейтральные атомы проходили через камеру столкновений и, захватывая при соударениях с молекулами газа один электрон, превращались в отрицательные ионы. Количество этих отрицательных ионов I_1^- могло быть сравнено с общим количе-

ством отрицательных ионов I_0^- , образовавшихся при том же давлении в камере столкновений в том случае, когда в камеру впускается весь первичный пучок (пластины конденсатора заземлены). Отношение $\frac{I_1^-}{I_0^-}$ сразу

же дает величину рассматриваемой систематической ошибки. Для большинства исследованных пар ион–молекула величина этой ошибки не превышает 10% и только для одной пары C^+-K_2 при энергии 50 кэВ достигала 14%. Таким образом, примесь нейтральных атомов к первичному пучку оказывает незначительное влияние на результаты измерений. На установке, предназначенной для измерения очень малых сечений двухэлектронной перезарядки ионов щелочных металлов, примесь нейтральных атомов к первичному пучку устраняется помещением плоского конденсатора между входной диафрагмой и входным каналом камеры столкновений.

г) НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ НА ВХОДНОЙ ДИАФРАГМЕ И В КАМЕРЕ АНАЛИЗАТОРА

В формулу (8) для определения величины сечения σ_{1-1} входят величины I^- и I^+ токов отрицательных и положительных ионов непосредственно на выходе из камеры столкновений. Однако фактически измеряемые цилиндрами Фарадея анализатора токи I^- и I^+ должны быть несколько уменьшены за счет нейтрализации ионов как на диафрагме выходного канала камеры столкновений, так и при столкновениях с молекулами остаточного газа в камере анализатора.

Сопоставление величин $\frac{I_1^-}{I_0^-}$ с данными измерения сечений σ_{0-1} по-

зволяет произвести оценку количества атомов, появляющихся благодаря нейтрализации положительных ионов на краях диафрагмы. Такая оценка для ионов H^+ , C^+ и O^+ дает для примеси нейтральных атомов величины 0,1%, 2,5 и 3% соответственно. Нейтрализация отрицательных ионов на краях диафрагмы не может быть существенно больше. Что же касается нейтрализации положительных и отрицательных ионов на молекулах остаточного газа в камере анализатора, то было установлено, что вымораживание конденсируемых при температуре жидкого азота паров в камере анализатора (т. е. уменьшение в несколько раз давления остаточного газа в камере анализатора) не оказывает никакого влияния на величину σ_{1-1} .

д) ОБРАЗОВАНИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ПРИ СТОЛКНОВЕНИЯХ С МОЛЕКУЛАМИ ОСТАТОЧНОГО ГАЗА В КАМЕРЕ СТОЛКНОВЕНИЙ

При измерениях σ_{1-1} масс-спектрометрическим методом следует учесть, что часть отрицательных ионов в прошедшем пучке образуется на остаточном газе камеры столкновений. Учет этого обстоятельства производится путем определения сечения σ_{1-1} из графика

$$\frac{I^-}{I^+} - \left(\frac{I^-}{I^+} \right)_\phi = f(p - p_\phi), \text{ где } \left(\frac{I^-}{I^+} \right)_\phi - \text{отношение } \frac{I^-}{I^+} \text{ в пучке, прошедшем}$$

через остаточный газ камеры столкновений, а p_ϕ – давление остаточного газа. Легко показать, что такой учет влияния остаточного газа («фона») приводит к правильным результатам только тогда, когда в исследуемой области давлений разность $\frac{I^-}{I^+} - \left(\frac{I^-}{I^+} \right)_\phi$ линейно зависит от $p - p_\phi$.

Если эта зависимость параболическая, то несложный подсчет показывает, что измеряемое сечение σ_{1-1} может быть выражено в следующем виде:

$$\sigma_{1-1\text{изм}} = \sigma_{1-1\text{ист}} + \frac{1}{2} \left[\sigma_{1-1} \sum_{i=1}^n (\sigma_{10}^i + \sigma_{1-1}^i) p_i + (\sigma_{10} + \sigma_{1-1}) \sum_{i=1}^N \sigma_{1-1}^i p_i \right] \frac{L}{kT} \quad (10)$$

где p , σ_{10} , σ_{1-1} — давление и сечения захвата одного и двух электронов для исследуемого газа, а p_i , σ_{10}^i и σ_{1-1}^i — соответствующие величины для одного из газов, входящих в состав остаточного газа камеры столкновений.

Наличие второго члена в формуле (10) показывает, что измеряемая величина сечения σ_{1-1} , вследствие присутствия в камере столкновений остаточного газа, оказывается больше истинного значения этой величины. Благодаря этому обстоятельству наличие конденсируемых паров в остаточном газе камеры столкновений оказывает существенное влияние на величину измеряемого сечения. Конденсация паров органических веществ в камере столкновений на поверхности ловушки с жидким азотом существенно уменьшает в ней давление остаточных газов и тем самым уменьшает рассмотренную выше систематическую ошибку.

Для всех исследованных пар ион–молекула было экспериментально установлено, что дальнейшее уменьшение величины $\left(\frac{I^-}{I^+}\right)_\Phi$, по сравнению с его значением при вымораживании конденсируемых паров, не приводит к уменьшению измеренного значения σ_{1-1} . Это означает, что при вымораживании конденсируемых паров в камере столкновений систематическая ошибка, связанная с наличием в камере столкновений газов, не конденсируемых при температуре жидкого азота, мала.

е) НЕОДИНАКОВОЕ РАССЕЯНИЕ ПЕРВИЧНЫХ И ВТОРИЧНЫХ ЧАСТИЦ В ГАЗЕ КАМЕРЫ СТОЛКНОВЕНИЙ

Как указывалось выше, для создания необходимого перепада давления, камера столкновений отделяется от пространства анализа прошедшего пучка каналом. Наличие этого канала приводит к тому, что первичная или вторичная частица, испытавшая рассеяние в некоторой точке своего пути в камере столкновений, может не выйти из нее, если только угол рассеяния окажется большим, чем максимальный угол выхода частицы из камеры, определяемый расстоянием точки пути частицы, где происходит рассеяние, от выходной плоскости канала и диаметром канала.

Первичные частицы либо испытывают упругое рассеяние, либо рассеиваются при неупругих процессах, в которых заряд первичной частицы не изменяется (возбуждение или ионизация атома газа ударом первичной

частицы); что касается вторичных частиц, то они рассеиваются в самом процессе их возникновения, а также могут упруго рассеиваться при втором столкновении.

Зависимость дифференциального сечения рассеяния от угла рассеяния может быть различной для различных процессов [36], что может повлечь за собой ошибку при измерении отношения $\frac{N^-}{N^+}$. Фактически может

измеряться величина $\frac{N^{-1}}{N^{+1}}$, связанная с величиной $\frac{N^-}{N^+}$ соотношением

$$\frac{N^{-1}}{N^{+1}} = \frac{C_1}{C_3} \frac{N^{-1}}{N^{+1}} \quad (10)$$

где постоянные C_1 и C_2 являются мерой того, какая часть первичных и вторичных частиц выходит через канал камеры столкновений. Легко видеть, что равенство

$\frac{N^{-1}}{N^{+1}} = \frac{N^{-1}}{N^{+1}}$ справедливо в двух случаях:

1) $C_1 = C_2 = 1$, т. е. все первичные и вторичные частицы выходят через канал камеры столкновений, и 2) $C_1 = C_2 \neq 1$, т. е. первичные и вторичные частицы рассеиваются одинаковым образом. В том случае, когда ни одно из вышеуказанных условий не выполняется, рассеяние частиц в камере столкновений приводит к систематической ошибке при измерении эффективных сечений с помощью масс-спектрометрического метода.

Оценка этой ошибки расчетным путем возможна, если для различных процессов столкновения, сопровождающихся рассеянием первичных и вторичных частиц, известны зависимости дифференциального сечения рассеяния в единичный телесный угол от угла отклонения в системе центра инерции. Поскольку эти сечения для рассматриваемого процесса неизвестны, такой расчет невозможен.

Экспериментально степень влияния неодинакового рассеяния первичных и вторичных частиц на величину измеряемого сечения оценивалась следующим образом. Изменялся средний телесный угол выхода частиц из камеры столкновений путем диафрагмирования выходного канала и измерялось сечение при различных значениях этого среднего телесного угла. Очевидно, что в том случае, когда неодинаковое рассеяние частиц

влияет на величину измеряемого сечения, должна наблюдаться зависимость измеряемой величины сечения от среднего телесного угла выхода частиц из камеры столкновений, причем с увеличением этого угла измеренное сечение должно стремиться к своему истинному значению. Если же указанного влияния нет, то измеренное сечение не зависит от среднего телесного угла выхода частиц из камеры столкновений. Опыты подобного рода производились для многих ионов и атомов и во всех случаях показали отсутствие зависимости измеряемого сечения от среднего телесного угла выхода частиц из камеры столкновений. Из этих опытов можно было вывести заключение, что в исследованных случаях первичные и вторичные частицы рассеиваются на углы, не превышающие 1° , и поэтому их рассеяние не сказывается на величине измеряемого сечения. Этот вывод был подтвержден измерениями сечений σ_{1-1} другим методом [28], в котором влияние неодинакового рассеяния сказывается на величине измеряемого сечения несравненно меньше, чем в масс-спектрометрическом методе.

Рассмотренные выше систематические ошибки имеют место и при измерениях сечения σ_{0-1} . Анализ, подобный вышеприведенному, показал, что эти ошибки не могут существенно исказить результаты измерений сечения σ_{0-1} .

Значения сечений для каждой энергии частицы получались усреднением двух измерений. В области максимума кривых $\sigma(\epsilon)$ в каждой энергетической точке производилось пять-шесть измерений. Величина случайных ошибок, вычисленных для индивидуального измерения, зависела от

отношения
$$\frac{I^-/I^+ - (I^-/I^+)\phi}{(I^-/I^+)\phi}$$
 и для сечений величиной $10^{-16}-10^{-17} \text{ см}^2$

составляла примерно $\pm 7\%$, а для сечений 10^{-18} см^2 и меньше была $\pm 30\%$. Статистическая ошибка для сечений, полученных усреднением большого числа измерений, не превышала $\pm 3\%$. Ошибка измерения энергии частиц была $\pm 3\%$.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИИ

Процесс $A^+ \rightarrow A^-$ исследовался для 59 пар ион – молекула, а процесс $A^0 \rightarrow A^-$ – для 39 пар атом – молекула. Кривые $\sigma(\nu)$ были получены в основном для первого процесса в интервале 5–60 кэв, и для второго про-

цесса в интервале 10–60 кэв. Исследованные пары видны из таблицы I. Результаты этих исследований изложены в работах [25–27, 34, 37–44].

Таблица I

$A^+ \rightarrow A^-$		$A^0 \rightarrow A^-$	
Газ	Ион	Газ	Ион
Гелий	$H^+, He^+, Li^+, C^+, O^+, F^+$	Гелий	H, He, B, C, O, F
Неон	$H^+, He^+, Li^+, C^+, O^+, F^+$	Неон	H, He, B, C, O, F
Аргон	$H^+, He^+, Li^+, C^+, O^+, F^+, Na^+, Cl^+, K^+$	Аргон	H, He, B, C, O, F
Криптон	$H^+, He^+, Li^+, B^+, C^+, O^+, F^+, Na^+, Cl^+, K^+$	Криптон	H, He, B, C, O, F
Ксенон	$H^+, Li^+, B^+, C^+, O^+, F^+, Na^+, Cl, K^+$	Ксенон	H, He, B, C, O, F
Водород	$H^+, Li^+, B^+, C^+, O^+, F^+, Na^+, Cl^+, K^+$	Водород	H, C, O
Азот	$H^+, Li^+, C^+, O^+, Cl^+$	Азот	H, C, O
Кислород	$H^+, Li^+, C^+, O^+, Cl^+$	Кислород	H, C, O

Из 19 ионов от H^+ до K^+ , процесс III был исследован для 9 ионов, в основном относящихся к атомам второй строки периодической системы Менделеева. Ионы Be^+ , Mg^+ , Ne^+ и Ar^+ не исследовались, поскольку соответствующие атомы не образуют отрицательных ионов. Хотя ион N^- и существует, но сечение процесса $N^+ \rightarrow N^-$ очень мало [40], поэтому этот процесс подробно не исследовался. Остались не исследованными ионы Al^+ , Si^+ , P^+ и S^+ . Довольно большой набор масс исследованных ионов позволял надеяться, что для наиболее легких ионов (H^+ , Li^+) удастся исследовать область скоростей $v > v_{max}$, а для тяжелых ионов изучить адиабатическую область. Кроме того, предполагалось, что для ряда исследованных пар ион – молекула в доступном для измерения интервале скоростей будет расположен максимум сечения. Как будет видно ниже, эти ожидания оправдались. Следует также отметить, что исследованные ионы обладают разнообразными структурами электронных оболочек, сильно различаются энергиями нейтрализации, а соответствующие им атомы обладают сильно различающимися величинами электронного сродства.

Учитывая то, что трактовка результатов проще для атомарных газов мишени, процесс исследовался в пяти инертных газах. Из молекулярных газов наибольший интерес представляет водород, поскольку при двухэлектронной перезарядке в водороде образуется два медленных протона, т. е. частицы, которые не могут быть в возбужденных состояниях. Для некоторых ионов процесс (III) был исследован в азоте и кислороде.

Выбор атомов, для которых был исследован процесс (IV), помимо вышеизложенных соображений, определялся тем, что электронное сродство изученных атомов He, B, N, C, O и F монотонно растет.

а) ЗАВИСИМОСТЬ ФОРМЫ КРИВОЙ $\sigma(v)$ ОТ ВЫБРАННОЙ ПАРЫ
СТАЛКИВАЮЩИХСЯ ЧАСТИЦ

Процесс $A^+ \rightarrow A^-$

Форма кривой $\sigma_{1-1}(v)$ весьма существенно зависит от природы партнеров пары сталкивающихся частиц.

Различие в форме кривых $\sigma_{1-1}(v)$ связано также и с тем, что исследованный интервал скоростей различен для ионов с разной массой. Наиболее простая форма кривой $\sigma_{1-1}(v)$ с одним довольно узким симметричным максимумом получается для пар $H^+ - H_2$, $H^+ - He$ и $Li^+ - H_2$ (рис. 2), у которых в процессе двухэлектронной перезарядки не могут участвовать частицы в возбужденных состояниях. Форма кривых $\sigma_{1-1}(v)$ для процесса $H^+ \rightarrow H^-$ в Ne, Ar, Kr и Xe (рис. 3) усложняется по сравнению с соответствующей кривой для He. В Ne кривая делается асимметричной: спад в сторону больших скоростей менее крутой, чем в сторону меньших скоростей. На кривых для Ar, Kr и Xe появляются два максимума – узкий при меньшей скорости и широкий при большей скорости. Сложную структуру с двумя максимумами имеет кривая $\sigma_{1-1}(v)$ для процесса $F^+ \rightarrow F^-$ в Ne, Ar, Kr и Xe* (рис. 4). Кривая с двумя максимумами получается также для процессов $F^+ \rightarrow F^-$ в H_2 и $O^+ \rightarrow O^-$ в Xe.

* Хотя второй максимум на кривой $\sigma_{1-1}(v)$ для Ne и не выявлен, но ее ход показывает, что он должен существовать.

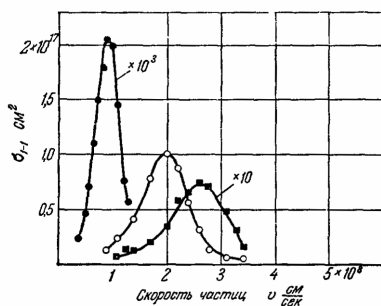


Рис. 2.

● — Li-H₂, ○ — H⁺-H₂, ■ — H⁺-He

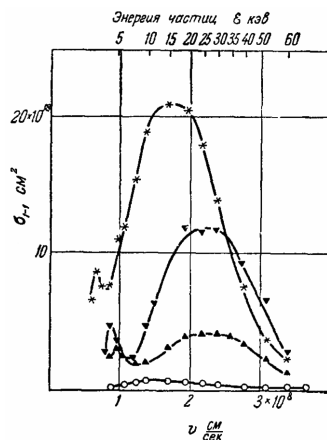


Рис. 3.

○ — Ne, ▲ — Ar, ▼ — Kr, * — Xe

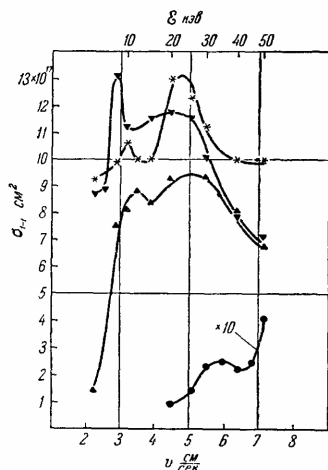


Рис. 4.

● — Ne, ▲ — Ar, ▼ — Kr, * — Xe

($v \times 10^7$ см/сек)

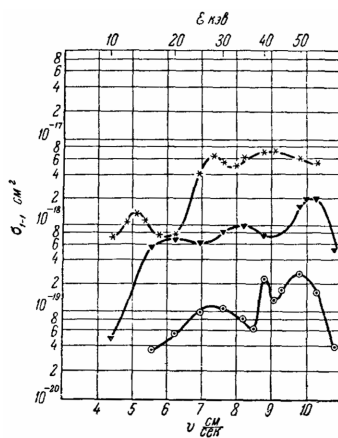


Рис. 5.

⊙ — H₂, ▼ — Kr, * — Xe ($v \times 10^7$ см/сек)

Еще более сложную структуру с тремя максимумами имеют кривые для процесса $B^+ \rightarrow B^-$ в Kr, Xe и H₂ (рис. 5).

В тех случаях, когда максимум сечения соответствует скорости, большей, чем наибольшая скорость исследованного интервала скоростей, кривая $\sigma_{i-1}(v)$ монотонно и быстро растет с увеличением скорости. Такая ситуация имеет место для процесса $\text{Na}^+ \rightarrow \text{Na}^-$ в Ar, Kr, Xe и H_2 (кривая для термоионного источника на рис. 6).

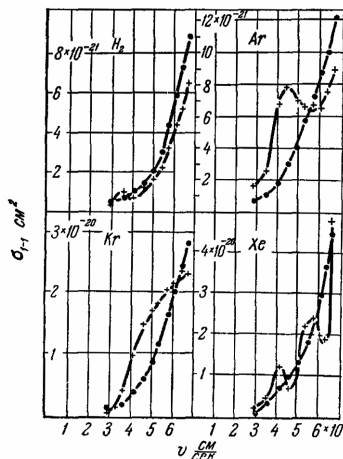


Рис. 6.

Процесс $\text{Na}^+ \rightarrow \text{Na}^-$, —●— термоионный источник, —+— высокочастотный источник

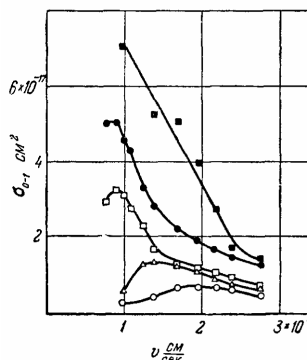


Рис. 7.

○ — He, △ — Ne, □ — Ar, ● — Kr, ■ — Xe

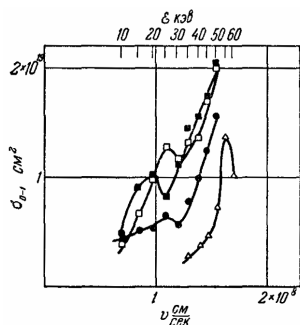


Рис. 8.

△ — Ne, □ — Ar, ● — Kr, ■ — Xe

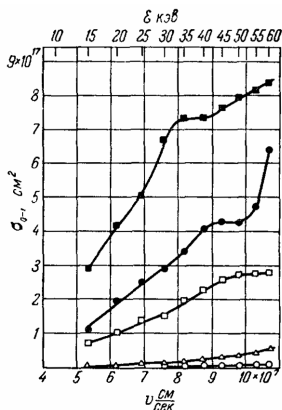


Рис. 9

○ — He, △ — Ne, □ — Ar, ● — Kr, ■ — Xe

Процесс $A^0 \rightarrow A^-$

Для процесса $A^0 \rightarrow A^-$ главным образом наблюдаются кривые $\sigma_{0-1}(v)$ простой формы с одним максимумом. В качестве примера на рис. 7 приведены кривые $\sigma_{0-1}(v)$ для процесса $H^0 \rightarrow H^-$ в He, Ne, Ar, Kr и Xe. Более сложную форму имеют кривые для процесса $He^0 \rightarrow He^-$ в Ar, Kr и Xe (рис. 8) и процесса $B^0 \rightarrow B^-$ в Kr и Xe (рис. 9). Ход этих кривых показывает на наличие второго максимума в области скоростей, больших, чем наибольшая скорость исследованного интервала скоростей.

б) ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ФОРМЫ КРИВОЙ $\sigma(v)$ НА ОСНОВАНИИ АДИАБАТИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ МЕССИ С УЧЕТОМ УЧАСТИЯ В ПРОЦЕССЕ ВОЗБУЖДЕННЫХ ЧАСТИЦ

Процесс $A^+ \rightarrow A^-$

Сначала произведем анализ кривых $\sigma_{1-1}(v)$ для двухэлектронной перезарядки ионов в инертных газах. Этот анализ естественно начать с наиболее простого случая, когда частицы, участвующие в процессе, могут быть только в основных состояниях. Такой простой случай имел место только для одной пары $H^+ - He$.

Дефект резонанса процесса (III) вычисляется по формуле (3) и для пары $H^+ - He$ он оказывается равным 64,4 эв. Определив $v_{\max}$ из кривой $\sigma_{1-1}(v)$ на рис. 2, можно, исходя из условия (2), вычислить величину a . Для пары $H^+ - He$ она оказывается равной 1,6 Å.

Рассмотрение кривых $\sigma_{1-1}(v)$ для процесса $H^+ \rightarrow H^-$ в Ne, Ar, Kr и Xe осложняется тем, что в этих случаях двухэлектронная перезарядка протона может сопровождаться образованием возбужденного медленного двухзарядного иона. Иначе говоря, при двухэлектронной перезарядке протонов, кроме процесса (III), может осуществляться процесс



дефект резонанса которого должен вычисляться по формуле

$$\Delta E_1 = (S_A + V_A^I) - (V_B^I + V_B^{II} + E_{B^{++}}) \quad (12)$$

где $E_{B^{++}}$ – энергия возбуждения иона B^{++} .

Из сопоставления формул (3) и (12) следует, что

$$|\Delta E_0| < |\Delta E_1| \quad (13)$$

Неравенство (13) показывает, что если постоянная a для процессов (III) и (V) имеет одинаковую величину, то максимум кривой $\sigma_{1-1}(v)$ для процесса (III) должен располагаться при меньшей скорости, чем максимумы для процессов (V). Имея это в виду, можно объяснить форму кривых на рис. 3 следующим образом: наблюдающаяся на опыте кривая $\sigma_{1-1}(v)$ является результирующей ряда кривых, соответствующих двухэлектронной перезарядке протонов с образованием двухзарядного иона в основном состоянии и в различных возбужденных состояниях. Если принять такую интерпретацию кривых на рис. 3, то узкий максимум при меньшей скорости соответствует процессу (III), а широкий максимум возникает из-за наложения ряда кривых $\sigma_{1-1}(v)$ для процессов (V), дающих ионы B^{++} с различными энергиями возбуждения.

Обращает на себя внимание убывание относительной высоты второго максимума для пар $H^+ - Xe$, $H^+ - Kr$, $H^+ - Ag$ и $H^+ - Ne$ с уменьшением атомного номера газа. У Ne этот максимум уже не проявляется, а влияние процессов (V) приводит только к асимметрии кривой $\sigma_{1-1}(v)$, о чем говорилось выше.

Исходя из предположения о том, что максимумы при меньшей скорости для пар $H^+ - Ag$, $H^+ - Kr$ и $H^+ - Xe$, а также максимум для пары $H^+ - Ne$ соответствуют процессу двухэлектронной перезарядки, когда все частицы находятся в основных состояниях, можно, пользуясь адиабатическим критерием (2), рассчитать величины a для всех этих пар. Расчет показывает, что эта величина для процесса $H^+ - H^-$ в пяти благородных газах примерно одинакова и колеблется около среднего значения $1,5 \text{ \AA}$.

Такая независимость постоянной a от природы пары сталкивающихся частиц имеет место и для других ионов, что видно, если построить график зависимости $v_{\max} = f(|\Delta E|)$. Из критерия (2) следует, что если a

одинакова для различных пар ион–атом, то $\nu_{\max} \sim |\Delta E|$. Насколько хорошо выполняется линейная зависимость между величинами $\nu_{\max}$ и $|\Delta E|$, видно из рис. 10, где приведен график зависимости для 20 пар ион–атом, для которых на кривых $\sigma_{1-1}(\nu)$ наблюдался максимум*. Вертикальные «усы» показывают ошибку при определении $\nu_{\max}$. Как видно из рис. 10, точки для рассматриваемых пар группируются около прямой линии, соответствующей $a \cong 1,5 \text{ \AA}$. Такой же результат, т. е. приблизительное постоянство величины a для различных пар ион–атом, был получен в работе [14] для однокэлектронной перезарядки, с той только разницей, что в этом случае величина $a \cong 8 \text{ \AA}$.

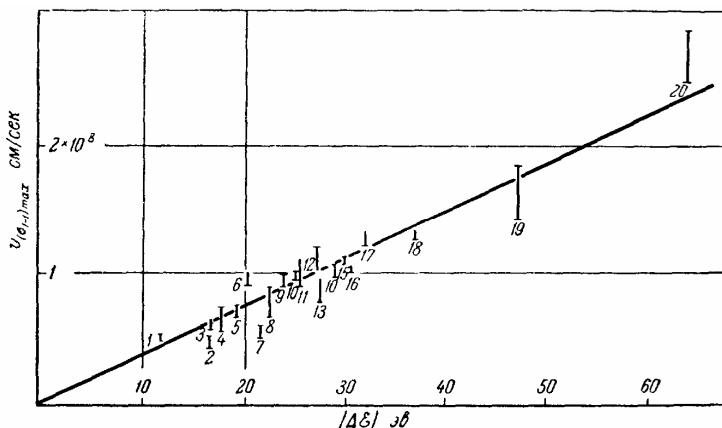


Рис. 10.

- 1 – $F^+ - Xe$; 2 – $F^+ - Kr$; 3 – $Cl^+ - Xe$; 4 – $O^+ - Xe$; 5 – $H^+ - Xe$; 6 – $C^+ - Xe$;
 7 – $F^+ - Ar$; 8 – $O^+ - Kr$; 9 – $H^+ - Kr$, 10 – $B^+ - Xe$; 11 – $C^+ - Kr$;
 12 – $Li^+ - Xe$; 13 – $O^+ - Ar$; 14 – $H^+ - Ar$; 15 – $B^+ - Kr$; 16 – $C^+ - Ar$;
 17 – $Li^+ - Kr$; 18 – $Li^+ - Ar$; 19 – $H^+ - Ne$; 20 – $H^+ - He$.

* При построении графика зависимости $\nu_{\max} = f(|\Delta E|)$ точки для процессов

$F^+ \rightarrow F^-$ и $B^+ \rightarrow B^-$ были нанесены в предположении, что максимум при наибольшей скорости соответствует процессу двухэлектронной перезарядки, когда все частицы находятся в основных состояниях. Из дальнейшего изложения будут ясны основания для такого выбора.

Таблица II

Пара	$ \Delta E_1 - \Delta E_0 $ в эв	V_B^{III} в эв
$H^+ - Xe$	30,0	31,3
$H^+ - Kr$	33,5	35,7
$H^+ - Ar$	39	40,9

Исходя из предположения, что постоянная a для процессов двухэлектронной перезарядки с участием возбужденных частиц имеет такое же значение, как и для процессов с невозбужденными частицами, можно, но положению максимума при большей скорости на кривых $\sigma_{1-1}(v)$ для пар $H^+ - Xe$, $H^+ - Kr$ и $H^+ - Ar$, определить энергию возбуждения двухзарядного иона. Действительно, из формул (3) и (12) следует, что

$$|\Delta E_1| - |\Delta E_0| = E_{B^{++}} \quad (14)$$

Считая, что для процесса (V) $a = 1,5 \text{ \AA}$, можно вычислить, пользуясь адиабатическим критерием (2), величину $|\Delta E_1|$ и, следовательно, величину $E_{B^{++}}$. Оказалось, что для рассматриваемых пар величина $E_{B^{++}}$, в пределах ошибки измерения, совпадает с третьим потенциалом ионизации атомов Ar, Kr и Xe (см. таблицу II).

Таким образом, при сделанном выше предположении приходится допустить, что второй максимум на кривых $\sigma_{1-1}(v)$ для указанных выше пар обусловлен процессом



Процесс (VI) по терминологии, предложенной в работе [45], можно назвать процессом ионизации с захватом, когда из трех электронов, отщепленных от частицы B, два захватываются протоном, а третий электрон уходит в континуум.

На рис. 3 видно, что на кривых $\sigma_{1-1}(v)$ для пар $H^+ - Xe$, $H^+ - Kr$ высота максимума при большой скорости больше, чем высота максимума при меньшей скорости. Этот факт на первый взгляд кажется мало понятным,

так как трудно думать, что процесс (VI), обладающий значительно большим дефектом резонанса, чем процесс (III), может иметь большую вероятность. Однако следует иметь в виду, что форма кривой $\sigma_{1-1}(\nu)$ в области между двумя максимумами определяется не только процессами (III) и (VI), но, по-видимому, и рядом процессов (V) с различными энергиями возбуждения ионов B^{++} . Поэтому высота второго максимума, определяющаяся суммой сечений процессов (V) и процесса (VI), может быть такого же порядка или даже больше, чем высота первого максимума.

Более детальное представление о различных процессах двухэлектронной перезарядки протонов в тяжелых инертных газах, определяющих форму кривой $\sigma_{1-1}(\nu)$, можно будет получить путем исследования потерь энергии, которые имеют место при эндотермическом процессе превращения положительного иона в отрицательный*.

Выясним далее причины появления на кривых $\sigma_{1-1}(\nu)$ двух максимумов для пар $F^+ - H_2$, $F^+ - Ar$, $F^+ - Kr$, $F^+ - Xe$, $O^+ - Xe$ и трех максимумов для пар $B^+ - H_2$, $B^+ - Kr$ и $B^+ - Xe$.

Прежде всего следует подчеркнуть, что для процессов $F^+ \rightarrow F^-$ и $B^+ \rightarrow B^-$ появление нескольких максимумов на кривой $\sigma_{1-1}(\nu)$ нельзя объяснить, как в случае процессов $H^+ \rightarrow H^-$ в Ar , Kr и Xe , образованием возбужденных двухзарядных ионов. Такая возможность исключается тем, что кривые $\sigma_{1-1}(\nu)$ для пар $F^+ - H_2$ и $B^+ - H_2$ имеют два и соответственно три максимума, как и соответствующие кривые для процессов $F^+ \rightarrow F^-$ и $B^+ \rightarrow B^-$ в благородных газах. Однако при двухэлектронной перезарядке в водороде образование медленных возбужденных ионов невозможно, поэтому сложная структура кривых $\sigma_{11}(\nu)$ в рассматриваемых случаях

* Легко показать, что при условии $\theta = 0, \Delta E \ll T_0$ и $\frac{m_1}{m_2} \ll 1$ имеет место соотноше-

ние $\Delta T = |\Delta E|$, где θ и ΔT – угол рассеяния и потеря энергии при двухэлектронной перезарядке, m_1 и m_2 – массы иона и атома газа T_0 – кинетическая энергия первичного иона. Исследуя спектр потерь энергии при превращении $A^+ \rightarrow A^-$, можно, пользуясь приведенным выше соотношением, вычислить энергии возбуждения двухзарядных ионов, образующихся при двухэлектронной перезарядке.

имеет другую причину. Этой причиной является примесь метастабильных возбужденных ионов в первичном пучке. Процесс



(двухэлектронная перезарядка возбужденного иона) имеет дефект резонанса

$$\Delta E_2 = (S_A + V_A^I + E_{A^+}) - (V_B^I + V_B^{II}) \quad (15)$$

где E_{A^+} – энергия возбуждения иона.

Из сопоставления формул (3) и (15) следует, что для всех $E_{A^+} < 2|\Delta E_0|$ имеет место неравенство

$$|\Delta E_0| > |\Delta E_2| \quad (16)$$

Неравенство (16) показывает, что если постоянная a для процессов (III) и (VII) имеет одинаковую величину, то максимум кривой $\sigma_{I-1}(v)$ для процесса (III) должен располагаться при большей скорости, чем максимумы для процессов (VII). Исходя из этого, при построении графика зависимости $v_{\max} = f(|\Delta E|)$ (рис. 10) точки для процессов $F^+ \rightarrow F^-$ в Ar, Kr и Xe, $B^+ \rightarrow B^-$ в Kr и Xe и $O^+ \rightarrow O^-$ в Xe были нанесены в предположении, что максимум при большей скорости соответствует процессу двухэлектронной перезарядки, когда все частицы находятся в основных состояниях.

На основании формул (3) и (15) имеет место следующее равенство:

$$E_{A^+} = |\Delta E_0| - |\Delta E_2| \quad (17)$$

По скоростям, соответствующим дополнительным максимумам, пользуясь адиабатическим критерием (2), можно вычислить $|\Delta E_2|$ и затем по формуле (17) энергии возбуждения ионов.

В таблице III сопоставлены энергии возбуждения ионов, вытекающие из расчета по формуле (17) и энергий соответствующих термов

по спектроскопическим данным*. Как видно из этой таблицы, вычисленные значения энергий возбуждения ионов во всех случаях, кроме пары $F^+ - H_2$, в пределах ошибки измерения, совпадают с энергиями термов по спектроскопическим данным. На кривой для пары $F^+ - Xe$ появляется максимум, связанный с состоянием $2s^2 2p^4 {}^1D$. На кривых для $F^+ - Kr$ и $F^+ - Ag$ максимум, связанный с этим состоянием, не отделен от основного, зато появляется максимум от состояния $2s^2 2p^4 {}^1S$. Наконец, для пары $F^+ - Ne$ появляется максимум от состояния $2s^2 2p^5 {}^3P^0$. Все эти состояния являются метастабильными.

На кривых $B^+ - Xe$, $B^+ - Kr$ и $B^+ - H_2$ появляются два дополнительных максимума, связанных с состояниями $2s2p^3 P^0$ и $2p^2 {}^3P$. Согласно правилам запрета только первое из этих состояний является метастабильным. Наличие максимума, связанного с возбужденным состоянием $2p^2 {}^3P$ иона B^+ , позволяет оценить порядок времени жизни T этого состояния. Легко показать, что

$$T = \frac{t}{\ln \frac{K_0}{K}}, \quad (18)$$

где t – время пролета ионов от источника до камеры столкновений, K_0 и K – соответственно концентрации возбужденных ионов в пучке, выходящем из источника, и в пучке, входящем в камеру столкновений. Некоторые данные (см. ниже) показывают, что концентрация $K \approx 5\%$ достаточна для того, чтобы максимум от возбужденных ионов проявился на кривой $\sigma_{1-1}(v)$. Положив $K_0 \approx 100\%$, что, конечно, явно завышено, мы можем весьма грубо оценить нижний предел T . Для состояния $2p^2 {}^3P$ иона B^+ этот нижний предел равен $5 \cdot 10^{-7}$ сек.

У пары $O^+ - Xe$ проявляется максимум, связанный с возбужденным неметастабильным состоянием $2p^4 {}^2S$. Нижний предел времени жизни этого состояния, согласно вышеприведенной грубой оценке, порядка 10^{-6} сек. Поскольку на кривой $\sigma_{1-1}(v)$ для пары $O^+ - Xe$ проявляется максимум от неметастабильного состояния иона O^+ , то, очевидно, в первичном пучке

* Энергии возбуждения ионов взяты из [46].

ионы O^+ должны быть в метастабильных состояниях $2s^2 2p^3 {}^2D_{5/2, 3/2}$ и $2s^2 2p^3 {}^2P_{3/2, 1/2}^0$. Однако максимумы, связанные с этими состояниями, отстоят от основного максимума всего на 3,3 и 5 эв соответственно, и поэтому не отделены от него. Наличие ионов в этих возбужденных состояниях в первичном пучке приводит только к расширению основного максимума, что действительно наблюдается на кривых $\sigma_{1-1}(\nu)$ для процесса $O^+ \rightarrow O^-$.

Таблица III

Пара	Рассчитанная энергия возбуждения иона в эв	Обозначение терма возбужденного иона	Энергия терма по спектроскопическим данным в эв	Метастабильные термы возбужденного иона
$F^+ - Xe$	3,6±0,9	$2s^2 2p^4 {}^1D$	2,6	$2s^2 2p^4 {}^1D$
$F^+ - Kr$	6,5±1,6	$2s^2 2p^4 {}^1S$	5,6	$2s^2 2p^4 {}^1S$
$F^+ - Ar$	6,3±1,9	$2s^2 2p^4 {}^1S$	5,6	$2s^2 2p^5 {}^3P_0$
$F^+ - Ne$	20,4±2,0	$2s2p^5 {}^3P^0$	20,5	
$F^+ - H_2$	10,0±2,0			
$B^+ - Xe$	5,0±0,9	$2s2p {}^3P^0$	4,6	$2s2p {}^3P^0$
$B^+ - Kr$	11,3±1,0	$2p^2 {}^3P$	12,1	
$B^+ - Ar$	5,6±1,6	$2s2p {}^3P^0$	4,6	
$B^+ - Ne$	11,7±1,6	$2p {}^3P$	12,1	
$B^+ - H_2$	4,4±0,3	$2s2p {}^3P^0$	4,6	
$B^+ - H_2$	11,0±2,0	$2p^2 {}^3P$	12,1	
$O^+ - Xe$	24,2±0,5	$2s2p^4 {}^2S$	24,4	$2s^2 2p^3 {}^2D_{5/2, 3/2}$ $2s^2 2p^3 {}^2P_{3/2, 1/2}^0$ $1s2s {}^3S$
$Li^+ - Kr$	59,9±2,0	$1s2s {}^3S$	59,0	$1s2s {}^1S$
$Li^+ - Ar$	61,3±2,0	$1s2s {}^1S$	60,7	
		$1s2s {}^3S$	59,0	
		$1s2s {}^1S$	60,7	

В основу проведенного выше анализа кривых $\sigma_{1-1}(v)$ положено допущение о применимости адиабатического критерия Месси к процессам $A^+ \rightarrow A^-$ с дополнительным предположением об одинаковости постоянных a для этих процессов, в независимости от того, участвуют или не участвуют в этих процессах возбужденные частицы. Эти предположения получают косвенное подтверждение в вышеизложенных экспериментах. Однако возможен прямой эксперимент, позволяющий судить о справедливости предположений, сделанных при интерпретации формы кривых $\sigma_{1-1}(v)$. Этот эксперимент заключается в сравнении кривых $\sigma_{1-1}(v)$ для одной и той же пары сталкивающихся частиц, но для ионов, полученных от различных ионных источников термоионного и высокочастотного. Идея этого эксперимента основана на том, что ионный пучок, полученный от термоионного источника, заведомо не содержит возбужденных ионов, в то время как в пучке, полученном от высокочастотного источника, могут содержаться возбужденные ионы. Благодаря указанному обстоятельству на кривой $\sigma_{1-1}(v)$, полученной с ионным пучком от термоионного источника, не должно быть дополнительных максимумов, связанных с наличием в пучке ионов в возбужденных состояниях, а на соответствующей кривой, полученной с пучком от высокочастотного источника, эти максимумы могут появиться.

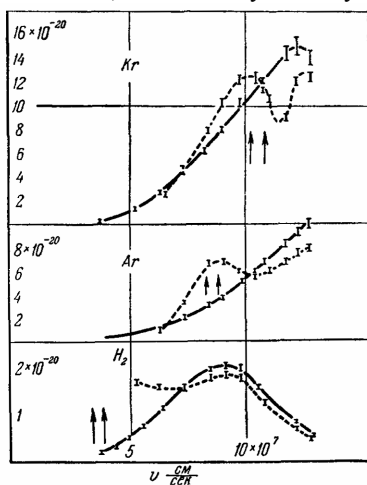


Рис. 11.

Процесс $Li^+ \rightarrow Li^-$. — термоионный источник,
 - - - - высокочастотных источник.

Наиболее однозначные результаты при таком сравнении должны дасть кривые $\sigma_{1-1}(v)$ для процесса $\text{Li}^+ \rightarrow \text{Li}^-$, поскольку ион Li^+ имеет только два метастабильных состояния $2s^3S$ и $2s^1S$ с близкими энергиями возбуждения 59 и 60,7 эВ, дающих для некоторых пар дополнительные максимумы, расположенные неподалеку от основного максимума. Результаты сравнения кривых $\sigma_{1-1}(v)$ для процесса $\text{Li}^+ \rightarrow \text{Li}^-$ в Kr, Ar и H_2 приведены на рис. 11. На кривой, полученной с помощью термоионного источника, наблюдается только один максимум, связанный с процессом $\text{Li}^+ \rightarrow \text{Li}^-$ для иона Li^+ в основном состоянии. На кривой, полученной с помощью высокочастотного источника (проведена пунктиром), появляется дополнительный максимум, связанный с наличием в пучке Li^+ ионов в возбужденных состояниях $2s^3S$ и $2s^1S$. На рисунке стрелками показаны положения максимумов* для процессов $\text{Li}^+(^3S) \rightarrow \text{Li}^-$ и $\text{Li}^+(^1S) \rightarrow \text{Li}^-$, вычисленные на основании адиабатического критерия Мессе, в предположении, что постоянная a для этих процессов имеет такое же значение, порядка 1,5 Å, как и для процесса $\text{Li}^+ \rightarrow \text{Li}^-$, определяющего положение основного максимума. Как видно из рис. 11, дополнительные максимумы для Kr и Ar в пределах ошибки измерения появляются в тех местах, которые им предписываются адиабатическим критерием Мессе†. Из этого факта следует вывод, что предположение об одинаковости постоянной a для процессов двухэлектронной перезарядки невозбужденных и возбужденных ионов является правильным. Заслуживает внимания тот факт, что дефект резонанса процесса $\text{Li}^+ \rightarrow \text{Li}^-$ вследствие большой энергии возбуждения иона Li^+ имеет положительное значение, а это означает, что постоянная a имеет одинаковое значение для эндотермических и экзотермических процессов двухэлектронной перезарядки. Результаты исследования процесса $\text{Li}^+ \rightarrow \text{Li}^-$ прямо доказывают возможность применения адиабатического критерия Мессе к процессам двухэлектронной перезарядки этих ионов, а также подтверждают справедливость объяснения природы дополнительных максимумов на кривых $\sigma_{1-1}(v)$ для процессов $\text{F}^+ \rightarrow \text{F}^-$, $\text{B}^+ \rightarrow \text{B}^-$ и $\text{O}^+ \rightarrow \text{O}^-$.

* Ввиду небольшого различия в энергиях термов $2s^3S$ и $2s^1S$ дополнительные максимумы, связанные с этими состояниями, не разделяются.

† На кривой $\sigma_{1-1}(v)$ для H_2 не удалось установить положение дополнительного максимума вследствие малой интенсивности пучка Li^+ при малых энергиях, однако из хода кривой видно, что этот максимум существует.

Сопоставление кривых $\sigma_{1-1}(v)$ для пучка с примесью ионов в возбужденных состояниях и без нее дает возможность оценить концентрацию возбужденных ионов в первичном пучке. Действительно, если первичный пучок содержит возбужденные ионы только с одной энергией возбуждения, то сечение σ'_{1-1} для такого пучка будет выражаться формулой

$$\sigma'_{1-1} = K\sigma_{1-1}^* + (1-K)\sigma_{1-1}, \quad (19)$$

где K – концентрация возбужденных ионов, σ_{1-1}^* и σ_{1-1} – сечения двух-электронной перезарядки возбужденных и невозбужденных ионов. Если ввести обозначение $\alpha = \frac{\sigma_{1-1}^*}{\sigma_{1-1}}$, то формула (19) перепишется в виде

$$\frac{\sigma'_{1-1}}{\sigma_{1-1}} = 1 + K(\alpha - 1). \quad (20)$$

Из формулы (20) следует, что при $\alpha \ll 1$ величина $K = 1 - \frac{\sigma'_{1-1}}{\sigma_{1-1}}$.

Оценку K лучше всего производить для таких пар, для которых скорости в основном и дополнительном максимуме сильно отличаются. Для процесса $\text{Li}^+ \rightarrow \text{Li}^-$ наибольшее различие в величине этих скоростей – у пары $\text{Li}^+ - \text{H}_2$. Оценка K по кривым $\sigma_{1-1}(v)$ для этой пары при скоростях $v > v'_{\max}$ ($v'_{\max}$ – скорость в основном максимуме) дает величину около 0,2.

Как показывает формула (20), вид кривой $\sigma_{1-1}(v)$ существенно зависит от величины K . Было экспериментально установлено, что изменение режима высокочастотного источника приводит к изменению вида кривой $\sigma_{1-1}(v)$, а именно, при неизменном положении основного и дополнительного максимумов изменяется величина сечений в этих максимумах. Очевидно, что этот результат связан с изменением относительного содержания возбужденных ионов в первичном пучке ионов Li^+ при изменении режима высокочастотного источника.

Различие в форме кривых $\sigma_{1-1}(v)$, полученных с пучками от термоионного и высокочастотного источников, наблюдается также для процесса $\text{Na}^+ \rightarrow \text{Na}^-$ (рис. 6). Основной максимум для этого процесса расположен

при энергии 130 кэв ($\text{Na}^+ - \text{Xe}$) и выше, т. е. не попадает в исследованный интервал энергий. Наиболее простой парой является $\text{Na}^+ - \text{H}_2$, так как в этом случае невозможно образование возбужденных ионов газа мишени. Максимум на кривой в случае высокочастотного источника связан с примесью ионов Na^+ в возбужденных метастабильных состояниях $3s_5 \ ^3P_2$ и $3s_3 \ ^3P_0$ с очень близкими энергиями возбуждения. Форма кривых $\sigma_{1-1}(\nu)$ для процесса $\text{Na}^+ \rightarrow \text{Na}^-$ в Ar, Kr и Xe, полученных с пучком от высокочастотного источника, может быть объяснена протеканием процессов двухэлектронной перезарядки возбужденных ионов Na^+ в состояниях $3s_5 \ ^3P_2$ и $3d^3F_4$ с одновременным образованием возбужденных двухзарядных ионов газа мишени. Примесь ионов Na^+ в состоянии $3s_5 \ ^3P_2$ и $3s_3 \ ^3P_0$ к первичному пучку, оцененная по кривым $\sigma_{1-1}(\nu)$, для пары $\text{Na}^+ - \text{H}_2$ составляет примерно 0,25.

При изучении процесса $\text{K}^+ \rightarrow \text{K}^-$ было обнаружено, что на кривых $\sigma_{1-1}(\nu)$ для газов H_2 , Kr и Xe, полученных с пучком от термоионного и высокочастотного источников, появились максимумы, связанные с наличием метастабильных возбужденных ионов K^+ в первичном пучке. Специальными опытами было установлено, что примесь возбужденных ионов в пучке, полученном от термоионного источника, не связана с возбуждением ионов K^+ при их соударениях с молекулами остаточного газа. Не исключена возможность, что появление возбужденных ионов K^+ в пучке от термоионного источника вызвано рассеянием части ионов пучка на краях диафрагм и крышках камеры масс-монокроматора, сопровождающимся возбуждением рассеянных ионов. Отсутствие этого эффекта для ионов Li^+ и Na^+ связано с тем, что энергии возбуждения метастабильного состояния ионов Li^+ , Na^+ и K^+ равны соответственно 60; 33; 20; 3 эв, т. е. у K^+ существенно меньше, чем у Li^+ и Na^+ , и поэтому следует ожидать, что сечение возбуждения иона K^+ будет больше, чем сечения возбуждения ионов Li^+ и Na^+ , и следовательно, примесь возбужденных ионов в пучке K^+ будет больше, чем в пучках Li^+ и Na^+ . Обнаружение побочного максимума

* Утверждение об увеличении сечения возбуждения ионов щелочных металлов с увеличением их атомного номера подтверждается данными работы⁴⁷, в которой было показано, что интенсивность линий искрового спектра щелочных металлов, возникающего при прохождении пучков этих ионов через пары ртути, растет с увеличением атомного номера иона

на кривых $\sigma_{1-1}(v)$ для процесса $K^+ \rightarrow K^-$ облегчается тем обстоятельством, что побочный максимум лежит очень далеко от основного (у пары $K^+ \rightarrow K^-$ эти максимумы расположены при энергиях 40 и 306 кэВ соответственно). Благодаря этому в области побочного максимума $\alpha \gg 1$, и поэтому из формулы (20) следует, что $\frac{\sigma'_{1-1} - \sigma_{1-1}}{\sigma_{1-1}} = K\alpha$, т. е. побочный

максимум можно обнаружить даже при малом K , если только α достаточно велико.

Проведенный выше анализ показывает, что для всех исследованных пар, у которых кривая $\sigma_{1-1}(v)$ имеет сложную структуру, эту структуру можно объяснить с помощью адиабатического критерия Месси, исходя из того, что наряду с процессом двухэлектронной перезарядки, когда все частицы находятся в основных состояниях, идут также процессы двухэлектронной перезарядки с участием возбужденных частиц.

Максимумы на кривых $\sigma_{1-1}(v)$ наблюдаются также для нескольких случаев двухэлектронной перезарядки в молекулярных газах (процессы

$H^+ \rightarrow H^-$, $Li^+ \rightarrow Li^-$, $B^+ \rightarrow B^-$, $F^+ \rightarrow F^-$, $O^+ \rightarrow O^-$ в H_2 и $H^+ \rightarrow H^-$ и $Cl^+ \rightarrow Cl^-$ в N_2). При обсуждении двухэлектронной перезарядки в молекулярных газах следует иметь в виду, что этот процесс может идти двумя различными путями, которые можно схематически представить формулами



Дефект резонанса процесса (VIII), при котором образуется медленный двухзарядный молекулярный ион*, можно вычислить по формуле (3). Что же касается процесса (IX), то дефект резонанса этого процесса следует вычислять по формуле

* Естественно, что процесс типа (VIII) может иметь место только в том случае, когда ион B_2^{++} стабилен.

$$\Delta E = V_A^1 + S_A - (E_{\text{дисс}} + 2V_B^1 + E_{\Pi}), \quad (21)$$

где $E_{\text{дисс}}$ – энергия диссоциации молекулы B_2 , а E_{Π} – потенциальная энергия двух образовавшихся ионов B^+ . Легко понять, что двухэлектронная перезарядка в водороде может осуществляться только по схеме (IX). Дефект резонанса в этом случае может быть однозначно вычислен, поскольку величина E_{Π} для двух протонов, образовавшихся из невозбужденной молекулы H_2 , известна [48]. Иначе обстоит дело для других молекулярных газов, для которых величина E_{Π} неизвестна, и поэтому дефект резонанса может быть рассчитан только для процесса, идущего по схеме (VIII), да и то только в том случае, когда известны первый и второй ионизационные потенциалы молекулы B_2 .

Таблица IV

Пара ион–молекула	a в Å
$H^+ - H_2$	2,3
$O^+ - H_2$	0,9
$F^+ - H_2$	0,9
$B^+ - H_2$	1,0
$Li^+ - H_2$	0,9
$H^+ - N_2$	2,0
$Cl^+ - N_2$	0,5

В таблице IV приведены значения постоянной a для двухэлектронной перезарядки в молекулярных газах, рассчитанные на основании адиабатического критерия (2). Для пар $H^+ - N_2$ и $Cl^+ - N_2$ было предположено, что процесс двухэлектронной перезарядки идет по схеме (VIII) и для вычисления дефекта резонанса был использован потенциал появления иона N_2^{++} , определенный в работе [49]. Вычисление a для пар $B^+ - H_2$ и $F^+ - H_2$ производилось в предположении, что процессу двойной перезарядки невозбужденного иона соответствует максимум, расположенный при наибольшей скорости.

Как видно из таблицы IV, значения a для двухэлектронной перезарядки в молекулярных газах изменяются в широких пределах и значительно отличаются от среднего значения $1,5\text{Å}$, характерного для атомарных газов.

Анализ кривых $\sigma_{1-1}(v)$ для пар $B^+ - H_2$ и $F^+ - H_2$ показывает, что в этих случаях постоянная a для процессов двухэлектронной перезарядки невозбужденного и возбужденного иона не одинакова. Таким образом, зависимость величины a от природы сталкивающихся частиц оказывается различной для атомарных и молекулярных газов. Для атомарных газов эта постоянная слабо зависит от природы сталкивающихся частиц и от состояния возбуждения иона, для молекулярных газов эти закономерности не имеют места. Аналогичные обстоятельства, как показали Хастед и его сотрудники [14], наблюдается в случае процесса одноэлектронной перезарядки однозарядных положительных ионов.

$$\text{Процесс } A^0 \rightarrow A^-$$

Так же как и для процесса $A^+ \rightarrow A^-$, сначала произведем анализ кривых $\sigma_{0-1}(v)$ для процесса $A^0 \rightarrow A^-$ в инертных газах. Наиболее просто этот анализ осуществляется в случае $H^0 \rightarrow H^-$, поскольку в данном случае заведомо известно, что пучок атомов водорода не содержит метастабильных атомов. Дело заключается в том, что хотя атом водорода и имеет метастабильное состояние $2^2S_{1/2}$ с длительностью жизни порядка $0,1 \text{ сек}$, однако нейтральный пучок, перед тем как войти в камеру столкновений, проходил через электрическое поле (конденсатор *II* на рис. 1 для очистки пучка от заряженных частиц). Воздействие этого поля уменьшало время жизни возбужденного состояния до $2 \cdot 10^{-8} \text{ сек}$, благодаря чему нейтральный пучок, поступавший в камеру столкновений, не содержал возбужденных атомов.

Имея в виду вышесказанное, можно утверждать, что процесс захвата электрона атомом водорода может идти по пути, когда все частицы находятся в основных состояниях



с дефектом резонанса

$$\Delta E_0 = S_A - V_B^I, \quad (22)$$

либо с образованием возбужденного медленного иона



с дефектом резонанса

$$\Delta E_1 = S_A - (V_B^1 + E_{B^+}), \quad (23)$$

где E_{B^+} — энергия возбуждения иона B^+ .

Возникает вопрос о том, какому из этих процессов следует приписать максимум на кривых $\sigma_{0-1}(\nu)$ на рис. 7. Если допустить, что этот максимум связан с процессом (XI), протекающим с возбуждением наиболее низко лежащего уровня иона B^+ , то тогда, исходя из адиабатического критерия Мессе, для пар $H^0 - He$, $H^0 - Ne$, $H^0 - Ar$ и $H^0 - Kr$ получается примерно одинаковое значение постоянной a , равное в среднем $1,3 \text{ \AA}$. Считая, что это значение a остается таким же для процессов $H^0 \rightarrow H^-$, сопровождающихся возбуждением более высоко лежащих уровней иона B^+ , мы можем, пользуясь критерием Мессе, рассчитать положение максимумов для этих процессов. Для пары $H^0 - Ar$ такой расчет показывает, что в интервале энергий 4–10 кэв должно быть расположено довольно большое число максимумов, т. е. на кривой $\sigma_{0-1}(\nu)$ в этой области энергий должен наблюдаться широкий максимум. Однако в действительности (см. рис. 7) от 4 до 10 кэв сечение σ_{0-1} довольно быстро уменьшается. Аналогичные обстоятельства имеют место для процесса $H^0 \rightarrow H^-$ в остальных инертных газах. Предположению о том, что максимум на кривых $\sigma_{0-1}(\nu)$ связан с процессом (XI), противоречит и форма этих кривых для процесса $O^0 \rightarrow O^-$. Например, если считать, что для пары $O^0 - Ar$ максимум на кривой $\sigma_{0-1}(\nu)$ при 55 кэв соответствует процессу (XI) с возбуждением наиболее низко лежащего уровня иона Ar^+ , то максимум для процесса (X) должен появляться при энергии $\approx 17 \text{ кэв}$. Фактически, начиная с 10 кэв, сечение σ_{0-1} для пары $O^0 - Ar$ непрерывно растет с увеличением энергии (рис. 27). Для процесса $O^0 \rightarrow O^-$ в Kr и Xe вышеуказанное предположение о природе максимума также приводит к противоречию с фактическим ходом кривых $\sigma_{0-1}(\nu)$.

Таким образом, мы приходим к выводу, что максимумы на кривых $\sigma_{0-1}(\nu)$ для процесса $H^0 \rightarrow H^-$ обусловлены процессом захвата электрона, при котором медленный ион остается в основном состоянии (процесс (X)). Постоянная a для этого процесса в инертных газах оказывается равной примерно $3\text{\AA}$. Следует отметить, что для процесса $H^0 \rightarrow H^-$ в молекулярных газах, в отличие от процессов двухэлектронной перезарядки, постоянная a получается такой же, как и для атомарных газов (см. ниже рис. 12), если считать, что захват электрона у молекулы сопровождается диссоциацией молекулярного иона.

Можно указать еще на одно отличие процессов $H^0 \rightarrow H^-$ и $H^+ \rightarrow H^-$ в инертных газах. Как указывалось выше, в случае процесса $H^+ \rightarrow H^-$ влияние процессов с образованием возбужденного медленного иона на форму кривой $\sigma_{1-1}(\nu)$ довольно велико, что приводит к появлению широкого дополнительного максимума с высотой в случае Ag, Kг и Хе, большей или сравнимой с высотой основного максимума (рис. 3). Ничто подобное не имеет места для процессов $H^0 \rightarrow H^-$. Например, для пары $H^0 \rightarrow Ag$ образование возбужденного иона Ag^+ в результате процесса $H^0 \rightarrow H^-$ должно дать дополнительные максимумы в интервале 15–35 кэв. Обратившись к кривой $\sigma_{0-1}(\nu)$ для этой пары (рис. 7), мы видим, что в этом интервале энергий наблюдается только некоторое замедление спада сечения σ_{0-1} с увеличением энергии атома. Из сделанного сопоставления можно заключить, что относительная вероятность процессов $H^0 \rightarrow H^-$ с образованием возбужденных медленных ионов меньше, чем таковая для процессов $H^+ \rightarrow H^-$ в тех же газах.

Переходя теперь к анализу кривых $\sigma_{0-1}(\nu)$ для процессов захвата электрона атомами He, В, С, О и F, необходимо иметь в виду, что атомный пучок, использованный для измерения сечений σ_{0-1} получался путем нейтрализации пучка соответствующих однозарядных положительных ионов в паро-ртутной мишени. Поскольку захват электрона положительным ионом, сталкивающимся с атомом ртути, может происходить как на основной, так и на возбужденный уровень, в образующемся после прохождения мишени нейтральном пучке могут содержаться возбужденные метастабильные атомы. Концентрация метастабильных атомов в нейтральном пучке зависит от вероятностей процессов, приводящих к появлению и исчезновению невоз-

бужденных и возбужденных атомов. Кроме того, при толщинах мишени, недостаточно малых для того, чтобы имели место однократные столкновения ионов с атомами ртути и недостаточно больших, чтобы выходящий из мишени пучок имел равновесный состав по возбужденным состояниям, концентрация возбужденных атомов будет зависеть от толщины мишени. Поскольку, как это следует из формулы (19), измеряемое сечение зависит от концентрации K возбужденных частиц в первичном пучке, в указанной выше области толщин мишени измеряемое сечение должно зависеть от K . Отсутствие такой зависимости позволяет сделать вывод о том, что концентрация возбужденных атомов в нейтральном пучке мала.

Исследование зависимости сечений σ_{0-1} и σ_{01} от толщины парортутной мишени для атомов He, B, C, O и F показало, что для всех атомов, кроме атомов He, сечения σ_{0-1} и σ_{01} не зависели от толщины мишени. Таким образом, только пучок атомов He содержал заметное количество частиц в возбужденных состояниях.

Проведенный выше анализ делает весьма вероятным утверждение о том, что максимумы на кривых $\sigma_{0-1}(v)$ для процессов $O^0 \rightarrow O^-$ в Ag, Kг и Xe, $C^0 \rightarrow C^-$ в Kг и Xe и $F^0 \rightarrow F^-$ в Kг и Xe, а также плато на кривых $\sigma_{0-1}(v)$ для процесса $B^0 \rightarrow B^-$ в Kг и Xe (см. рис. 9) следует приписать процессу (X), когда все частицы находятся в основных состояниях.

Исходя из этого утверждения, можно рассчитать постоянную a для перечисленных выше пар. В результате этого расчета оказывается, что постоянная a не сильно отличается от среднего значения $3\text{\AA}$, полученного для процессов $H^0 \rightarrow H^-$ в инертных газах. Степень отклонения величины a для различных пар атом-атом от этого среднего значения видна на рис. 12, где нанесены точки зависимости $v_{\max}$ от $|\Delta E|$, а тангенс угла наклона проведенной на нем прямой соответствует постоянной a , равной $3\text{\AA}$.

Следует отметить, что постоянная a для процесса $A^0 \rightarrow A^-$ значительно отличается от таковой для процесса $A^+ \rightarrow A^-$, что особенно наглядно видно на рис. 13, где графики $v_{\max} = f(|\Delta E|)$ для обоих процессов нанесены на одном рисунке. В свою очередь постоянные a для процессов $A^0 \rightarrow A^-$ и $A^+ \rightarrow A^-$ значительно меньше, чем эта постоянная для процесса $A^+ \rightarrow A^-$, которая, как уже упоминалось, по данным Хастеда и его сотрудников, равна $8\text{\AA}$. Таким образом, результаты исследования процес-

сов $A^+ \rightarrow A^0$, $A^+ \rightarrow A^-$ и $A^0 \rightarrow A^-$ позволяют сформулировать вывод, что постоянная a , входящая в адиабатический критерий Мессе, существенно зависит от типа процесса и слабо зависит от природы пары сталкивающихся частиц.

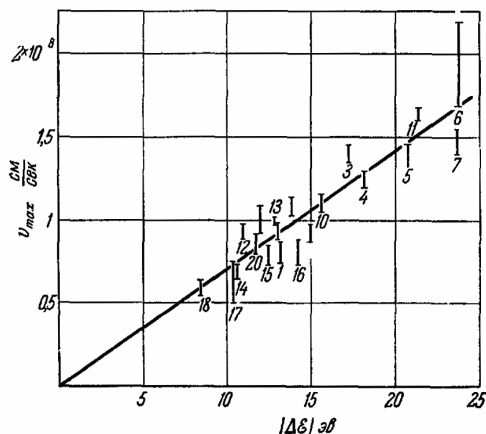


Рис. 12.

Процессы: 1 – $H^0 \rightarrow H^-$ в Kr; 2 – $H^0 \rightarrow H^-$ в Ar; 3 – $H^0 \rightarrow H^-$ в H_2 ; 4 – $H^0 \rightarrow H^-$ в O_2 ; 5 – $H^0 \rightarrow H^-$ в Ne; 6 – $H^0 \rightarrow H^-$ в He; 7 – $H^0 \rightarrow H^-$ в N_2 ; 8 – $He^0 \rightarrow He^-$ в Xe; 9 – $He^0 \rightarrow He^-$ в Kr; 10 – $He^0 \rightarrow He^-$ в Ar; 11 – $He^0 \rightarrow He^-$ в Ne; 12 – $C^0 \rightarrow C^-$ в Xe; 13 – $C^0 \rightarrow C^-$ в Kr; 14 – $O^0 \rightarrow O^-$ в Kr; 15 – $O^0 \rightarrow O^-$ в Kr; 16 – $O^0 \rightarrow O^-$ в Ar; 17 – $F^0 \rightarrow F^-$ в Kr; 18 – $F^0 \rightarrow F^-$ в Xe; 19 – $B^0 \rightarrow B^-$ в Kr; 20 – $B^0 \rightarrow B^-$ в Xe.

При интерпретации формы кривых $\sigma_{0-1}(v)$ для процессов $He^0 \rightarrow He^-$ следует учесть наличие в пучке атомов He примеси метастабильных атомов в состояниях $2s^1S$ и $2s^3S$. Наличие такой примеси приводит к тому, что наряду с процессом захвата электрона атомом в основном состоянии будет идти процесс



т. е. процесс захвата электрона возбужденным атомом. Дефект резонанса этого процесса вычисляется по формуле

$$\Delta E_2 = (S_A + E_A) - V_B^1, \quad (24)$$

где E_A – энергия возбуждения атома А.

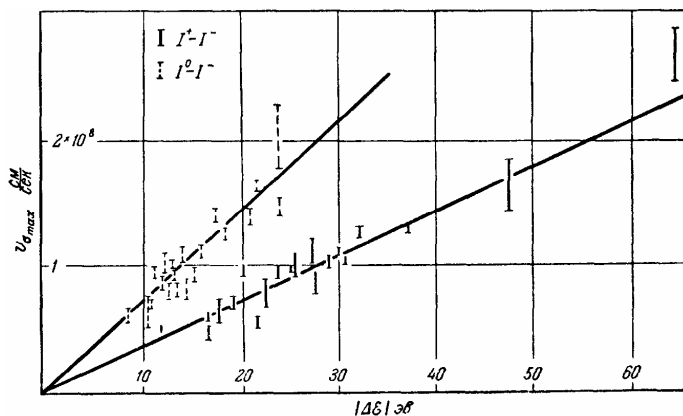


Рис. 13.

Из сопоставления формул (24) и (22) следует, что для всех $E_A < 2|\Delta E_0|$ имеет место неравенство

$$|\Delta E_0| > |\Delta E_2| \quad (25)$$

Из неравенства (25) вытекает, что при одинаковом значении постоянной a для процессов (XII) и (X) максимумы на кривой $\sigma_{0-1}(v)$, обусловленные процессами (XII), располагаются при меньшей скорости, чем максимумы для процесса (X).

При рассмотрении кривых $\sigma_{0-1}(v)$ для процессов $\text{He}^0 \rightarrow \text{He}^-$ в Ne, Ag, Kг и Хе (см. рис. 8) мы будем исходить из предположения, что наблюдающиеся на них максимумы обусловлены захватом электрона возбужденными атомами Не в метастабильных состояниях $2s^1S$ и $2s^3S^*$. Значения a для этих процессов при указанном выше предположении близки к $3 \text{ \AA}$, как это видно из рис. 12. Таким образом, предположение о наличии в пучке атомов Не метастабильных атомов подтверждается как ранее описанными опытами, установившими зависимость сечения σ_{0-1} от толщины парортутной мишени, так и существованием дополнительных максимумов

* Ввиду небольшого различия в энергиях термов $2s^1S$ и $2s^3S$ обусловленные ими максимумы не разделяются

на кривых $\sigma_{0-1}(v)$ для процессов $\text{He}^0 \rightarrow \text{He}^-$ в Ne, Ar, Kr и Xe. Дальнейший рост кривой $\sigma_{0-1}(v)$ после прохождения максимума для процессов $\text{He}^0 \rightarrow \text{He}^-$ объясняется наличием в области больших скоростей максимумов, связанных процессами (X) и (XI). Дальнейший рост кривой $\sigma_{0-1}(v)$ для процессов $\text{B}^0 \rightarrow \text{B}^-$ в Kr и Xe (см. рис. 9) после прохождения плато объясняется наличием в области больших скоростей максимумов, связанных с процессами (XI).

Сформулируем основные выводы, вытекающие из анализа кривых $\sigma_{1-1}(v)$ и $\sigma_{0-1}(v)$ с помощью адиабатического критерия Месси.

1. Для определения положения максимумов на кривых $\sigma_{1-1}(v)$ и $\sigma_{0-1}(v)$ можно применять адиабатический критерий Месси.
2. Постоянная a , входящая в этот критерий, для большого числа пар сталкивающихся частиц в среднем равна $1,5 \text{ \AA}$ и $3 \text{ \AA}$ для процессов $\text{A}^+ \rightarrow \text{A}^-$ и $\text{A}^0 \rightarrow \text{A}^-$, т. е. существенно зависит от типа процесса, но слабо зависит от природы пары сталкивающихся частиц.
3. Постоянная a примерно одинакова для процессов, в которых участвуют частицы в основном состоянии и для процессов с участием возбужденных частиц.
4. Форма кривых $\sigma_{1-1}(v)$ и $\sigma_{0-1}(v)$, имеющих сложную структуру, может быть полностью объяснена участием в процессах $\text{A}^+ \rightarrow \text{A}^-$ и $\text{A}^0 \rightarrow \text{A}^-$ не только частиц в основных состояниях, но также и возбужденных частиц.

в) Ход кривой $\sigma(v)$ в области малых скоростей

Процесс $\text{A}^+ \rightarrow \text{A}^-$

В предыдущей главе было установлено, что положение максимума на кривой $\sigma(v)$ для процессов $\text{A}^+ \rightarrow \text{A}^-$ и $\text{A}^0 \rightarrow \text{A}^-$ определяется адиабатическим критерием Месси. Вторым, и, пожалуй, более важным, требованием адиабатической гипотезы является определенный закон изменения сечения в зависимости от скорости в области малых скоростей $\frac{\alpha |\Delta E|}{\hbar v} \gg 1$, выражающийся формулой (1), которую можно записать в другом виде:

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - \frac{ka|\Delta E|}{h} \frac{1}{v}. \quad (26)$$

Таким образом, если для данного процесса в области малых скоростей имеет место линейная зависимость между величинами $\ln \sigma$ и $\frac{1}{v}$, то к этому процессу применима адиабатическая гипотеза. По тангенсу угла наклона графика этой линейной зависимости может быть определено произведение постоянных k и a . Если для этого же процесса по положению максимума независимо определена постоянная a , то может быть вычислена постоянная k , входящая в формулу (1).

При рассмотрении вопроса о ходе кривой $\sigma_{1-1}(v)$ в области малых скоростей прежде всего следует иметь в виду, что ход кривой в этой области может быть искажен благодаря присутствию в первичном ионном пучке возбужденных ионов. Это искажение будет иметь место в том случае, когда дополнительные максимумы, связанные с двухэлектронной перезарядкой возбужденных ионов, могут попасть в адиабатическую область. По этой причине для выяснения закона изменения $\sigma_{1-1} - f(v)$ в области малых скоростей не могут быть использованы кривые $\sigma_{1-1}(v)$ для процесса $K^+ \rightarrow K^-$ (см. выше), а также кривые $\sigma_{1-1}(v)$ для процессов $Na^+ \rightarrow Na^-$ и $Li^+ \rightarrow Li^-$, полученные с пучком от высокочастотного источника (см. рис. 6 и 11).

Искажение хода кривой $\sigma_{1-1}(v)$ в адиабатической области может иметь место также в том случае, когда в процессе двухэлектронной перезарядки возникают возбужденные медленные ионы. Такое искажение наиболее вероятно тогда, когда дополнительные максимумы, связанные с этими процессами, расположены близко от основного максимума, а исследуемая область скоростей расположена недостаточно далеко от основного максимума.

На основании всего вышесказанного можно сделать вывод, что наилучшей кривой для выяснения вопроса о законе изменения сечения σ_{1-1} в области малых скоростей является кривая $\sigma_{1-1}(v)$ для процесса $Na^+ \rightarrow Na^-$ в H_2 , с пучком Na^+ , полученным от термоионного источни-

ка. Этот вывод основан на том, что для данной пары, с одной стороны, исключено искажение адиабатической области, так как в данном случае в процессе двухэлектронной перезарядки не могут участвовать возбужденные частицы, и, с другой стороны, точки кривой $\sigma_{1-1}(v)$ для этой пары соответствуют наибольшим значениям параметра $\frac{a|\Delta E|}{hv}$.

График зависимости $\ln \sigma = f\left(\frac{1}{v}\right)$ для процесса $\text{Na}^+ \rightarrow \text{Na}^-$ в H_2

приведен на рис. 14. Как видно из этого графика, ряд точек хорошо ложится на прямую линию. Однако точки, соответствующие наименьшим скоростям, начиная со скорости $4,1 \cdot 10^7$ см/сек, отклоняются от прямой линии тем сильнее, чем меньше скорость иона. Отклонение точек при малых скоростях от линейной зависимости между $\ln \sigma$ и $\frac{1}{v}$ не является случайным,

так как график $\ln \sigma = f\left(\frac{1}{v}\right)$ для процессов $\text{Na}^+ \rightarrow \text{Na}^-$ в Ar, Kr и Xe имеет совершенно такой же вид, как и для процесса $\text{Na}^+ \rightarrow \text{Na}^-$ в H_2 .

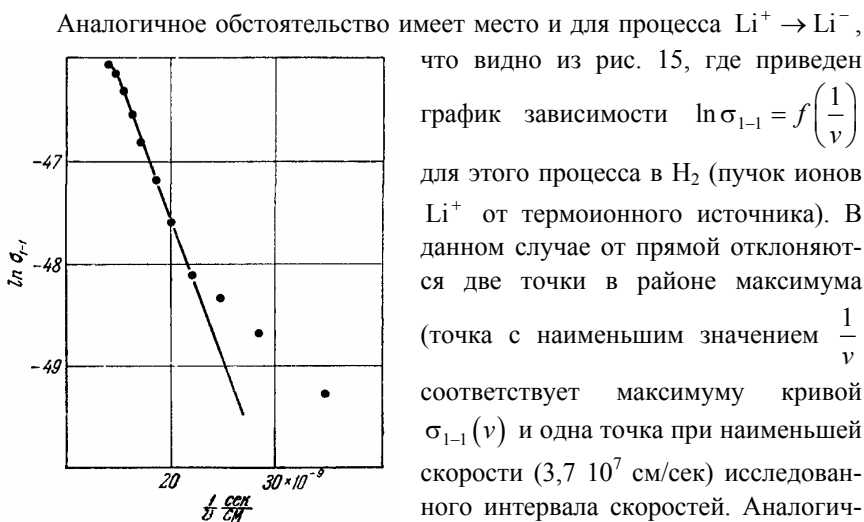


Рис. 14.

Процесса $\text{Na}^+ \rightarrow \text{Na}^-$ в H_2 .

Нарушение адиабатического закона уменьшения сечения с уменьшением скорости в области малых скоростей, где этот закон должен выполняться более строго, имеет место и для процессов $A^0 \rightarrow A^-$ (см. ниже) и $A^+ \rightarrow A^0$ [17]. В работах, посвященных возбуждению и ионизации атомов ионным ударом, также описано резкое уменьшение скорости спада сечения в области малых скоростей [50, 51]. По-видимому, нарушение адиабатического закона (1) в области малых скоростей вызывается некоторой, общей для всех этих процессов причиной, к выяснению которой мы вернемся ниже, после рассмотрения графиков $\ln \sigma = f\left(\frac{1}{v}\right)$ для процесса $A^0 \rightarrow A^-$.

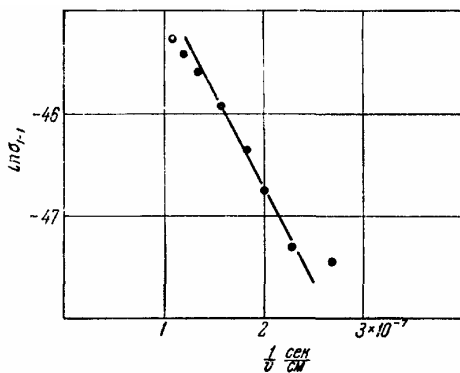


Рис. 15.

Процесс $\text{Li}^+ \rightarrow \text{Li}^-$ в H_2 .

Следует обратить внимание еще на одну особенность кривых $\sigma_{i-1}(v)$ в области $v < v_{\text{max}}$. Оказывается, что ход этой кривой удовлетворяет формуле (1) для точек, совсем близких к максимуму (см. рис. 15), т. е. для скоростей, для которых условие $\frac{a|\Delta E|}{h\nu} \gg 1$ не выполняется.

Представляет интерес выяснить, каким образом природа партнеров пары сталкивающихся частиц влияет на скорость спада сечения в области выполнения формулы (1), определяемую постоянной k в этой формуле. В таблице V приведены значения произведения ka для процессов $\text{Na}^+ \rightarrow \text{Na}^-$ и $\text{Li}^+ \rightarrow \text{Li}^-$ в H_2 , Ar, Kr и Xe, вычисленные по тангенсу угла

наклона линейной части графика зависимости $\ln \sigma_{1-1} = f\left(\frac{1}{v}\right)$. Для тех пар ион – молекула, для которых на кривой $\sigma_{1-1}(v)$ достигнут максимум, приведены также значения постоянных a и k отдельно.

Таблица V

Пара ион – молекула	a в Å	ha в Å	k
$\text{Li}^+ - \text{H}_2$	0,9	1,8	2,0
$\text{Li}^+ - \text{Ar}$		2,2	
$\text{Li}^+ - \text{Kr}$	1,4	3,1	2,2
$\text{Li}^+ - \text{Xe}$	1,7	4,0	2,4
$\text{Na}^+ - \text{H}_2$		2,6	
$\text{Na}^+ - \text{Ar}$		2,3	
$\text{Na}^+ - \text{Kr}$		3,1	
$\text{Na}^+ - \text{Xe}$		3,8	

Из данных таблицы V можно сделать следующие выводы относительно двухэлектронной перезарядки в инертных газах: 1) произведение ka слабо зависит от рода иона щелочного металла и 2) ka растет с ростом атомного номера частицы газа мишени. Поскольку постоянная a слабо зависит от природы частиц пары, то величина k также растет с увеличением атомного номера частицы газа мишени. В этом отношении двухэлектронная перезарядка отличается от одноэлектронной, для которой постоянная k слабо зависит от рода пары ион – атом [17].



Для выяснения закона изменения сечения σ_{0-1} в зависимости от скорости атома в области малых скоростей наиболее пригодны кривые $\sigma_{0-1}(v)$ для процессов $B^0 \rightarrow B^-$, $C^0 \rightarrow C^-$, $O^0 \rightarrow O^-$, $F^0 \rightarrow F^-$, в He и Ne. Это утверждение оправдывается тем, что пучки атомов B, C, O и F не содержат заметного количества метастабильных возбужденных атомов, и следовательно, исключается возможность искажения хода кривой $\sigma_{0-1}(v)$

в интересующей нас области скоростей благодаря процессу захвата электрона возбужденными атомами. С другой стороны, дополнительные максимумы, связанные с образованием медленных возбужденных ионов, лежат очень далеко от основного максимума, что, как упоминалось выше, исключает возможность искажения кривой в области малых скоростей. К сказанному следует добавить, что значения адиабатического параметра $\frac{a|\Delta\epsilon|}{h\nu}$ для процессов захвата электрона атомами имеют в газах He и Ne наибольшие значения.

Построение графиков зависимости $\ln \sigma_{0-1} = f\left(\frac{1}{v}\right)$ показало, что для всех вышеуказанных процессов имеет место линейная зависимость между величинами $\ln \sigma_{0-1}$ и $\frac{1}{v}$. Насколько хорошо точки ложатся на прямую линию, видно из рис. 16, где приведен соответствующий график для пары O – Ne. Только в одном случае для пары B – Ne наблюдалось отклонение от линейной зависимости для наименьшей скорости исследованного интервала скоростей (рис. 17).

Значения ka , определенные по тангенсу угла наклона графиков $\ln \sigma_{0-1} = f\left(\frac{1}{v}\right)$ приведены в таблице VI.

Таблица VI

Значения ka в Å				
Газ \ Процесс	$B^0 \rightarrow B^-$	$C^0 \rightarrow C^-$	$O^0 \rightarrow O^-$	$F^0 \rightarrow F^-$
He	5,1	5,5	4,2	3,8
Ne	6,5	7,0	6,6	4,8

Как видно из этой таблицы, значения ka растут с увеличением атомного номера частицы газа мишени. Влияние рода быстрого атома сказывается у более тяжелых атомов O и F. С увеличением атомного номера быстрого атома величина ka уменьшается. Значения ka для процесса $A^0 \rightarrow A^-$ больше, чем для процесса $A^+ \rightarrow A^-$, по-видимому, за счет того, что постоянная a для первого процесса больше, чем для второго. Если учесть,

что значение a для процесса $A^0 \rightarrow A^-$ среднем равно $3\text{\AA}$ то постоянные k для процессов $A^0 \rightarrow A^-$ и $A^+ \rightarrow A^-$ мало отличаются друг от друга.

Таким образом, весь экспериментальный материал, пригодный для суждения по данному вопросу, показывает, что адиабатическая гипотеза применима к процессам $A^+ \rightarrow A^-$ и $A^0 \rightarrow A^-$. Остается только неясным вопрос о причинах отклонения от экспоненциального спада сечений σ_{1-1} и σ_{0-1} при самых малых скоростях частиц, исследованных в настоящей работе. По этому поводу могут быть высказаны три предположения: 1) имеет место сближение потенциальных кривых начального и конечного состояний системы сталкивающихся частиц, 2) постоянная a зависит от скорости частиц и 3) относительная скорость частиц, при которой происходит данный процесс, не равна их относительной скорости перед столкновением*.

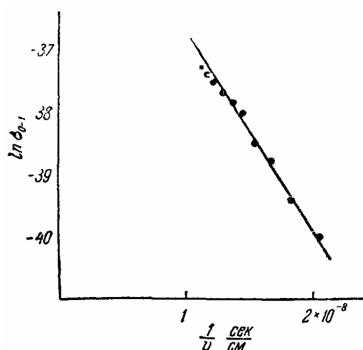


Рис. 16.

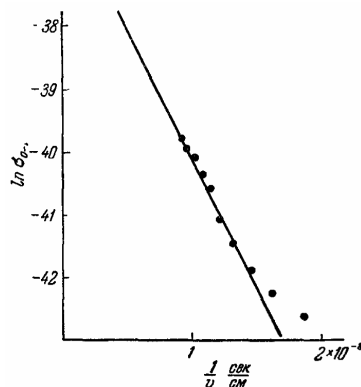
Процесс $O^0 \rightarrow O^-$ в Ne

Рис. 17.

Процесс $B^0 \rightarrow B^-$ в Ne

Первое предположение может быть сразу же отброшено, так как ему противоречит малая величина сечений в области нарушения формулы (1). Кроме того, с точки зрения этого предположения непонятно, почему в области больших скоростей формула (1) выполняется.

* Последнее предположение было высказано В. М. Дукельским во время дискуссии на конференции по электронным и атомным столкновениям (Рига, июнь 1959 г.).

Отклонение точек от прямолинейной части графика $\ln \sigma = f\left(\frac{1}{v}\right)$ таково, что с помощью второго предположения оно объясняется уменьшением величины a с уменьшением скорости. Так, например, легко подсчитать, что отклонение от прямой последней точки на графике $\ln \sigma_{1-1} = f\left(\frac{1}{v}\right)$ для процесса $\text{Na}^+ \rightarrow \text{Na}^-$ в H_2 соответствует уменьшению a на 10%. Однако уменьшение a с уменьшением скорости представляется маловероятным. Скорее можно было бы ожидать, что a будет уменьшаться с увеличением скорости.

Для того чтобы объяснить нарушение формулы (1) на основе третьего допущения, необходимо предположить, что $v_{\text{ист}} > v$, где $v_{\text{ист}}$ – истинная скорость, при которой происходит рассматриваемый процесс и v – скорость перед соударением. Увеличение скорости $\Delta v = v_{\text{ист}} - v$ вызывается действием сил взаимодействия между сталкивающимися частицами. Это увеличение скорости может быть вызвано силами, приводящими к осуществлению данного процесса, но может быть обусловлено действием других сил.

Из элементарных подсчетов вытекает формула

$$\frac{\Delta p_{\parallel}}{p_{\parallel}} = \frac{v \left| \Delta \frac{1}{v} \right|}{1 - v \left| \Delta \frac{1}{v} \right|} \quad (27)$$

позволяющая вычислить относительное изменение составляющей импульса, параллельной траектории частицы, по значениям экспериментально определяемых величин v и $\left| \Delta \frac{1}{v} \right|$. Так, например, для трех отклоняющихся

точек на рис. 15 (скорости $4,1 \cdot 10^7$; $3,5 \cdot 10^7$ и $2,9 \cdot 10^7$ см/сек) величина $\frac{\Delta p_{\parallel}}{p_{\parallel}}$ принимает значения 0,08; 0,18 и 0,28. Анализ экспериментальных результатов показывает, что величина $\frac{\Delta p_{\parallel}}{p_{\parallel}}$ зависит от природы ударяющей и ударяемой частиц.

Следует подчеркнуть большую важность строгого доказательства справедливости третьего предположения, так как в случае его верности по отклонению точек от прямолинейной части графика $\ln \sigma = f\left(\frac{1}{v}\right)$ можно будет вычислять неподдающуюся непосредственному измерению величину $\frac{\Delta p_{\parallel}}{p_{\parallel}}$ *. Однако пока не видно другого способа этого доказательства,

кроме прямого вычисления величины $\frac{\Delta p_{\parallel}}{p_{\parallel}}$ и сравнения вычисленного

значения со значением, вытекающим из формулы (27). Экспериментальный материал, необходимый для таких сопоставлений, еще крайне недостаточен, поэтому очень важной задачей физики атомных столкновений является дальнейшее изучение функций $\sigma(v)$ для различных процессов в области малых скоростей.

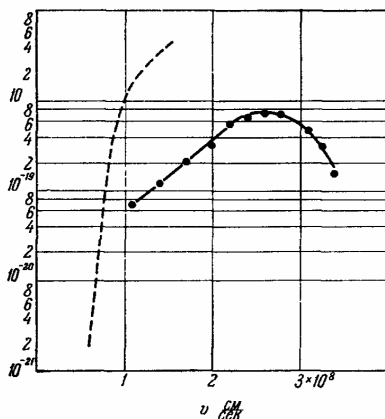


Рис. 18.

Процесс $H^+ \rightarrow H^-$ в He; — экспериментальная кривая $\sigma_{1-1}(v)$;
 — — — кривая, построенная по данным теоретического расчета
 (по оси ординат отложено сечение $\sigma_{1-1} \text{ см}^2$).

* Опыты по рассеянию могут дать только $\frac{\Delta p_{\perp}}{p_{\perp}}$, т. е. относительное изменение составляющей импульса, перпендикулярной траектории частицы.

Эта область также интересна и тем, что для сталкивающихся частиц с небольшим числом электронов возможен квантовомеханический расчет сечения процесса с использованием метода возмущенных стационарных состояний [52]. В случае интересующих нас процессов $A^+ \rightarrow A^-$ и $A^0 \rightarrow A^-$ такой расчет пока был проделан только для процесса $H^+ \rightarrow H^-$ в He [54]. Сопоставление данных теоретического расчета и экспериментальных данных приведено на рис. 18. Как видно из этого рисунка, имеет место значительное расхождение экспериментальных и теоретических данных.

Указанное расхождение, по-видимому, нужно объяснить неточностью теоретического расчета, связанной с представлением относительного движения сталкивающихся частиц в виде плоских волн, что незаконно в области медленных столкновений, к которым только и приложим метод возмущенных стационарных состояний. Представляет значительный интерес в дальнейшем произвести новые, более точные расчеты для процессов $H^+ \rightarrow H^-$ и $H^0 \rightarrow H^-$ в He и H_2 , а с другой стороны, измерить эффективные сечения указанных процессов при скоростях, меньших, чем это сделано до сих пор.

г) Ход кривой $\sigma(v)$ в области скоростей $v > v_{\max}$

Подавляющее большинство полученных кривых $\sigma(v)$ расположено в области скоростей $v \leq v_{\max}$. В области $v > v_{\max}$ расположены часть кривых $\sigma_{1-1}(v)$ для процессов $H^+ \rightarrow H^-$ в He и H_2 и $Li^+ \rightarrow Li^-$ в H_2 и процессов $H^0 \rightarrow H^-$ в пяти благородных газах. Кривые $\sigma_{1-1}(v)$ относятся к случаям, когда в процессе двухэлектронной перезарядки не участвуют частицы в возбужденных состояниях, т.е. мы имеем дело с «чистой» кривой $\sigma(v)$. Что касается процессов $H^0 \rightarrow H^-$ в благородных газах, то ветвь кривой $\sigma_{0-1}(v)$, расположенная в области $v > v_{\max}$ может быть искажена за счет процессов $H^0 \rightarrow H^-$, протекающих с образованием медленного возбужденного иона.

Возможность такого искажения зависит от того, насколько близко к основному максимуму расположен дополнительный максимум, связанный

с процессом захвата электрона, сопровождающимся образованием медленного иона в наинизшем возбужденном состоянии. Расчет показывает, что для процессов $H^0 \rightarrow H^-$ в He и Ne дополнительные максимумы расположены очень далеко от основных, вследствие чего ход кривой $\sigma_{0-1}(v)$ в области скоростей $v \geq v_{\max}$ для этих процессов не искажен. В случае Ag, Kг и Хе указанное искажение вполне возможно, однако благодаря значительно меньшей вероятности процесса $H^0 + B \rightarrow H^- + B^+ *$ по сравнению с процессом $H^0 + B \rightarrow H^- + B^+$, заметного влияния на форму кривой $\sigma_{0-1}(v)$ не оказывает (см. выше).

Представляется интересным выяснить, как влияет на ход кривых $\sigma(v)$ в области $v > v_{\max}$ тип процесса и род участвующих в процессе частиц. С

этой целью построены графики зависимости $\frac{\sigma}{\sigma_{\max}} = f\left(\frac{v}{v_{\max}}\right)$ (рис. 19) для

процессов $H^+ \rightarrow H^-$ в He и H_2 , $Li^+ \rightarrow Li^-$ в H_2 , $H^0 \rightarrow H^-$ в He и $H^+ \rightarrow H$ в He*. Следует отметить, что для процесса $H^+ \rightarrow H$ в He дополнительные максимумы, связанные с образованием в этом процессе возбужденных частиц, далеко отстоят от основного максимума, так что и для этого процесса можно считать, что ход кривой $\sigma_{10}(v)$ в рассматриваемой области скоростей является неискаженным.

Рассмотрение рис. 19 приводит к следующим выводам:

1) Уменьшение сечения с увеличением скорости в области $v > v_{\max}$ для процессов двухэлектронной перезарядки происходит гораздо быстрее, чем для процессов одноэлектронной перезарядки.

2) Ход кривой $\frac{\sigma}{\sigma_{\max}} = f\left(\frac{v}{v_{\max}}\right)$ в области $v > v_{\max}$ для двухэлектронной

перезарядки не зависит ни от рода иона, ни от рода газа.

3) Ход всех кривых в области $v < v_{\max}$ примерно одинаков.

Последний из этих выводов приводит к некоторому заключению относительно постоянных k и σ_0 , входящих в формулу (1). Отношение

* Данные для процесса $H^+ \rightarrow H$ в He взяты из работы [14].

$\frac{\sigma}{\sigma_{\max}}$ на основании формул (1) и (2) можно выразить как функцию $\frac{v}{v_{\max}}$ в виде:

$$\frac{\sigma}{\sigma_{\max}} = \frac{\sigma_0}{\sigma_{\max}} e^{-\frac{k}{v/v_{\max}}} \quad (28)$$

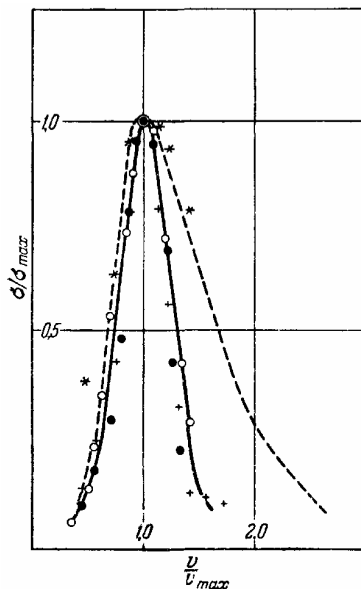


Рис. 19.

Процессы: $\text{H}^+ \rightarrow \text{H}$ в He; * – $\text{H}^0 \rightarrow \text{H}^-$ в He; ● – $\text{H}^+ \rightarrow \text{H}^-$ в H_2 ;
+ – $\text{H}^+ \rightarrow \text{H}^-$ в He, ○ – $\text{Li}^+ \rightarrow \text{Li}^-$ в H_2 .

Одинаковость хода кривой $\frac{\sigma}{\sigma_{\max}} = f\left(\frac{v}{v_{\max}}\right)$ в области $v < v_{\max}$ приво-

дит к заключению, что величины k и $\frac{\sigma_0}{\sigma_{\max}}$ примерно одинаковы для всех

представленных на рис. 19 процессов. Физический смысл постоянства этих величин для столь различных процессов пока еще не ясен.

д) ЗАВИСИМОСТЬ СЕЧЕНИЯ В МАКСИМУМЕ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ

Процесс $A^+ \rightarrow A^-$

Одной из важных характеристик кривой $\sigma(v)$ является величина $\sigma_{\max}$, т. е. величина сечения в максимуме. Представляется интересным выяснить, какие факторы влияют на эту величину. Естественно, что $\sigma_{\max}$ прежде всего может зависеть от природы взаимодействующих частиц. Анализ экспериментального материала по процессам $A^+ \rightarrow A^-$ подтверждает это предположение. Величина $\sigma_{1-1 \max}$ зависит как от рода быстрого иона, так и от рода атома мишени. Зависимость $\sigma_{1-1 \max}$ от рода быстрого иона очень сильна, что видно из рис. 20, где приведены кривые $\sigma_{1-1}(v)$ для семи ионов (газ мишени – Хе). Величина $\sigma_{1-1 \max}$ изменяется в очень широких пределах от $5 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2 (\text{Li}^+)$ до $2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2 (\text{O}^+)$.

При образовании в результате процесса $A^+ \rightarrow A^-$ отрицательного иона в основном состоянии захват двух электронов происходит на два уровня, энергия связи которых измеряется первым ионизационным потенциалом и электронным сродством атома А. Можно высказать предположение, что влияние рода иона на величину $\sigma_{1-1 \max}$ связано с величинами энергии связи уровней атома А, на которые захватываются электроны. С точки зрения этого предположения разумно было ожидать, что величина $\sigma_{1-1 \max}$ монотонно увеличивается с увеличением суммы $V_A^I + S_A$ или, так как $V_A^I \gg S_A$, с увеличением V_A^I . На рис. 21 даны графики зависимостей $\sigma_{1-1 \max}$ от величин V_A^I , S_A и $V_A^I + S_A$, показывающие, что монотонная зависимость $\sigma_{1-1 \max}$ от V_A^I или суммы $V_A^I + S_A$ не имеет места. Из этого следует, что энергии связи уровней, на которые захватываются электроны, не определяют полностью значения $\sigma_{1-1 \max}$, хотя, несомненно, оказывают существенное влияние на эту величину. Это видно хотя бы из того, что наиболее резкое нарушение монотонности кривых $\sigma_{1-1 \max} = f(V_A^I)$ и $\sigma_{1-1 \max} = f(V_A^I + S_A)$ дает ион H^+ . Это, по-видимому, связано с тем, что атом Н имеет примерно такое же значение первого ионизационного потенциала, как и атомы О и Cl, но значительно меньшее значение электронного

сродства, чем эти атомы, что и приводит к уменьшению значения $\sigma_{1-1 \max}$ для процесса $H^+ \rightarrow H^-$ по сравнению с процессами $O^0 \rightarrow O^-$ и $Cl^+ \rightarrow Cl^-$. С другой стороны, из сопоставления величин $\sigma_{1-1 \max}$ для процессов $H^+ \rightarrow H^-$, $B^+ \rightarrow B^-$ и $Li^+ \rightarrow Li^-$ видно, что одни энергетические параметры недостаточны для определения величины $\sigma_{1-1 \max}$. Действительно, величина электронного сродства для атомов H, B и Li примерно одинакова, а величины ионизационных потенциалов равны 13, 54, 8, 28 и 5,37 эв соответственно.

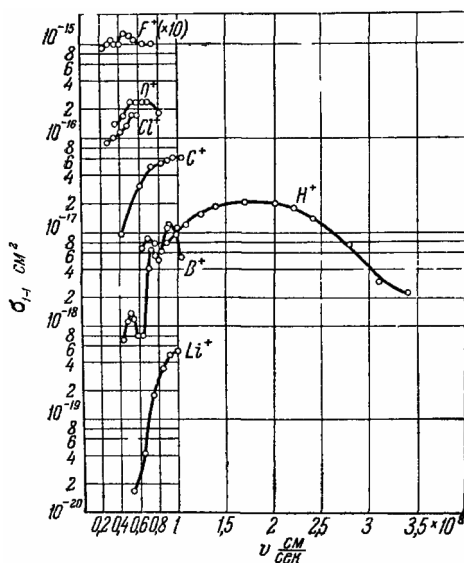


Рис. 20.

Кривые $\sigma_{1-1}(v)$ для процессов $A^+ \rightarrow A^-$ в Хе.

Однако уменьшение ионизационного потенциала при переходе от атома H к атому B не приводит к уменьшению $\sigma_{1-1 \max}$, а при переходе к атому Li уменьшение ионизационного потенциала приводит к значительному уменьшению $\sigma_{1-1 \max}$. Возможно, что в данном случае сказывается различие в электронных конфигурациях исходного и конечного состояния частицы, захватывающей два электрона.

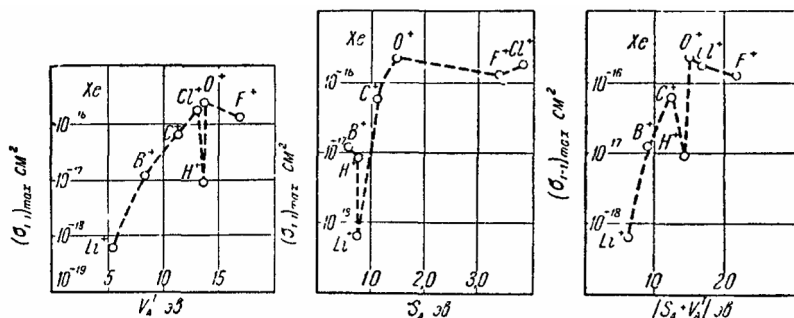


Рис. 21.

Зависимость $(\sigma_{1-1})_{\max}$ от $V_A^{1/2}$, S_A и $S_A + V_A^{1/2}$

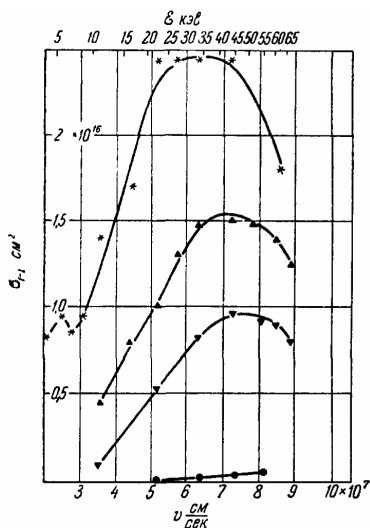


Рис. 22.

Процесс $O^+ \rightarrow O^-$; * - Xe;

▲ - Kr; ▼ - Ar; ○ - Ne

и структура электронной оболочки быстрого иона.

Более определенное заключение может быть сделано относительно влияния на величину $\sigma_{1-1 \max}$ рода атома мишени. Типичное изменение кривых $\sigma_{1-1}(v)$ при переходе от одного атома мишени к другому иллюст-

В процессах $H^+ \rightarrow H^-$ и $Li^+ \rightarrow Li^-$ заполняются оболочки $1s$ и $2s$, в то время как в процессе $B^+ \rightarrow B^-$ начинает заполняться оболочка $2p$. По-видимому, имеет определенное значение электронная конфигурация быстрого иона. В том случае, когда электронная оболочка иона замкнута, величина $\sigma_{1-1 \max}$ очень мала (ионы Li^+ , Na^+ , K^+ , B^+). Однако для иона H^+ , представляющего собой голое ядро, получается сравнительно небольшое значение $\sigma_{1-1 \max}$.

Таким образом, имеющийся экспериментальный материал позволяет сделать вывод о том, что на величину $\sigma_{1-1 \max}$ влияет как энергия связи уровней, на которые захватываются электроны, так

рируется рис. 22, на котором представлены эти кривые для процесса $O^+ \rightarrow O^-$ в Ne, Ar, Kr и Xe. Видно, что влияние рода атома мишени скажется на кривой $\sigma_{1-1}(\nu)$ двояким образом: 1) с увеличением атомного номера газа мишени максимум смещается в сторону меньших скоростей, что и следовало ожидать, поскольку положение максимума на кривой $\sigma_{1-1}(\nu)$ определяется адиабатическим критерием Месси, 2) величина сечения в максимуме растет с увеличением атомного номера газа мишени. Зависимость $\sigma_{1-1 \max}$ от рода атома мишени целесообразно связать с энергией связи электронов, отрываемых от атома газа, т.е. с суммой $V_B^I + V_B^{II}$ — первого и второго ионизационного потенциала этого атома. Зависимость $\sigma_{1-1 \max}$ от $V_B^I + V_B^{II}$ приведена на рис. 23. Рассмотрение этого рисунка приводит к выводу, что величина $\sigma_{1-1 \max}$ монотонно уменьшается с увеличением энергии связи электронов, отрываемых от атома мишени.

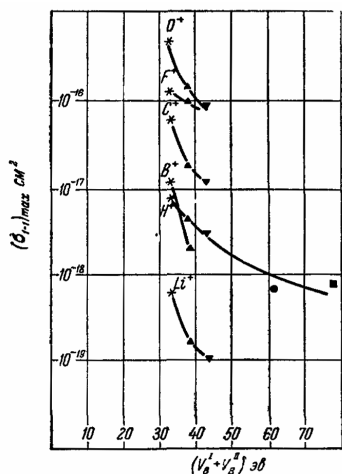


Рис. 23.

* — Xe; ▲ — Kr; ▼ — Ar; ● — Ne; ■ — He

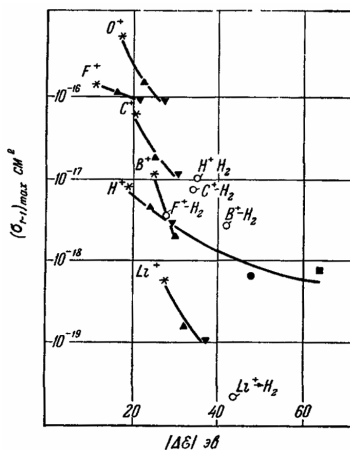


Рис. 24.

* — Xe; ▲ — Kr; ▼ — Ar; ● — Ne; ■ — He; ○ — H₂

В работе [54] показано, что существует определенная зависимость максимального значения сечения процесса $A^+ \rightarrow A$ (одноэлектронная перезарядка) от дефекта резонанса. Как видно из рис. 24, где представлена

зависимость $\sigma_{1-1 \max}$ от $|\Delta E|$, дефект резонанса не является универсальным параметром, определяющим значение $\sigma_{1-1 \max}$, поскольку точки $\sigma_{1-1 \max} = f(|\Delta E|)$ для разных ионов ложатся на разные кривые, что отражает зависимость $\sigma_{1-1 \max}$ от рода быстрого иона. Для всех ионов наблюдается монотонное уменьшение $\sigma_{1-1 \max}$ с увеличением абсолютного значения дефекта резонанса. Точки для молекулярных газов выпадают из этой монотонной зависимости.

Процесс $A^0 \rightarrow A^-$

Величина $\sigma_{0-1 \max}$ также сильно зависит от рода быстрой частицы, что видно из рис. 25, где представлены кривые $\sigma_{0-1}(\nu)$ для шести атомов в Хе. В данном случае влияние энергии связи уровня, на который происходит захват электрона, может быть охарактеризовано величиной S_A . Зависимость $\sigma_{0-1 \max}$ от S_A для Кг и Хе приведена на рис. 26. В последовательности быстрых атомов от Не до О наблюдается монотонный рост $\sigma_{0-1 \max}$ с увеличением S_A , однако дальнейшее увеличение S_A при переходе от О к F уже не приводит к заметному увеличению $\sigma_{0-1 \max}$. Аналогичное поведение обнаруживается и у величины $\sigma_{1-1 \max}$ (см. рис. 21).

Влияние рода атома мишени на кривую $\sigma_{0-1}(\nu)$ такое же, как и в случае двухэлектронной перезарядки, что видно из рис. 27, где приведены эти кривые для процесса $O^0 \rightarrow O^-$ в пяти благородных газах. Так же, как и в случае процесса $A^+ \rightarrow A^-$ имеет место уменьшение $\sigma_{0-1 \max}$ с увеличением энергии связи электрона, отрываемого от атома мишени, что видно из рис. 28, где приведена зависимость $\sigma_{0-1 \max} = f(V_B^I)$. Немонотонность зависимости $\sigma_{0-1 \max}$ от V_B^I для атомов Не связана с наличием в первичном пучке метастабильных атомов Не. И в случае процесса $A^0 \rightarrow A^-$ дефект резонанса не является универсальным параметром, определяющим значение $\sigma_{0-1 \max}$, в чем можно убедиться, построив зависимость $\sigma_{0-1 \max} = f(|\Delta E|)$.

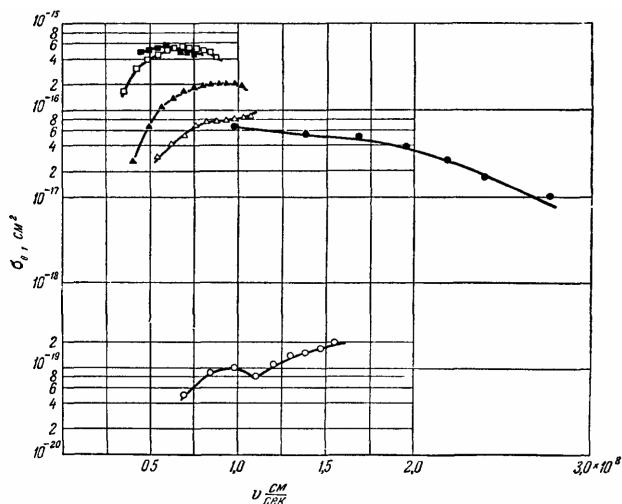


Рис. 25.

Кривые $\sigma_{1-1}(v)$ для процессов $A^0 \rightarrow A^-$ в Xe;

○ — He; ● — H; ▲ — C; □ — O; ■ — F; △ — B

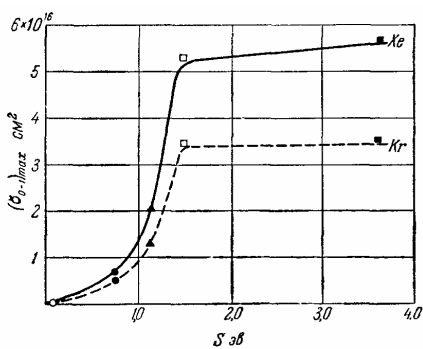


Рис. 26.

○ — He; ● — H; ▲ — C; □ — O; ■ — F;

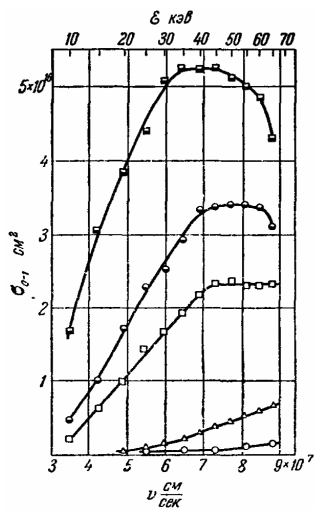


Рис. 27.

Процесс $O^0 \rightarrow O^-$;

○ — He; △ — Ne; □ — Ar; ● — Kr; ■ — Xe

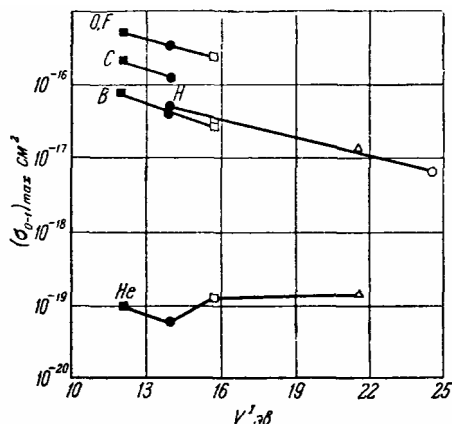
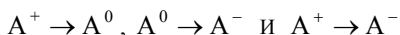


Рис. 28.

■ – Xe; ● – Kr; □ – Ar; Δ – Ne; ○ – He (берется значение V_B^1)

е) СОПОСТАВЛЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ПРОЦЕССОВ



Во всех случаях, когда имеются экспериментальные данные для процессов $A^+ \rightarrow A^0$, $A^0 \rightarrow A^-$, и $A^+ \rightarrow A^-$, позволяющие сопоставить сечения σ_{10} , σ_{0-1} и σ_{1-1} , имеет место неравенство $\sigma_{10} > \sigma_{0-1} > \sigma_{1-1}$. Представление о различии в величинах этих сечений дает рис. 29*, где даны графики $\sigma_{10}(v)$, $\sigma_{0-1}(v)$ и $\sigma_{1-1}(v)$ для пар C – Xe, H – He и H – Ar. Видно, что сечение σ_{10} больше сечения σ_{1-1} примерно на два порядка, в то время как сечение σ_{0-1} больше сечения σ_{1-1} в несколько раз. Различия в значениях величин сечений σ_{10} , σ_{0-1} и σ_{1-1} связаны, с одной стороны, с разным количеством захватываемых электронов, а с другой стороны – с различной величиной энергии связи уровней, на которые захватываются электроны. Очень большое различие в сечениях σ_{10} и σ_{1-1} отражает различие в вероятностях одно- и двухэлектронных процессов.

* Величины сечений σ_{10} взяты из работ [14, 16].

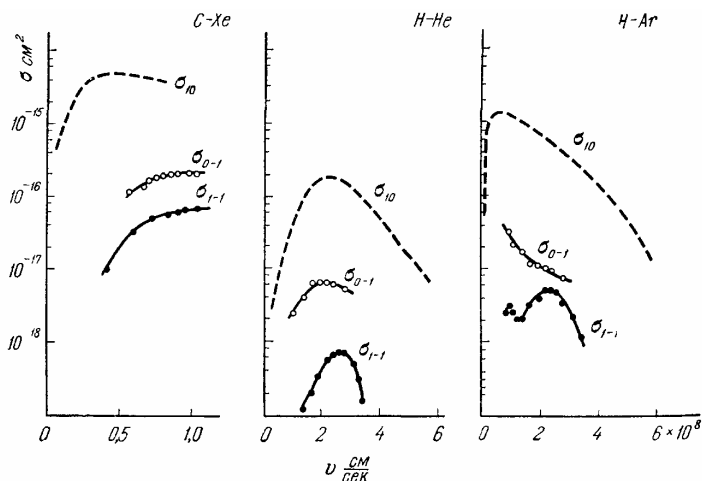


Рис. 29.

Почти такое же большое различие в сечениях σ_{10} и σ_{0-1} связано с тем, что эти сечения дают вероятности захвата электрона на уровни с сильно различающейся энергией связи. Сравнительно небольшое различие в сечениях одноэлектронного процесса $A^0 \rightarrow A^-$ и двухэлектронного процесса $A^+ \rightarrow A^-$ вызвано тем, что в первом случае захват электрона происходит на уровень с малой энергией связи, а во втором случае один из уровней, на которые захватываются электроны, имеет большую энергию связи.

ж) ОБРАЗОВАНИЕ МЕДЛЕННЫХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ПРИ АТОМНЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ

Как указывалось во введении, медленные отрицательные ионы образуются в результате процессов (IIa) и (IIб) при прохождении через газ быстрых отрицательных и положительных ионов.

Эффективные сечения процесса образования медленных отрицательных ионов измеряются методом их собирания на измерительный электрод. Особенности этого метода описаны в работах [23, 55, 56]. Для отделения медленных отрицательных ионов от электронов, образующихся благодаря обдирке быстрых ионов и ионизации частиц газа, измерительный конден-

сатор помещается в магнитное поле с напряженностью поля параллельной пластинам конденсатора.

Первые измерения сечения образования медленных отрицательных ионов при прохождении ионов Na^- , K^- , O^- , Cl^- , OH^- и O_2^- , с энергией 720 эв через кислород были сделаны в работе [57]. Для ионов столь малой энергии можно считать, что сечение перезарядки отрицательных ионов (процесс Па) значительно больше, чем сечение диссоциации молекулы O_2 на положительный и отрицательный ионы, вследствие чего можно считать, что измеренные авторами сечения дают вероятности перезарядки отрицательных ионов в кислороде. Результаты измерений приведены в таблице VII*.

Таблица VII

Ион	Сечение перезарядки в см^2	Дефект резонанса ΔE в эв
Na^-	$5 \cdot 10^{-15}$	-0,65
K^-	$6 \cdot 10^{-15}$	-0,65
O^-	$5 \cdot 10^{-16}$	-1,3
Cl^-	$3 \cdot 10^{-17}$	-3,7
OH^-	$6 \cdot 10^{-16}$	-2,0
O_2^-	$2 \cdot 10^{-15}$	0

Как видно из таблицы VII, сечения перезарядки для некоторых ионов достигают очень больших значений. Не исключена возможность, что энергия иона, для которой было измерено сечение, находится в районе максимума кривой $\sigma_{\text{пер}}(E)$. Наблюдается существенная зависимость величины сечения от дефекта резонанса. Так же как для перезарядки положительных ионов, сечение растет с уменьшением дефекта резонанса.

Авторы сравнили сечения резонансных процессов $\text{O}_2^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2^-$ и $\text{O}_2^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2^+$ при одинаковой энергии ионов. Оказалось, что сече-

* Дефекты резонанса, приведенные в таблице VII, вычислены в предположении о том, что образующийся при перезарядке ион O_2^- не диссоциирует. Численные значения ΔE отличаются от приведенных в статье [57], так как при вычислении значений ΔE , приведенных в таблице VII, были использованы новые значения электронного сродства атомов O [58], Na и K [59] и молекулы O_2 [60].

ние перезарядки иона O_2^+ существенно больше ($5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$), чем соответствующая величина для O_2^- . Таким образом, наблюдающаяся для положительных ионов закономерность, заключающаяся в том, что сечение резонансной перезарядки растет обратно пропорционально ионизационному потенциалу атома, по-видимому, не распространяется на отрицательные ионы. Большее сечение перезарядки иона O_2^+ по сравнению с таковым для иона O_2^- объясняется авторами работы тем, что в случае положительного иона электрон, совершающий переход, находится в дальнедействующем поле положительного иона; переход же избыточного электрона отрицательного иона происходит в ближнедействующем поле нейтрального атома.

В работе [61] были измерены сечения σ_u^- образования медленных отрицательных ионов при прохождении ионов H^- и O^- с энергиями от 10 до 50 кэВ через O_2 и CCl_4 . Поскольку ионы первичного пучка имели довольно значительную энергию, медленные отрицательные ионы могли возникать не только благодаря перезарядке, но и благодаря диссоциации молекулы на положительный и отрицательный ионы. Кривые $\sigma_u^-(v)$ для исследованных пар ион – молекула приведены на рис. 30. Для сопоставления на этом же рисунке приведены кривые $\sigma_u^-(v)$ для образования отрицательных ионов при соударениях электронов с молекулами O_2 и CCl_4 , заимствованные из работы [62], а также нанесена одна точка для пары $O^- - O_2$, по данным работы [57] (см. таблицу VII).

Как видно из рис. 30, величины сечения σ_u^- для пары $H^- - O_2$, меняются в пределах $(1 \div 3) \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$, а для пары $O_1^- - O_2$ эти сечения на порядок больше. В работе [63] были оценены сечения диссоциации молекулы O_2 на положительный и отрицательный ионы ударом протонов с энергией от 10 до 30 кэВ. Эти сечения оказались порядка 10^{-19} см^2 . Поскольку мало вероятно, чтобы сечения диссоциации O_2 ударом ионов H^- были много больше, чем соответствующие сечения для иона H^+ , следует полагать, что сечение σ_u^- для пар $H^- - O_2$ и $O^- - O_2$ представляет сечение перезарядки ионов H^- и O^- в кислороде.

Рост сечения σ_u^- с уменьшением скорости иона указывает на то, что максимумы кривых $\sigma_u^-(v)$ для пар $H^- - O_2$ и $O^- - O_2$ расположены при

малых скоростях. Это и следовало ожидать, исходя из адиабатического критерия, поскольку дефекты резонанса процессов перезарядки ионов H^- и O^- в кислороде малы. Что касается максимумов кривых $\sigma_u^-(v)$ для пар $\text{H}^- - \text{CCl}_4$ и $\text{O}^- - \text{CCl}_4$, то из хода этих кривых видно, что они также расположены в области малых скоростей. Максимум на кривой $\sigma_u^-(v)$ для пары $\text{H}^- - \text{CCl}_4$, при скорости $2,6 \cdot 10^8 \text{ см/сек}$ возможно обусловлен перезарядкой с последующей диссоциацией нестабильного иона CCl_4^- .

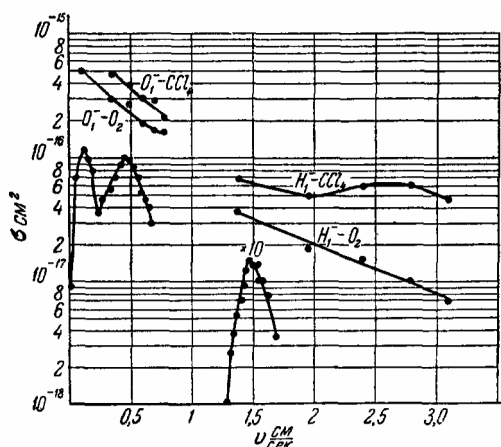


Рис. 30.

Левая и правая нижние кривые даны соответственно для пар $e - \text{CCl}_4$ и $e - \text{O}_2$. На оси абсцисс $V \times 10^8 \text{ см/сек}$

Обращает на себя внимание существенное различие в величинах сечений σ_u^- и форме кривых $\sigma_u^-(v)$ для процессов прилипания свободных электронов к молекуле и процессов перезарядки отрицательных ионов той же молекулой. Это различие не является удивительным, если учесть, что в первом случае отрицательный ион образуется вследствие присоединения к молекуле свободного электрона, в то время как во втором случае возникновение отрицательного иона связано с переходом электрона между дискретными состояниями отрицательного иона и молекулы газа.

Приведенные данные по образованию медленных отрицательных ионов при атомных столкновениях показывают, что дальнейшие исследования желательно вести в области малых скоростей, где расположены максимумы кривых $\sigma_u^-(v)$. Определение положения этих максимумов и хода кривых $\sigma_u^-(v)$ в области $v < v_{\max}$ позволит выяснить вопрос о применимости адиабатической гипотезы к процессам перезарядки отрицательных ионов. Много полезного для понимания процессов перезарядки отрицательных ионов может также дать масс-спектральный анализ медленных отрицательных ионов, образующихся при перезарядке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в настоящей статье результаты экспериментального исследования процессов образования быстрых и медленных отрицательных ионов при атомных столкновениях позволяют сделать вывод о том, что это исследование дало уже значительный вклад в область физики атомных столкновений. Однако следует подчеркнуть, что необходимо дальнейшее, более углубленное, изучение рассмотренных в настоящей статье процессов. В частности, большой интерес для теории атомных столкновений представляет изучение функций $\sigma(v)$ в адиабатической области вплоть до порога процесса. Желательно в дальнейшем исследовать рассеяние и потерю энергии при процессах образования отрицательных ионов. Известный интерес представляет также изучение рассматриваемых процессов в области больших скоростей, где в некоторых случаях возможна их теоретическая трактовка с помощью борновского приближения.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. H. S. W. Massey, Negative Ions, London, 1950.
2. H. Neuert, *Ergebn. exakt. Naturwiss.* 29, 1–60 (1956).
3. F. H. Field and J. L. Franklin, *Electron Impact Phenomena and the Properties of Gaseous Ions*, New York, 1957.
4. Н. С. Бучельникова, УФН 65, 351 (1958).
5. Н. И. Ионов и Э. Я. Зандберг, УФН 67, 581 (1959).
6. E. B. Armstrong and A. Dalgarno, *The Airglow and the Aurorae*. p. 328, London, 1955.
7. L. D. Landau, *Sov. Phys.* 1, 88 (1932).

8. C. Zener, Proc. Roy. Soc. A137, 696 (1932).
9. E. G. G. Stueckelberg, Helv. Phys. Acta 5, 370 (1932).
10. H. S. W. Massey, Rept. Progr. Phys. 12, 248 (1948).
11. И. Г. Ф. Друкaрев, ЖЭТФ 37, 847 (1959).
12. J. B. Hasted, Proc. Roy. Soc. A205, 421 (1951).
13. J. B. Hasted, Proc. Roy. Soc. A212, 235 (1952).
14. J. B. H. Stedeford and J. B. Hasted, Proc. Roy. Soc. A227, 466 (1955).
15. J. B. Hasted and R. A. Smith, Proc. Roy. Soc. A235, 354 (1956).
16. H. B. Gilbody and J. B. Hasted, Proc. Roy. Soc. A238, 334 (1957).
17. J. B. Hasted, J. Appl. Phys. 30, 25 (1959).
18. D. R. Bates and H. S. W. Massey, Philos. Mag. 45, 111 (1954).
19. L. W. Alvarez, Rev. Scient. Instrum. 22, 708 (1951).
20. W. Wien, Ann. Phys. 35, 519 (1912).
21. S. K. Allison, Rev. Mod. Phys. 30, 1137 (1958).
22. X. Л. Левиант, М. И. Корсунский, Л. И. Пивовар и И. М. Подгорный, ДАН СССР 103, 403 (1955).
23. Я. М. Фогель, Л. И. Крупник и Б. Г. Сафронов, ЖЭТФ 28, 589 (1955).
24. Я. М. Фогель и Л. П. Крупник, ЖЭТФ 29, 209 (1955).
25. Я. М. Фогель, Р. В. Митин, ЖЭТФ 30, 450 (1956).
26. Я. М. Фогель, Р. В. Митин и А. Г. Коваль, ЖЭТФ 31, 397 (1956).
27. Я. М. Фогель, В. А. Анкудинов, Д. В. Пилипенко и Н. В. Тополя, ЖЭТФ 34, 579 (1958).
28. Я. М. Фогель, Р. В. Митин и В. Ф. Козлов, ЖТФ 28, 1526 (1958).
29. Н. В. Федоренко, ЖТФ 24, 769 (1954).
30. В. М. Дукельский и Н. В. Федоренко, ЖЭТФ 29, 473 (1955).
31. Я. М. Фогель, Г. А. Лисочкин и Г. П. Степанова, ЖТФ 25, 1944 (1955).
32. Я. М. Фогель, Л. П. Крупник и В. А. Анкудинов, ЖТФ 26, 1208 (1956).
33. Я. М. Фогель, Л. И. Крупник, А. Г. Коваль и Р. П. Слабоспицкий, ЖТФ 27, 988 (1957).
34. Я. М. Фогель и А. Д. Тимофеев, Тр. физ.-мат. фак-та ХГУ 7, 177 (1958).
35. В. Л. Тальрозе и К. Д. Франкевич, ДАН СССР 111, 376 (1956).
36. Н. В. Федоренко, ЖТФ 24, 784 (1954).
37. Я. М. Фогель и Р. В. Митин, Тр. физ.-мат. фак-та ХГУ 7, 195 (1958).
38. Я. М. Фогель, Р. В. Митин, В. Ф. Козлов и П. В. Ромашко, ЖЭТФ 35, 565 (1958).
39. Я. М. Фогель, В. Ф. Козлов, А. А. Калмыков и В. И. Муратов, ЖЭТФ 36, 1312 (1959).

40. Я. М. Фогель, В. Ф. Козлов и А. А. Калмыков, ЖЭТФ 36, 1354 (1959).
41. Я. М. Фогель, В. Ф. Козлов и Г. Н. Полякова, ЖЭТФ (в печати).
42. Я. М. Фогель, В. А. Анкудинов и Д. В. Пилипенко, ЖЭТФ 35, 868 (1958).
43. Я. М. Фогель, В. А. Анкудинов и Д. В. Пилипенко, ЖЭТФ 38, 26 (1960).
44. В. М. Дукельский, В. В. Афросимов и Н. В. Федоренко, ЖЭТФ 30, 792 (1956).
45. Н. В. Федоренко, В. В. Афросимов и Д. М. Каминкер, ЖТФ 26, 1939 (1956).
46. C. E. Moore, Atomic Energy Levels, National Bureau of Standards, 1949.
47. O. Henle und W. Maurer, Z. Phys. 37, 659 (1936).
48. W. de Groot und F. M. Penning, Handb. Physik 23, 114 (1933).
49. H. D. Hagstrum and J. T. Tate, Phys. Rev. 59, 354 (1941).
50. W. Maurer, Z. Phys. 40, 161 (1939).
51. O. Beeck, Z. Phys. 35, 36 (1934).
52. H. S. W. Massey and H. A. Smith, Proc. Roy. Soc. A142, 142 (1933).
53. Л. Н. Розенцвейг и В. П. Герасименко, Тр. физ.-мат. фак-та ХГУ 6, 87 (1955).
54. Н. В. Федоренко и А. В. Беляев, ЖЭТФ 37, 1808 (1959).
55. J. P. Keene, Philos. Mag. 40, 369 (1949).
56. Н. В. Федоренко, ЖТФ 24, 2113 (1954).
57. В. М. Дукельский и Э. Я. Зандберг, ДАН СССР 82, 33 (1955).
58. L. M. Branscomb and S. J. Smith, Phys. Rev. 98, 1127 (1955).
59. B. Gaspar, B. Molnar, Acta, phys. Hungar. 5, 75 (1955).
60. D. S. Burch, S. J. Smith and L. M. Branscomb Phys. Rev. 112, 171 (1958).
61. Я. М. Фогель, А. Г. Коваль и Ю. З. Левченко, ЖЭТФ (в печати)
62. Н. С. Бучельникова, ЖЭТФ 35, 1119 (1958).
63. Р. Н. Ильин, В. В. Афросимов, Н. В. Федоренко, ЖЭТФ 36, 41 (1959).



Беседа с сотрудницей В. Чечетенко
Yakov Mikhailovich leads a discussion with research worker V. Chechetenko



Обсуждение научных результатов
The discussion of science results



Научный семинар
The Workshop



Председатель ГКАЭ А. М. Петросьянц вручает правительственную награду
за вклад в развитие атомной науки и техники Я. М. Фогелю
The chairman of SCAE presents Ya. M. Fogel' with the government award
on its contributions in the development of Atomic Science and Technique



Пленарное заседание Всесоюзной конференции
Plenary session of an all-USSR conference



Прием после заседания Всесоюзной конференции
Party after the all-USSR conference session



Доклад Якова Михайловича
Yakov Mikhailovich's lecture



Доклад Якова Михайловича
Yakov Mikhailovich's lecture



Сотрудники УФТИ, награжденные правительственными наградами
за вклад в развитие атомной науки и техники (7 марта 1962 г.)

Справа налево, сидят: А. П. Ключарев, К. Д. Синельников, В. Ф. Зеленский,
А. М. Петросьянц, И. М. Лифшиц; *стоят:* Г. Ф. Тихинский, В. Т. Толок,
Л. А. Махненко, В. С. Коган, А. К. Вальтер, Е. В. Инопин, И. А. Гришаев,
С. П. Цытко, А. В. Романов, Я. М. Фогель

UPhTI workers, winners of government awards on their contributions
in the development of Atomic Science and Technique (March, 7, 1962)

Right-to-left: A. P. Klyucharev, K. D. Sinelnikov, V. F. Zelensky,
A. M. Petros'yants, I. M. Lifshits *are sitting*; G. F. Tikhinsky, V. T. Tolok,
L. A. Makhnenko, V. S. Kogan, A. K. Valter, E. V. Inopin,
I. A. Grishaev, S. P. Tsytko, A. V. Romanov, Ya. M. Fogel' *are standing*

Я. М. Фогель. Физик. Учитель. Человек.



Гамаюнова Л. А.



Перегон Т. И.



Соболев А. Ю.



Киян Т. С.



Рант И. Ю.



Коппе В. Т.



Тищенко Л. П.



Мельников В. Н.



Физигеер Б. М.



Логачев Ю. Е.



Шевченко Д. И.



Фогель Я. М.



Коваль А. Г.



Бобков В. В.



Гокон С. П.



Афанасьева И. А.



Грицына В. В.



Сахаров А. А.



Ковтуненко Ю. И.



Сидоренко Ю. В.



Весноватый Ю. А.



Данилевский Н. П.



Исеев Ф. М.



Слюсаренко Ю. В.



Слюсаренко Т. М.



Кочергина Л. В.

Коллектив Проблемной научно-исследовательской лаборатории
ионных процессов ХНУ им. В. Н. Каразина, основателем
и первым руководителем которой был Я. М. Фогель.
Лаборатория была создана в 60-х годах XX столетия

The team of researchers of V. N. Karasin KhNU Problem Science Laboratory
of Ion Processes, the founder and the first research supervisor
of with was Ya. M. Fogel'





№ 10. Згід з д. р. м. н.
Д. М. Фогель.

ВИТЯГ З ПРОТОКОЛУ № 25

ЗАСІДАННЯ ПРЕЗИДІЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНСЬКОЇ РСР

29 вересня 1971 р.

3. Довідає доктор фізико-математичних наук Я. М. Фогель про
застосування явища вторинної іонно-іонної емісії.

/І. К. Походня, К. Б. Мамарозан, В. Т. Черетін, О. С. Барська/.

Беруть постановку прийняти з такими змінами і доповненнями:

1. Рекомендують Фізико-технічному інституту АН УРСР отворити
ліній для розвитку робіт по застосуванню явища вторинної іонно-
іонної емісії.

2. Довідає п. 4 конкретним стресним питанням в експлуатації
дослідного апарату іонного мікроскопа - мікромаліметра - мікроку.

3. Висловлюють, в цьому рекомендації Інституту мінісправді-
вності АН УРСР при наявності явища на поверхні мінісправдівності засто-
совувати метод вторинної іонно-іонної емісії, який на увазі створення
в майбутньому відповідного відділу.

4. Висловлюють пункт про доручення Бюро Відділу фізики АН УРСР
до 15 жовтня розробити та докласти пропозиції щодо координації робіт
із застосування явища вторинної іонно-іонної емісії.



Президент Академії наук УРСР
академія

Б. Натон

В. О. Голованов, заступник
Президії АН УРСР
доктор біологічних наук

К. Ситник





СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК
КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ ИЗОБРЕТЕНИЙ И ОТКРЫТИЙ
при СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

АВТОРСКОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО
№ 226927

На основании полномочий, предоставленных Правительством СССР,
Комитет по делам изобретений и открытий при Совете Министров СССР
выдал настоящее свидетельство
Физико-техническому институту низких температур
АН Украинской ССР

на изобретение "Способ получения непрерывных спектров
излучения инертных газов в ультрафиолетовой
области"

по заявке № 1168773 с приоритетом от 3 июля 1967 г.
автор ^и изобретения: **ФОГЕЛЬ Яков Михайлович и
другие, указанные в прилагаемом описании.**

Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений Союза ССР
2 июля 1968 г.

Действие авторского свидетельства распро-
страняется на всю территорию Союза ССР

Председатель
Комитета *С. Яковлев*
Начальник отдела *С. Яковлев*





ВТОРИЧНАЯ ИОННАЯ ЭМИССИЯ**Я. М. Фогель**

[Успехи физических наук, 1967 г. Январь. – Том 91, вып. 1. – С. 75–112.]

I. ВВЕДЕНИЕ

При бомбардировке поверхности твердого тела пучком первичных положительных ионов наблюдается эмиссия с поверхности положительных и отрицательных ионов, нейтральных частиц, электронов и электромагнитного излучения. Эмиссия нейтральных частиц, составляющих твердое тело (катодное распыление), и эмиссия электронов при ионной бомбардировке твердых тел представляют собой достаточно хорошо изученные явления. Существуют обзорные статьи, посвященные изложению результатов изучения этих явлений. Иначе обстоит дело с изучением вторичной ионной эмиссии. По существу, систематическое исследование этого явления началось около десяти лет назад и количество накопленного экспериментального материала еще невелико. Однако, как будет ясно из дальнейшего изложения, явление вторичной ионной эмиссии дает возможность совершенно нового подхода к изучению различных физических и химических процессов на границе раздела твердое тело – разреженный газ, и поэтому систематическое изучение этого явления приобретает большое научное и практическое значение. Цель данной статьи – привлечь внимание физиков и физиков-химиков к еще мало изученному явлению вторичной ионной эмиссии, поскольку, по мнению автора, изучение этого явления не только увеличит понимание процессов взаимодействия атомных частиц с поверхностью твердого тела, но и даст возможность использовать это явление при изучении физики и химии поверхностей твердых тел.

Необходимо дать четкое определение явления, называемого вторичной ионной эмиссией, и тем самым строго определить круг вопросов, который будет освещен в настоящей статье. Необходимость в таком определении еще связана с тем, что иногда явление истинно вторичной ионной эмиссии смешивают с отражением первичных ионов от поверхности твердого тела. В случае вторичной ионной эмиссии мы имеем дело с ионами, вылетающими с поверхности твердого тела в результате передачи импульса от первичных ионов к частицам, находящимся на поверхности твердого тела. Отражение ионов есть не что иное, как рассеяние первичных ионов приповерхностным слоем твердого тела. В силу этого отраженные ионы имеют такую же природу, как и первичные, и могут отличаться от них

только величиной или знаком заряда. Из сказанного следует, что отделение вторичных ионов от отраженных может быть легко произведено с помощью масс-спектро-метрического анализа, поскольку во всех случаях, кроме одного, о котором будет сказано ниже, природа вторичных ионов отличается от таковой для отраженных ионов. Единственный случай, когда отделение вторичных ионов от отраженных может оказаться затруднительным, имеет место тогда, когда и те, и другие имеют одинаковую природу. Такой случай реализуется благодаря тому, что ионы первичного пучка внедряются в приповерхностный слой твердого тела, а затем эти внедренные ионы снова выбиваются из него ударом первичных ионов. Отделение отраженных ионов от истинно вторичных ионов той же природы возможно в том случае, когда их энергетические распределения не перекрываются, в противном случае (такой случай реализуется для первичных ионов сравнительно малой энергии) такое отделение осуществить невозможно.

Наиболее простой состав вторичная ионная эмиссия должна иметь в идеальном случае, когда первичный ионный пучок падает на атомно-чистую поверхность твердого тела, не имеющего объемных загрязнений. В этом случае вторичными ионами будут ионы, составляющие решетку твердого тела. При наличии объемных загрязнений в твердом теле в состав вторичной ионной эмиссии будут входить ионы этих загрязнений. Наконец, наличие на поверхности твердого тела слоя адсорбированных газов приводит к появлению в составе вторичной ионной эмиссии ионов, связанных с молекулами адсорбированных газов. В случае протекания химических реакций между молекулами адсорбированных газов и частицами твердого тела или этих молекул друг с другом, в составе вторичной ионной эмиссии появляются ионы, связанные с продуктами этих реакций.

Связь состава вторичной ионной эмиссии с составом частиц, находящихся на его поверхности, дает основание надеяться, что с помощью этого явления можно будет найти новый подход к изучению таких поверхностных явлений, как адсорбция, катализ и коррозия. Первые работы по применению вторичной ионной эмиссии к изучению этих явлений дали обнадеживающие результаты. Значительный интерес представляет не только выяснение закономерностей вторичной ионной эмиссии с целью понимания механизма этого явления, но и изучение возможностей применения этого явления к изучению ряда поверхностных и объемных процессов, имеющих большое научное и практическое значение. Следует также указать на то, что явление вторичной ионной эмиссии играет некоторую роль

в процессе развития пробоя вакуума в различных электровакуумных приборах. Загрязнение плазмы в термоядерных установках также частично происходит вследствие выбивания вторичных ионов из стенок камер, содержащих плазму. В соответствии с этим в статье излагаются результаты исследований, относящиеся только к явлению вторичной ионной эмиссии, и некоторые результаты по применению этого явления к изучению других процессов.

Систематическое изучение явления вторичной ионной эмиссии было начато Арнотом и его сотрудниками [1–7]. В послевоенное время исследование вторичной ионной эмиссии возобновилось и производилось главным образом в Советском Союзе и США.

В настоящей статье будут приведены результаты работ, произведенных в послевоенное время, поскольку, с одной стороны, работы Арнота и его сотрудников излагались в ряде монографий [8, 9], а, с другой стороны, в настоящее время сильно устарели. Будут рассмотрены основные характеристики явления – коэффициент выбивания, масс-спектральный состав и энергетическое распределение вторичных ионов, возможный механизм явления и его практические применения.

II. КОЭФФИЦИЕНТЫ ВЫБИВАНИЯ ВТОРИЧНЫХ ИОНОВ

Одной из величин, характеризующих явление вторичной ионной эмиссии, является коэффициент выбивания K_i вторичных ионов с определенным отношением заряда к массе. Эта величина определяется как отношение количества таких вторичных ионов N_i к потоку первичных ионов N_0 , падающих на мишень:

$$K_i = \frac{N_i}{N_0} \quad (1)$$

Следует отметить, что величина K_i в случае вторичных ионов, выбитых из слоя адсорбированных газов и химических соединений на поверхности твердого тела, при определенных условиях может зависеть от величины N_0 и, следовательно, уже не может характеризовать явление вторичной ионной эмиссии.

Из условия адсорбционного равновесия между слоем адсорбированных молекул и газом этих молекул, окружающих твердое тело, с учетом

выбивания молекул первичным ионным пучком получается следующая формула для числа вторичных ионов:

$$N_i = \frac{ApN_0}{Bp + C + DN_0}, \quad (2)$$

где p – давление газа, A , B , C и D – постоянные.

При малых значениях N_0 имеет место неравенство $DN_0 \ll Bp + C$ и N_i растёт пропорционально N_0 , т. е. величина K_i не зависит от N_0 . Таким образом, величину K_i следует измерять при значениях N_0 , не выходящих за пределы участка линейной зависимости $N_i = f(N_0)$. Как следует из формулы (2), величина K_i зависит от давления газа, и это обстоятельство нужно учитывать при сопоставлении данных измерений различных авторов.

Измерение абсолютного значения величины K_i сопряжено с большими трудностями, так как вторичные ионы определенной природы, с одной стороны, должны быть отделены от всех остальных вторичных ионов, а, с другой стороны, должны быть полностью собраны на некоторый коллектор. Ввиду указанной трудности вплоть до настоящего времени были сделаны только оценки величины коэффициентов выбивания некоторых вторичных ионов [11, 12].

В случае бомбардировки холодной молибденовой мишени ионами Hg^+ с энергией 600 эв коэффициент K_i^- для ионов O^- , F^- , C^- , C_2H^- , O_2^- и Cl^- оказался равным соответственно 3; 2,5; 0,4; 0,5; 0,2 и 2%. Были также определены коэффициенты K_i^+ для ионов Ni^+ и Ta^+ , выбитых соответственно из никелевой и танталовой мишени ионами Gs^+ [12]. При энергии ионов Cs^+ , равной 2700 эв, коэффициент K_i^+ для ионов Ta^+ при температуре мишени 1760° К оказался равным ~0,6%. Для ионов Ni^+ при той же энергии первичных ионов и температуре мишени 1240° К этот коэффициент был равен ~0,2%.

Кроме коэффициента K_i можно ввести понятие интегрального коэффициента выбивания вторичных ионов, определяемого следующим образом:

$$K = \frac{\sum I_i}{I_0} \quad (3)$$

где $\sum_i I_i$ – суммарный ток всех вторичных ионов, выбитых с поверхности мишени, I_0 – ток первичных ионов.

Знание величин интегральных коэффициентов выбивания вторичных ионов необходимо для создания теории таких явлений, как пробой вакуума и появление дополнительной ионной и электронной нагрузки в ускорительных трубках каскадных и электростатических ускорителей. С другой стороны, парциальный коэффициент выбивания K_i может быть вычислен путем умножения относительной интенсивности соответствующей масс-линий в масс-спектре вторичной ионной эмиссии на величину интегрального коэффициента выбивания*.

Измерение интегральных коэффициентов выбивания вторичных ионов также представляет собой трудную задачу. Трудность заключается в том, что выбивание вторичных ионов всегда сопровождается выбиванием вторичных электронов и отражением первичных ионов. Наложением на систему «мишень – коллектор» постоянного магнитного поля можно воспрепятствовать попаданию вторичных электронов на коллектор и таким образом измерить сумму $K^- + R$ (K^- – интегральный коэффициент выбивания отрицательных ионов, R – коэффициент отражения первичных ионов). Некоторое представление о величине K^- в случае указанной измерительной системы можно получить при условии $R \ll K^-$. Это условие в какой-то мере было осуществлено в работе [13], в которой измерялась величина $K^- + R$ для протонов и дейтонов с энергией 200÷1000 кэВ, бомбардировавших мишени из меди, алюминия и нержавеющей стали. В указанном диапазоне энергии на коллектор шел отрицательный ток, т. е. имело место условие $R < K^-$. Величина $K^- + R$ изменялась от $\sim 10^{-3}$ при энергии протонов 200 кэВ до 10^{-4} при энергии 1000 кэВ. Если энергия протонов уменьшается до десятков кэВ, то начинает выполняться условие $R > K^-$ (на коллектор идет положительный ток) и нельзя получить никакого представления о величине K^- [14].

В случае наложения на коллектор отрицательного потенциала по отношению к мишени можно измерить величину $K^+ + R$ (K^+ – интегральный коэффициент выбивания вторичных положительных ионов). Такие измерения были проведены в работе [15]. Однако поскольку об относительной величине коэффициентов K^+ и R в этой работе ничего не было

* Определение величины K_i указанным образом справедливо только в том случае, когда угловые распределения всех вторичных ионов одинаковы.

известно, то никаких определенных сведений о величине K^+ также получить не удалось. То же самое можно сказать и о результатах работы [16], в которой также измерялась величина $K^+ + R$ для ионов благородных газов с энергией от 100 до 30 000 эв, бомбардировавших мишень из графита, меди и золота.

В работе [17] был предложен и применен метод измерения величин K^+ и K^- , позволявший измерять эти величины при наличии вторичной электронной эмиссии и отражении первичных ионов. Этим методом были измерены коэффициенты K^- , K^+ и R для мишени из Мо при бомбардировке ионами H^+ , He^+ , Ne^+ , Ar^+ , Kr^+ и O^+ с энергией от 10 до 40 кэв и для мишеней из Ta, W, Cu, Fe при бомбардировке ионами H^+ , Ne^+ и Ar^+ с энергиями в том же интервале.

На рис. 1 приведены кривые $K^-(v)$, $K^+(v)$ и $R(v)$ (v – скорость иона) для всех металлов, исследованных в работе [17].

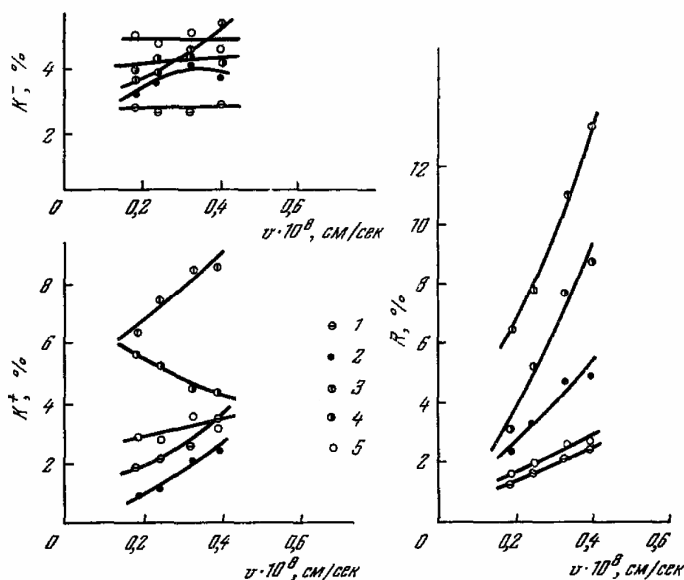


Рис. 1.

Зависимости $K^+(v)$, $K^-(v)$ и $R(v)$ для различных металлов.

Первичные ионы: 1 – Мо; 2 – Fe; 3 – Ta; 4 – W; 5 – Cu

Некоторые сведения о величине коэффициента K^- в случае бомбардировки ионами Li^+ и K^+ ряда щелочно-галогидных кристаллов содержатся

в работах [18, 19]. Выбивание вторичных ионов с поверхности кристалла производилось одиночными импульсами первичного тока продолжительностью в несколько *мксек*. Бомбардировка кристалла в режиме одиночных импульсов, с одной стороны, препятствовала заряджению его поверхности, и, с другой стороны, позволяла отделить вторичные отрицательные ионы от электронов по времени их пролета от мишени до коллектора. По величине времени пролета можно было оценить массу отрицательного иона. Из кристаллов NaCl и KCl выбивались ионы Cl^- , из KBr ионы Br^- и из NaF ионы F^- . Коэффициенты выбивания этих ионов при энергии первичных ионов K^+ порядка 1 *кэв* составляли $7 \div 10\%$.

III. МАСС-СПЕКТР ВТОРИЧНОЙ ИОННОЙ ЭМИССИИ

Масс-спектрометрические исследования состава вторичной ионной эмиссии производились в работах [1–6, 11, 13, 16, 20–32]. Эти исследования показали, что состав вторичных положительных и отрицательных ионов зависит от следующих факторов:

- 1) природы мишени,
- 2) природы, энергии и плотности тока первичного ионного пучка,
- 3) температуры мишени,
- 4) состава и давления газа, окружающего мишень.

Хотя условия эксперимента в рассмотренных ниже работах не могли обеспечить одинаковости указанных выше факторов, и поэтому результаты различных авторов в ряде случаев не согласуются, все же из этих результатов можно извлечь некоторые общие выводы.

Прежде всего можно утверждать, что в составе вторичной положительной и отрицательной ионной эмиссии присутствуют:

- 1) ионы вещества самой мишени*. Происхождение этих ионов может быть различным. Они могут выбиваться как из самого вещества мишени, так и из химических соединений на ее поверхности,
- 2) ионы объемных загрязнений в веществе мишени,
- 3) ионы той же природы, что и ионы первичного пучка,
- 4) ионы молекул или их осколков, находящихся на поверхности мишени химических соединений,
- 5) ионы молекул или их осколков, адсорбированных на поверхности мишени.

* Отрицательные ионы вещества мишени, естественно, могут наблюдаться только в том случае, когда они стабильны или, будучи метастабильными, обладают временем жизни большим, чем время их пролета в масс-спектрометре.

Таблица I

Масса	Нейтральные частицы		Положительные ионы		Отрицательные ионы	
	Вид	Интенсивн.	Вид	Интенсивн.	Вид	Интенсивн.
1	2	3	4	5	6	7
1					H^-	<i>W</i>
15			CH_3^+	<i>W</i>	O^-	<i>S</i>
16					OH^-	<i>S</i>
17						
18	H_2O	<i>S</i>	H_2O^+		F^-	<i>M</i>
19						
23			Na^+	<i>VS</i>		
24			Mg^+	<i>S</i>	C_2^-	<i>M</i>
25			$\text{Mg}^+ \text{C}_2\text{H}^+$	<i>S</i>	C_2H^-	<i>M</i>
26	C_2H_2	<i>M</i>	$\text{Mg}^+, \text{C}_2\text{H}_2^+$	<i>S</i>	C_2H_2^-	<i>S</i>
27			$\text{Al}^+, \text{C}_2\text{H}_3^+$	<i>M</i>	C_2H_3^-	<i>W</i>
28	CO	<i>S</i>	C_2H_4^+	<i>W</i>		
29			C_2H_5^+	<i>M</i>		
32			S^+	<i>W</i>	S^-	<i>M</i>
33					SH^-	<i>M</i>
34					SH_2^-	<i>M</i>
35					Cl^-	<i>S</i>
37					Cl^-	<i>S</i>
39			K^+	<i>VS</i>		
40			Ca^+	<i>M</i>		
41			K^+	<i>S</i>		
42			C_3H_6^+	<i>M</i>		
43			C_3H_7^+	<i>M</i>		
44	CO_2	<i>M</i>	$\text{CO}_2^+ (?)$	<i>M</i>		
45					$(?)$	<i>W</i>
48					C_4^-	<i>W</i>
49					C_4H^-	<i>W</i>
50	C_4H_2	<i>W</i>				
51	C_4H_3	<i>W</i>				
52	C_4H_4	<i>W</i>	C_4H_4^+	<i>W</i>		
54			Fe^+	<i>W</i>		
56			Fe^+	<i>W</i>	$(?)$	<i>W</i>

Продолжение таблицы I

1	2	3	4	5	6	7
57			$C_4H_9^+$	<i>W</i>	(?)	<i>M</i>
58			$C_4H_{10}^+$	<i>W</i>	(?)	<i>W</i>
59					(?)	<i>M</i>
60					(?)	<i>W</i>
62–68			Xe^{++}	<i>S</i>		
70			(?)	<i>W</i>		
75			As^+	<i>W</i>	(?)	<i>M</i>
76					(?)	<i>M</i>
77					(?)	<i>W</i>
78			$C_6H_6^+$	<i>W</i>	(?)	<i>W</i>
80			(?)	<i>W</i>		
82			(?)	<i>W</i>		
92			$C_5H_5CH_3^+$	<i>W</i>	(?)	<i>W</i>
98					(?)	<i>VW</i>
107			Ag^+	<i>S</i>		
108					$AgH(?)$	<i>M</i>
109			Ag^+	<i>S</i>		
110					$AgH(?)$	<i>M</i>
124–136			Xe^+	<i>VS</i>		
160						
185			W^+ или Ta^+	<i>M</i>		
198–204			Hg^+	<i>S</i>		
214–218			Ag_2^+	<i>S</i>	Ag_2^-	<i>M</i>
230–234			Ag_2O^+	<i>W</i>	Ag_2O^-	<i>S</i>
246–250					$Ag_2O_2^-$	<i>W</i>
321–327			Ag_3^+	<i>W</i>		

Условные обозначения величины интенсивности:

VS – очень сильная, *W* – слабая,
S – сильная, *VW* – очень слабая.
M – средняя,

В качестве примера, подтверждающего этот вывод о составе вторичной ионной эмиссии, можно привести данные масс-спектрометрического анализа частиц, выбитых с поверхности Ag ударом ионов Xe^+ с энергией 400 эв, полученные в работе [20] (см. табл. I).

В этой работе был произведен масс-спектрометрический анализ не только частиц, выбитых из мишени в заряженном состоянии, но и в нейтральном состоянии. Для проведения анализа выбитых из мишени ней-

тральных частиц они ионизовались электронным пучком. Давление остаточного газа в камере мишени было 10^{-7} мм рт. ст. При впуске благородного газа в ионный источник установки давление в камере мишени увеличивалось до 10^{-4} мм рт. ст.

Как видно из табл. I, в масс-спектре мишени из Ag находятся вторичные ионы перечисленных выше пяти групп.

Исследование масс-спектра вторичных ионов мишеней из Al [16], Fe [16, 31], Cu [13, 16, 24], Ge [20], Mo [21, 23], Nb [32], Ta [16, 21, 27], W [16] и Pt [16, 22, 29, 30] показало, что масс-спектр этих мишеней состоит из тех же групп ионов, что и масс-спектр Ag. Однако относительное количество и род ионов, входящих в состав этих групп, изменяются с изменением природы мишени. Эти изменения связаны как с изменением природы самой мишени, так и с изменением состава пленки адсорбированных газов и химических соединений на ее поверхности. При одном и том же составе остаточного газа состав этой пленки изменяется с природой мишени вследствие изменения скорости адсорбции компонентов остаточного газа на поверхность мишени и изменения характера химического взаимодействия остаточных газов с материалом мишени.

В работе [23] были изучены зависимости количества выбитых вторичных ионов от скорости и природы первичных ионов. На рис. 2 представлены кривые $K_i(v)^*$ для некоторых вторичных ионов, выбитых из молибденовой мишени.

Интересной особенностью кривых $K_i(v)$ в области скоростей $v > v_{\max}$ является постепенное уменьшение производной кривой с увеличением скорости. Создается впечатление, что при $v \gg v_{\max}$ количество выбитых ионов перестает зависеть от скорости первичного иона и стремится к постоянному значению. Такая независимость величины K_i от скорости действительно наблюдается для пары $H^- - H^+$ (см. рис. 2, а) в области скоростей $\sim 2-10^8$ см/сек. Аналогичное обстоятельство имеет место также при выбивании отрицательных ионов окислов молибдена ионами Ag^+ .

Ход кривых $K_i(E)$ в области $E \gg E_{\max}$ ($E_{\max}$ – энергия, соответствующая максимуму на кривой $K_i(E)$) довольно хорошо соответствует

* Величина K_i в данном случае представляет отношение тока вторичных ионов на коллектор масс-спектрометра к току первичных ионов на мишень.

формуле $K_i \sim \frac{\ln E}{E}$, выведенной в работе [33] для коэффициента распыления металлов ионами больших энергий.

В области $E < E_{\max}$ ход кривых $K_i(E)$ был исследован в работах [11, 21]. Было установлено, что существует пороговая энергия первичных ионов. Первичные ионы с энергией ниже пороговой уже не выбивают из мишени вторичных ионов. В этом отношении также проявляется аналогия между явлением вторичной ионной эмиссии и явлением распыления металлов ионным ударом, для которого характерно наличие пороговой энергии. Величина пороговой энергии может быть охарактеризована следующими числами, взятыми из работы [21]. Для пары вторичный ион – первичный ион $\text{Mo}^+ - \text{Ag}^+$ (мишень из Mo) она равна 80 эв, а для пары $\text{Ta}^+ - \text{Ag}^+ - 60$ эв.

Наблюдавшиеся аналогии, конечно, не дают основания утверждать, что катодное распыление и вторичная эмиссия ионов материала мишени представляют два аспекта одного и того же явления. Для обоснования подобного утверждения необходимы дальнейшие исследования обоих явлений в условиях атомно-чистой поверхности мишени (см. ниже).

Состав масс-спектра вторичных ионов зависит от плотности тока первичного пучка. При больших плотностях тока происходит очистка поверхности мишени от молекул адсорбированных газов и поверхностных соединений, и группы вторичных ионов, связанных с этими молекулами, должны исчезать из масс-спектра. Такое явление наблюдалось в работе [26] при бомбардировке различных мишеней пучком ионов с энергией 10 кэв и плотностью тока $20 \frac{\text{мкА}}{\text{мм}^2}$. При указанной плотности тока в масс-спектре мишеней из Mg и Ti наблюдались только вторичные ионы вещества самой мишени, а именно Mg^+ , Mg^{++} , Mg_2^+ и Ti^+ , Ti_2^+ соответственно.

В связи с результатами работы [23] необходимо сделать следующее замечание. Как следует из формулы (2), с увеличением числа бомбардирующих первичных ионов N_0 число вторичных ионов N_i стремится к постоянному значению. Этот вывод верен при условии независимости скорости адсорбции или скорости реакции образования поверхностных химических соединений от величины N_0 . Если на кривой зависимости $N_i = f(N_0)$, начиная с некоторого значения N_0 , наблюдается уменьшение

величины N_i , то это означает, что скорость указанных выше процессов уменьшается с увеличением величины N_0 . При дальнейшем увеличении N_0 может быть достигнуто такое состояние поверхности мишени, когда N_i уменьшится до необнаружимых в эксперименте значений, т. е. некоторые ионы исчезнут в масс-спектре вторичной ионной эмиссии. Таких значений плотности тока первичного пучка достиг автор работы [26] в случае мишеней из Mg и Ti.

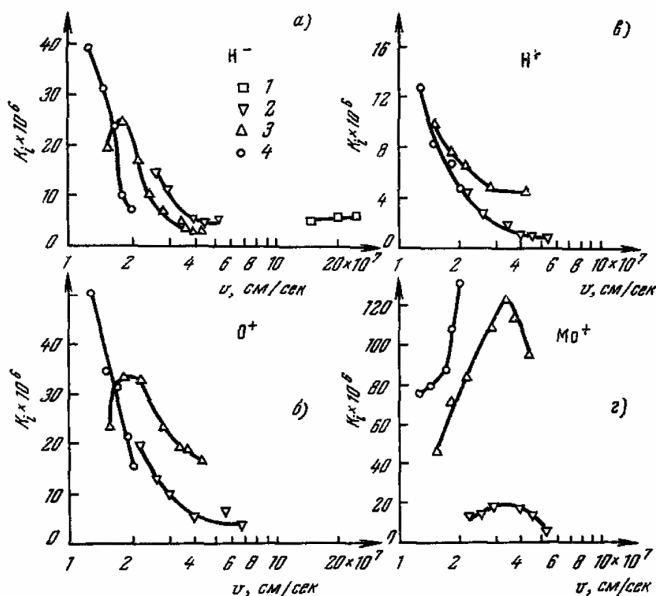


Рис. 2.

Зависимости $K_i(v)$ для вторичных ионов H^- , H^+ , O^+ и Mo^+ .

Первичные ионы: 1 – H^+ ; 2 – Ne^+ ; 3 – Ar^+ ; 4 – Kr^+ .

Температура мишени оказывает существенное влияние на масс-спектр вторичных ионов. Интенсивность I пучков вторичных ионов, связанных с наличием на поверхности мишени адсорбированных молекул, как правило, монотонно убывает с увеличением температуры мишени. При некоторой температуре, зависящей от рода вторичного иона, величина интенсивности пучка делается настолько малой, что уже не может быть измерена аппаратурой, детектирующей вторичные ионы. Такой ход кривых $I(T)$ для вто-

ричных ионов, связанных с адсорбированными молекулами, очевидно, обусловлен увеличением скорости десорбции этих молекул при повышении температуры мишени. Однако в некоторых случаях уменьшение эмиссии рассматриваемых вторичных тонов с повышением температуры мишени происходит немонотонным образом. Один из таких случаев проиллюстрирован на рис. 3, взятом из работы [30]. На этом рисунке приведены кривые $I(T)$ для ионов C_2^- , C_2H^- и $C_2H_2^-$, выбитых с поверхности Pt. Как видно из рис. 3, наблюдается монотонное уменьшение интенсивности пучков C_2H^- и $C_2H_2^-$ с повышением температуры Pt. Это уменьшение интенсивности обусловлено уменьшением покрытия поверхности Pt молекулами, из которых выбиваются ионы C_2H^- и $C_2H_2^-$, вследствие их десорбции или термического разложения. Немонотонный ход кривой $I(T)$ для ионов C_2^- можно объяснить, если иметь в виду возможность образования на поверхности Pt свободного углерода в результате крекинга адсорбированных молекул углеводородов, входящих в состав остаточного газа. Ход кривой $I(T)$ для ионов C_2^- можно понять, если учесть, что ионы C_2^- могут выбиваться как из молекул адсорбированных углеводородов, так и из свободного углерода. Начальный спад кривой $I(T)$ для ионов C_2^- связан с десорбцией молекул углеводородов с поверхности Pt. Примерно с 200°C начинает также идти крекинг углеводородов с отложением на поверхности Pt свободного углерода. Из него также выбиваются ионы C_2^- , поэтому в интервале температур $200\text{--}600^\circ\text{C}$ ход кривой $I(T)$ определяется выбиванием ионов C_2^- как из молекул углеводородов, так и из свободного углерода. Выше 600°C , когда, судя по кривым $I(T)$ для ионов C_2H^- и $C_2H_2^-$, покрытие поверхности Pt адсорбированными молекулами углеводородов делается очень малым, выбивание ионов C_2^- происходит в основном из свободного углерода. Образование свободного углерода на поверхности накаливаемой Pt было подтверждено опытами со впуском в камеру мишени кислорода [30].

Исчезновение или существенное ослабление эмиссии вторичных ионов, связанных с покрытием поверхности мишени молекулами адсорбиро-

ванных газов при повышении ее температуры, наблюдалось также в работах [23, 28, 32, 34].

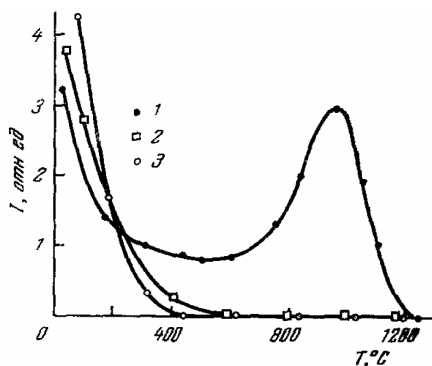


Рис. 3.

Зависимости интенсивности линий вторичных ионов C_2^- (1), C_2H^- (2) и $C_2H_2^-$ (3) от температуры платины, находящейся в атмосфере остаточного газа.

Интенсивность пучков вторичных ионов, выбитых из находящихся на поверхности мишени молекул химических соединений атомов металла с частицами остаточного газа, также зависит от температуры. Характер зависимостей $K_i(T)$ и $I(T)$ для этих ионов виден из рис. 4 и 5, на которых приведены соответствующие кривые для иона Mo^+ , отрицательных ионов окислов Mo и положительных ионов окислов Nb, взятые из работ [21, 23, 32].

Ход кривых на рис. 4 и 5 обусловлен как термическим разложением окислов на поверхности мишени с переходом одних форм окислов в другие, так и их испарением в газовую фазу. Последний процесс отчетливо наблюдался у Nb, для которого было установлено путем ионизации электронами газовой фазы, что при температурах выше $1500^\circ C$ идет испарение окисла NbO в газовую фазу [32].

Рассматривая кривые на рис. 4 и 5, легко можно установить, что ионы самого металла в основном выбиваются из окислов, находящихся на его поверхности. Действительно, когда при температуре выше $1200^\circ C$ покрытие поверхности Mo окислами делается очень малым (исчезает эмиссия ионов $Mo_2O_3^-$, MoO_3^- и MoO_2^-), то и эмиссия ионов Mo^+ уменьшается во много раз (см. рис. 4). Аналогичный ход кривых для ионов NbO^+ и Nb^+

позволяет утверждать, что ионы Nb^+ главным образом выбиваются из окисла NbO . К выводу о том, что ионы Ta^+ выбиваются не из решетки самого металла, а из нитрида, находящегося на его поверхности, пришел автор работы [21] на основании одинакового хода кривых для ионов Ta^+ и TaN^+ . Следует отметить, что после очистки поверхности мишени от химических соединений интенсивность пучка ионов металла, выбитых из его решетки, уже не зависит от температуры.

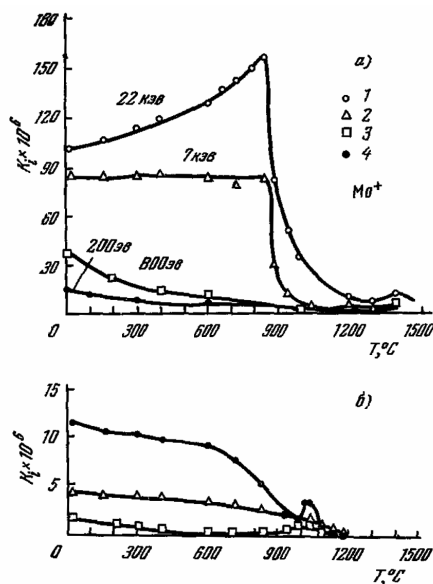


Рис. 4.

Мишень из Mo , первичные ионы Ag^+ .

а) Кривые $K_i(T)$ для ионов Mo^+ : 1, 2 – данные работы [23];

3, 4 – данные работы [21]; б) Кривые $K_i(T)$ для ионов окислов молибдена:

Δ – MoO_3^- , $\square$ – $Mo_2O_3^-$, $\bullet$ – MoO_2^- .

Влияние температуры на эмиссию вторичных ионов, связанных с покрытием поверхности мишени молекулами химических соединений, исследовалось также в работах [27, 28, 31].

Поскольку газовая среда, окружающая мишень, находится в динамическом равновесии с пленкой адсорбированных молекул, находящейся на поверхности мишени, ее состав и давление должны оказывать существенное

влияние на масс-спектр вторичной ионной эмиссии. Такое влияние было впервые обнаружено в работе [23] при изучении воздействия паров D_2O на поверхность молибдена.

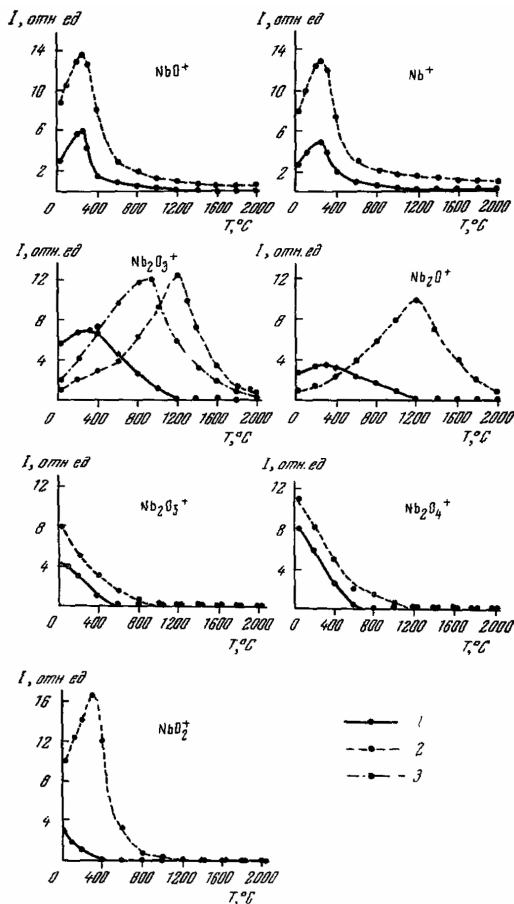


Рис. 5.

Зависимости $I(T)$ для вторичных ионов Nb^+ , NbO^+ , NbO_2^+ , Nb_2O^+ , $Nb_2O_3^+$, $Nb_2O_4^+$, $Nb_2O_5^+$.

1 – ниобиевая полоска и атмосфере остаточного газа; 2 – ниобиевая полоска в атмосфере кислорода ($p = 5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.); 3 – ниобиевая полоска в атмосфере кислорода ($p = 3 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.).

Мишень из Мо была нагрета до температуры 1500°C в остаточном газе. Затем в камеру мишени были впущены пары D_2O до давления 10^{-4} мм рт. ст. В атмосфере паров D_2O мишень остывала до комнатной температуры и при этой температуре был исследован масс-спектр вторичной ионной эмиссии. На рис. 6 приведен спектр отрицательных ионов мишени из Мо в атмосфере остаточного газа и паров D_2O . Как видно из рис 6, воздействие паров D_2O на мишень приводит к появлению в масс-спектре ионов OD^- и D^- . В спектре положительных ионов появляются ионы D^+ . Таким образом, можно утверждать, что адсорбция на поверхности мишени паров D_2O приводит к появлению в масс-спектре ионов OD^- , D^- и D^+ . Отсюда следует вывод, что ионы H^- , H^+ и OH^- возникают от наличия на поверхности мишени молекул H_2O . В отношении ионов H^- и H^+ можно утверждать, что они возникают не только от молекул H_2O , но и еще от какой-то водородсодержащей молекулы. Этот вывод следует из сопоставления высот пиков H^- и OH^- на рис. 6, а и пиков D^- и OD^- на рис. 6, б.

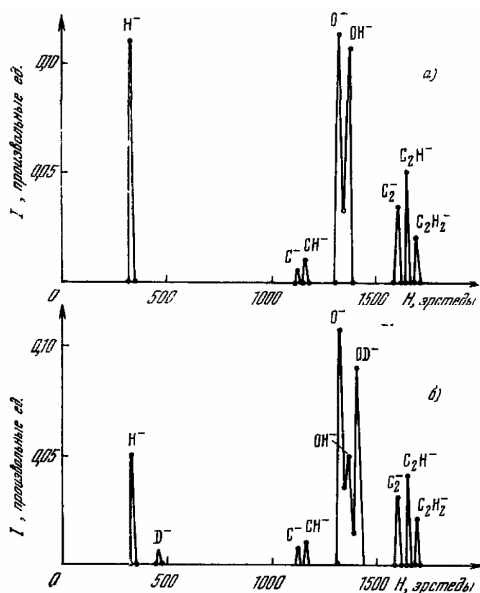


Рис. 6.

Масс-спектр отрицательных ионов с мишени из Мо в атмосфере остаточного газа (а) и в атмосфере паров D_2O (б).

Опыт, аналогичный описанному, с адсорбцией паров D_2O на поверхность Ве, давший такие же результаты, был осуществлен в работе [34].

Типичная кривая, иллюстрирующая влияние давления газа на интенсивность пучка вторичных ионов, связанных с воздействием его на мишень, приведена на рис. 7. Ход кривой $K_i(p)$ соответствует формуле (2).

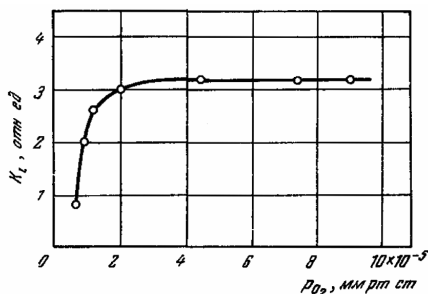


Рис. 7.

Кривая $I(p_{O_2})$ для вторичных ионов Na_2O^+ , выбитых из платиновой мишени, находящейся в атмосфере кислорода

Глубокое влияние на характер масс-спектра вторичных ионов таких факторов, как температура мишени и природа окружающего ее газа, делает возможным применение явления вторичной ионной эмиссии к изучению различных поверхностных процессов (адсорбция, катализ, газовая коррозия), возникающих при взаимодействии газов с поверхностями твердых тел (см. ниже).

IV. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВТОРИЧНЫХ ИОНОВ ПО ЭНЕРГИЯМ

С точки зрения выяснения механизма явления вторичной ионной эмиссии важно знать распределение вторичных ионов по начальным энергиям. Знание этого распределения имеет и практическое значение, так как степень монокинетичности вторичных ионов определяет разрешающую способность ионного микроскопа, основанного на вторичной ионной эмиссии (см. ниже). Ниже излагаются накопленные до сих пор сведения о начальных энергиях вторичных ионов, полученные в работах [20–22, 36–41].

Прежде всего следует отметить, что ввиду различного происхождения вторичных ионов, входящих в рассмотренные в главе III группы, ценную информацию можно извлечь только из энергетических распределений,

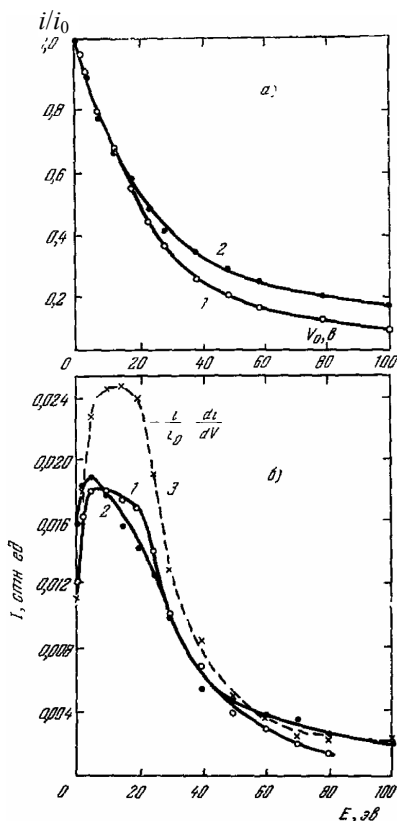


Рис. 8.

Кривые задержки (а) и энергетические спектры (б) распыленных ионов Mo^+ ($T = 1800^\circ \text{K}$):

кривая 1 — $U = 900 \text{ эВ}$; кривая 2 — $U = 2150 \text{ эВ}$; кривая 3 — $U = 900 \text{ эВ}$ (не учтена поправка на пропускную способность масс-спектрометра).

Кривые для ионов K^+ , выбитых ионами Ag^+ с энергией 1000 эВ , приведена

полученных для однородного по составу пучка вторичных ионов. Поэтому во всех работах, посвященных энергетическим распределениям вторичных ионов, кроме работы [39], эти распределения изучались для однородных по составу вторичных ионов, выделенных магнитным анализатором.

Исследование распределения вторичных ионов по энергиям производилось различным образом: методом задерживающего поля [20, 22, 35, 40, 41], путем изучения профиля кривой зависимости тока вторичных ионов на коллектор масс-спектрометра от напряженности магнитного поля анализирующего электромагнита [21, 37] по разрешающей способности ионного микроскопа, создающего изображение с помощью вторичных ионов [36], и наконец, с помощью цилиндрического электростатического анализатора [38, 39].

Кривая энергетического распределения вторичных ионов Mo^+ приведена на рис. 8. Полуширина энергетического распределения ионов Mo^+ * оказалась равной 30–35 эВ.

Энергетическое распределение простирается до энергий свыше 100 эВ . Исследование энергетических распределений вторичных ионов, выбитых из бериллиевой мишени, было произведено в работе [38]. Одна из таких кривых для ионов K^+ , выбитых ионами Ag^+ с энергией 1000 эВ , приведена

* Полуширина кривой энергетического распределения определяется как энергетическая ширина этой кривой на высоте, равной половине максимальной интенсивности.

на рис. 9. Кривая снята при энергетическом разрешении электростатического анализатора, равном 0,8 эв. На этом же рисунке приведена кривая распределения по энергиям ионов Ag^+ , возникших в аргоне, который проник в камеру мишени из ионного источника. Как предполагает автор, ионы Ag^+ образовались благодаря перезарядке первичных ионов в аргоне. Как видно из рис. 9, энергетические распределения ионов K^+ и Ag^+ существенно отличаются друг от друга как величиной полуширины распределения, так и величиной максимальной и наивероятнейшей энергии. Ионы K^+ наблюдаются даже с энергией выше 30 эв, в то время как ионы Ag^+ с энергией, большей 5 эв, отсутствуют.

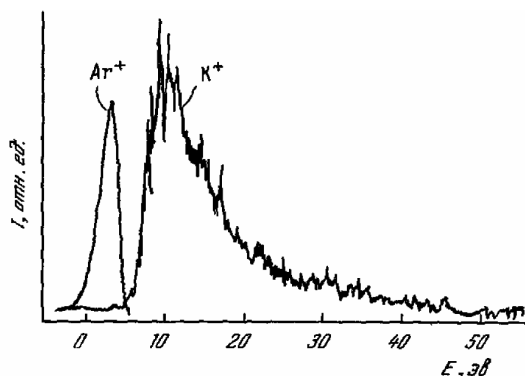


Рис. 9.

Энергетические распределения вторичных ионов K^+ , выбитых из Ве ионами Ag^+ с энергией 1000 эв.

Существенное различие энергетических распределений вторичных ионов основного металла (ионы Be^+) и ионов примеси (ионы K^+) наблюдалось в работах [40, 41]. В этих работах исследовались энергетические распределения различных вторичных ионов, выбитых из Al, Mg и дюралюминия ионами Hg^+ с энергией от 200 до 2000 эв. На рис. 10 и 11 приведены энергетические распределения ряда вторичных ионов, выбитых ионами Hg^+ с энергией 1800 эв из дюралюминия. Как видно из этих рисунков, энергетическое распределение ионов Al^+ имеет большую полуширину и простирается дальше в сторону больших энергий, чем в случае ионов примесей (ионы K^+ и Ni^+), ионов химических соединений (ионы AlOH^+) или ионов, связанных с адсорбированными молекулами (ионы H_2O^+). То же имеет место для ионов Al^+ , Na^+ и K^+ , выбитых из Al (99,99%).

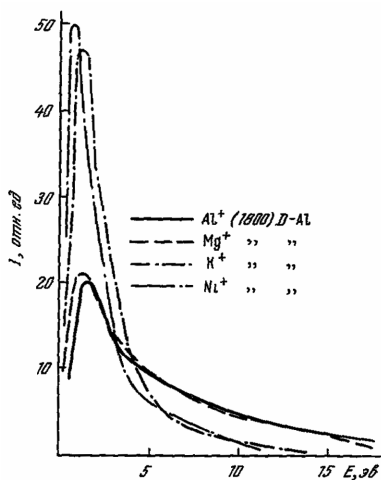


Рис. 10.

Энергетические распределения вторичных ионов Al^+ , Mg^+ , K^+ и Ni^+ , выбитых из дюралюминия ионами Hg^+ с энергией 1800 эв.

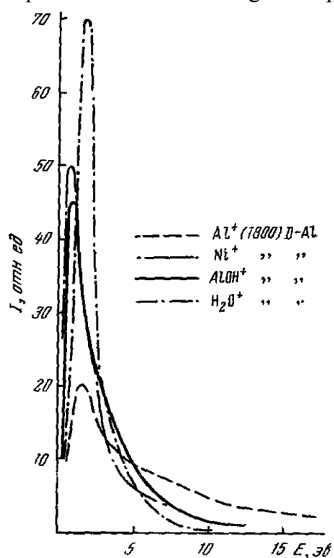


Рис. 11.

Энергетические распределения вторичных ионов Al^+ , Ni^+ , AlOH^+ , H_2O^+ , выбитых из дюралюминия ионами Hg^+ с энергией 1800 эв.

В работе [41] было установлено влияние энергии первичных ионов на характер энергетического распределения вторичных ионов. С увеличением энергии первичных ионов наивероятнейшая энергия ионов Al^+ , выбитых из Al (99,99%), смещается в сторону больших энергий, и полуширина кривой энергетического распределения с 6 эв при энергии ионов Hg^+ , равной 200 эв, растет до 13,5 эв при энергии 2000 эв.

Ионизуя электронным пучком выбитые из мишени атомы, можно исследовать распределение распыленных атомов по энергиям. Такое исследование было проделано в работе [41] для атомов Al . Оказалось, что энергетические распределения атомов Al и ионов Al^+ , выбитых из алюминиевой мишени, не существенно отличаются друг от друга.

Ввиду немногочисленности работ, посвященных изучению энергетических распределений вторичных ионов, рано еще делать какие-либо общие выводы относительно влияния различных факторов (энергия и род первичных ионов, природа и температура мишени, род вторичных ионов и т. д.) на характер распределения. Полученные результаты, однако, дают возможность высказать некоторые суждения о возможном механизме явления вторичной ионной эмиссии, о чем речь будет в следующем разделе этой статьи.

V. О МЕХАНИЗМЕ ВТОРИЧНОЙ ИОННОЙ ЭМИССИИ

Разработка теории вторичной ионной эмиссии должна опираться на определенные представления о механизме этого явления. Наличие таких представлений даст возможность правильно трактовать результаты работ, в которых это явление применяется к изучению различных процессов на поверхности твердых тел, граничащих с разреженным газом (см. ниже). Возникает вопрос, достаточно ли данных, изложенных в предыдущих разделах этой статьи, для определенного суждения о механизме вторичной ионной эмиссии, или необходимы дальнейшие исследования, направленные на то, чтобы этот механизм выяснить? При рассмотрении этого вопроса, на наш взгляд, имеют существенное значение общие соображения, высказанные ниже.

Для того чтобы сформулировать определенное суждение о механизме вторичной ионной эмиссии, необходимо дать ответ на два главных вопроса:

1) в результате каких процессов, сопровождающих соударение первичного иона с поверхностью твердого тела, вторичный ион приобретает

энергию и импульс, с которыми он выходит из поверхности твердого тела в окружающий его разреженный газ;

2) какие процессы определяют заряд вылетевшего иона.

С самого начала следует заметить, что механизм эмиссии различных вторичных ионов может быть неодинаковым. Это замечание связано с тем, что, как отмечалось выше, вторичные ионы выбиваются как из кристаллической решетки мишени или входящих в нее объемных загрязнений, так и из находящихся на поверхности мишени химических соединений или адсорбированных газов. Отсюда следует, что даже вторичные ионы одинаковой природы могут иметь различный механизм эмиссии в зависимости от того, выбиваются ли они из кристаллической решетки мишени или из химических соединений, находящихся на поверхности.

При рассмотрении вопроса о механизме вторичной ионной эмиссии можно сопоставить это явление с более простым и в какой-то мере родственным ему явлением катодного распыления. Такое сопоставление может оказаться полезным, поскольку закономерности явления катодного распыления изучены довольно хорошо и существуют попытки теоретической трактовки этого явления.

Наибольший смысл имеет сопоставление катодного распыления мишени и эмиссии вторичных ионов ее вещества. Однако такое сопоставление может привести к определенным выводам только при условии достаточной чистоты поверхности мишени. В противном случае возможно, что при катодном распылении будут выбиваться не только атомы мишени, а и молекулы химических соединений, находящихся на ее поверхности*. С другой стороны, в случае недостаточной чистоты поверхности мишени ионы вещества мишени могут выбиваться из ее кристаллической решетки и из поверхностных соединений. Только при очистке мишени от поверхностных соединений как атомы, так и ионы будут выбиваться из кристаллической решетки.

В теории катодного распыления рассматриваются механизм эстафетной передачи энергии от первичного иона к атому решетки, вылетающему в вакуум. Согласно этому представлению первичный ион проникает в глубь кристаллической решетки твердого тела и передает импульс его атомам. Эти атомы, смещенные из узлов решетки, в свою очередь передают импульс другим атомам, так что в конце концов в результате эстафетной

* Выбивание ударом первичных ионов молекул химических соединений атомов мишени наблюдалось в работах [20, 42].

передачи импульса он достигает поверхности твердого тела и передается атому, граничащему с вакуумом. Если величина импульса, полученного атомом на поверхности, будет достаточна, чтобы оторвать его от решетки, то он вылетит в вакуум, т. е. произойдет элементарный акт катодного распыления. На основе рассмотренного механизма катодного распыления объяснен ряд особенностей этого явления, в том числе и анизотропия направлений вылета распыленных атомов, наблюдающаяся при распылении монокристаллов ионными пучками и связанная с передачей импульса в кристалле вдоль плотно упакованных направлений (фокусированные столкновения) [43].

Представляет интерес сопоставить результаты экспериментальных исследований катодного распыления и вторичной ионной эмиссии с выводами теории, основанной на механизме эстафетной передачи импульса. Такое сопоставление, как указывалось выше, приведет к определенным выводам только при изучении обоих явлений на мишенях с чистыми поверхностями. В этом случае изучение зависимостей коэффициентов выбивания атомов и ионов от энергии первичных ионов и температуры монокристаллической мишени, сравнение энергетических распределений атомов и ионов, определение пороговых энергий для обоих процессов, установление характера анизотропии направлений выбитых атомов и ионов дадут возможность выяснить, является ли механизм передачи импульса от первичных ионов к атомам и ионам мишени одинаковым или различным? Если он окажется одинаковым, то выводы теории катодного распыления можно будет применить и к явлению вторичной эмиссии ионов решетки. Опыты в указанных выше условиях являются очень трудными и пока еще не были произведены.

Эмиссию вторичных ионов, связанных с наличием на поверхности твердого тела адсорбированных молекул и молекул поверхностных химических соединений, также можно рассматривать как распыление этих молекул ионами первичного пучка. Возможно, что эмиссия указанных ионов, а также и некоторых других, происходит не только в результате эстафетной передачи импульса, но и при парных соударениях первичных ионов с молекулами, находящимися на поверхности твердого тела. Возможность парных соударений первичных ионов с атомами поверхности твердого тела вытекает из опытов по рассеянию ионных пучков поверхностью твердого тела [44–46].

В результате парного взаимодействия с поверхности металла выбиваются как ионы, соответствующие нерасщепившейся адсорбированной молекуле или молекуле поверхностного химического соединения, так и ионы продуктов диссоциации этих молекул (в качестве примера можно привести эмиссию ионов $\text{Fe}(\text{CO})_5^+$, $\text{Fe}(\text{CO})_4^+$, $\text{Fe}(\text{CO})_3^+$, $\text{Fe}(\text{CO})_2^+$ и $\text{Fe}(\text{CO})^+$, наблюдающуюся при образовании соединения $\text{Fe}(\text{CO})_5$ на поверхности железа [31], или эмиссию ионов NH_3^+ , NH_2^+ , NH^+ , H_2^+ , H^+ и N^+ с поверхности платины, находящейся в атмосфере аммиака [30]). Выбивание вторичных ионов в этом случае можно представить по аналогии с процессами диссоциативной ионизации, имеющими место при соударениях ионов с молекулами разреженных газов [47, 48]. В случае вторичной ионной эмиссии первичный ион ионизует адсорбированную молекулу, причем часть ионизованных молекул распадается на осколки. Если в этом процессе молекулярный ион и его осколки получают кинетическую энергию, достаточную для отрыва от поверхности металла, то и произойдет эмиссия соответствующих вторичных ионов. Аналогичным образом может возникать эмиссия вторичных ионов, связанных с молекулами поверхностных химических соединений. Различие по сравнению со случаем адсорбированных молекул будет заключаться только в том, что при вылете ионов поверхностных соединений, включающих в себя атомы металла, будет совершаться работа против сил связи атомов в решетке металла, а не против адсорбционных сил, как в случае вылета ионов адсорбированных молекул.

Для выяснения того, какой из вариантов передачи импульса к частице на поверхности твердого тела — эстафетный или парного взаимодействия, осуществляется при эмиссии тех или иных вторичных ионов, желательно произвести опыты по сопоставлению в одинаковых условиях вторичной ионной эмиссии с массивных мишеней и мишеней из того же материала, но взятых в виде очень тонкой свободной пленки. Очень полезными для решения рассматриваемого вопроса будут опыты по сравнительному изучению масс-спектров диссоциативной ионизации и вторичной ионной эмиссии при соударениях ионов с молекулами газа в свободном и адсорбированном состояниях.

Механизм вторичной ионной эмиссии, не связанный с процессами передачи импульса от первичного иона к частице на поверхности твердого тела, был предложен в работе [49]. Авторы этой работы исходят из того, что при бомбардировке первичными ионами поверхности твердого тела

имеет место вторичная электронная эмиссия. Эмиссия вторичных ионов, по их мнению, возникает в результате соударений вторичных электронов с молекулами газов, адсорбированных на поверхности твердого тела.

Перейдем теперь к рассмотрению факторов, определяющих зарядовое состояние частиц, выбитых с поверхности твердого тела. Этими факторами являются исходное зарядовое состояние частицы на поверхности, процесс передачи ей энергии и условия электронного обмена при ее удалении от поверхности.

Рассмотрим сначала простейший случай выбивания вторичных ионов из решетки металла с атомно-чистой поверхностью. В этом случае выбивается положительный ион металла, который при удалении от поверхности металла может захватить электрон и, следовательно, вылететь как атом.

При равновесном испарении ионов отношение $\frac{n^+}{n^0}$ (n^+ и n^0 – количество частиц, испаряющихся с поверхности в положительном и нейтральном зарядовом состоянии) определяется известной формулой Саха–Ленгмюра.

По данным работы [12] значение величины $\frac{n^+}{n^0}$ при выбивании вторичных

ионов Ta^+ и Ni^+ ионами Cs^+ оказывается в 10^7 – 10^9 раз больше $\left(\frac{n^+}{n^0} \approx 10^{-2}\right)$,

чем значение этой величины, вычисленной по формуле Саха–Ленгмюра.

Неприменимость формулы Саха–Ленгмюра для вычисления величины $\frac{n^+}{n^0}$

в случае вторичной ионной эмиссии связана с тем, что процесс выбивания вторичных ионов является термодинамически неравновесным. Большая

величина $\frac{n^+}{n^0}$ при выбивании вторичных ионов объясняется тем, что их

скорости намного больше тепловых, а как показано в работе [50], вероятность захвата электрона при удалении иона от поверхности металла уменьшается с увеличением его скорости.

Эмиссия отрицательных ионов решетки металла, наблюдавшаяся в работах [25, 28, 29, 31], связана с наличием на его поверхности химических соединений атомов металла с молекулами окружающей его газовой атмосферы. Это утверждение подтверждается тем, что при нагревании металла эмиссия отрицательных ионов уменьшается и при некоторой темпе-

ратуре исчезает. Одновременно с этим исчезает и эмиссия вторичных молекулярных ионов, связанная с наличием на поверхности металла химических соединений. Оценки показывают, что значения $\frac{n^-}{n^0}$ в случае вторичной эмиссии отрицательных ионов самого металла, а также и других отрицательных ионов, намного выше того, которое вычисляется по формуле Саха–Ленгмюра для случая равновесного испарения. Причина этого обстоятельства, по-видимому, связана с тем, что вероятность потери избыточного электрона при отлете отрицательного иона от поверхности металла существенно уменьшается с увеличением его скорости.

При обсуждении вопроса о зарядовом состоянии вторичных ионов, связанных с наличием на поверхности твердого тела молекул адсорбированных газов и поверхностных химических соединений, следует отдельно рассмотреть эмиссии осколочных ионов и ионов, соответствующих нерасщепившейся молекуле. Если исходные молекулы находятся в нейтральном состоянии, то осколочные положительные и отрицательные ионы могут возникать, как указывалось выше, при соударениях со вторичными электронами или при парных соударениях с первичными ионами. Менее вероятно возникновение этих ионов, в особенности отрицательных, при эстафетной передаче импульса.

Иные обстоятельства имеют место при эмиссии ионов, соответствующих нерасщепившейся молекуле. В этом случае исключается возможность их образования за счет соударений вторичных электронов с исходными молекулами. Положительные ионы этого типа могут возникать при передаче импульса исходной молекуле эстафетным путем или путем парных соударений с первичными ионами. Что касается отрицательных ионов нерасщепившейся молекулы, то они могут возникать единственным путем, а именно путем эстафетной передачи импульса к исходной частице, находившейся на поверхности в отрицательном зарядовом состоянии. Таким образом, сам факт эмиссии молекулярных отрицательных ионов такого типа будет свидетельствовать о наличии этих ионов на поверхности металла*.

Как видно из содержания этой главы, механизм эмиссии различных вторичных ионов еще неясен. Необходимы обширные и разносторонние

* Возможность существования отрицательных ионов на поверхности металла, таких, например, как O_2^- , имеет значение для трактовки некоторых каталитических процессов.

экспериментальные исследования для его выяснения. После этого станет возможным создание теории вторичной ионной эмиссии.

VI. О НЕКОТОРЫХ ПРИМЕНЕНИЯХ ЯВЛЕНИЯ ВТОРИЧНОЙ ИОННОЙ ЭМИССИИ

а) ПРИМЕНЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ВТОРИЧНОЙ ИОННОЙ ЭМИССИИ К ИЗУЧЕНИЮ КАТАЛИТИЧЕСКИХ И КОРРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Как видно из содержания предыдущих разделов этой статьи, изучение явления вторичной ионной эмиссии только начинается, однако уже имеющиеся сведения об этом явлении дают основание для исследования возможностей его применения, главным образом к изучению процессов, протекающих в слое адсорбированных молекул и молекул химических соединений на поверхности твердого тела *.

В поверхностном слое происходят процессы, имеющие большое практическое значение. К ним прежде всего относятся гетерогенные каталитические реакции. Начальной стадией газовой коррозии является образование поверхностных химических соединений. Получение сверхвысокого вакуума и чистой водородной плазмы в приборах термоядерного синтеза связано с процессами адсорбции и десорбции, протекающими в поверхностном слое твердых тел, граничащих с газом.

Некоторые наблюдения, описанные в гл. III настоящей статьи, посвященной масс-спектру вторичной ионной эмиссии, дают основание утверждать, что изменения состояния и состава поверхностного слоя твердого тела находят отражение в соответствующих изменениях масс-спектра вторичных ионов, выбитых с поверхности этого тела. Отсюда возникает мысль о возможности изучения процессов, происходящих в поверхностном слое твердых тел, путем наблюдения изменений в масс-спектре их вторичной ионной эмиссии, вызванных течением этих процессов. Естественно, что информация о поверхностных процессах будет более полной, если изучение масс-спектра вторичной ионной эмиссии сочетать с изучением масс-спектра ионов, полученных ионизацией газовой фазы электронным пучком. Новый метод, основанный на наблюдении за ходом кривых $I(T)$ и $I(p)$ (I – интенсивность некоторой линии в масс-спектре, T – температура твердого тела, p – давление газа) для вторичных ионов, выбитых

* В дальнейшем мы будем называть этот слой поверхностным слоем твердого тела.

с поверхности твердого тела пучком первичных ионов, и кривых $I(T)$ для ионов, полученных ионизацией газа, окружающего твердое тело, был применен автором этой статьи и его сотрудниками для изучения ряда каталитических, адсорбционных и коррозионных процессов [28, 30–32, 51–55].

Исследование этих процессов производилось на установке, подробно описанной в работе [30]. В качестве примера применения метода вторичной ионной эмиссии* к изучению каталитических процессов ниже излагаются результаты исследования разложения и синтеза аммиака на железе [54, 55]. Изучение процессов взаимодействия газов с металлами этим методом иллюстрируется результатами исследования системы ниобий – кислород [32]. Катализатор, на котором изучались процессы разложения и синтеза аммиака, представлял собой полосу, изготовленную из чистого железа (99,99% Fe). Изучение реакции разложения аммиака велось при давлении аммиака, равном $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. в интервале температур от комнатной до 800°C . Прежде всего были выяснены условия, при которых реакция разложения аммиака имеет место. Наблюдение за ходом реакции, как и в работе [30], осуществлялось путем исследования зависимости от температуры катализатора интенсивностей линий ионов NH_3^+ , H_2^+ , и N_2^+ в масс-спектре ионизации аммиака электронным ударом. Оказалось, что на поверхности предварительно не обработанной железной полоски реакции разложения аммиака не происходит.

В масс-спектре вторичных ионов, выбиваемых с поверхности такой полоски, было обнаружено большое число пиков, связанных с наличием на ее поверхности кислорода и окислов железа. В частности, наблюдались ионы с массой $16(\text{O}^+)$, $32(\text{O}_2^+)$, $56(\text{Fe}^+)$, $72(\text{FeO}^+)$, $88(\text{FeO}_2^+)$, $112(\text{Fe}_2^+)$, $128(\text{Fe}_2\text{O}^+)$, $144(\text{Fe}_2\text{O}_2^+)$, $160(\text{Fe}_2\text{O}_3^+)$, $176(\text{Fe}_2\text{O}_4^+)$, $200(\text{Fe}_3\text{O}_2^+)$, $216(\text{Fe}_3\text{O}_3^+)$, $232(\text{Fe}_3\text{O}_4^+)$. На рис. 12 приведены кривые $I(T)$ для некоторых из этих ионов. Из этих кривых видно, что окислы на поверхности железа наблюдаются во всем температурном интервале от 20 до 800°C . Было высказано предположение, что неактивность железной полоски по отно-

* Описываемый в этой статье новый метод исследования поверхностных процессов, ради краткости, в дальнейшем будет именоваться методом вторичной ионной эмиссии. Это наименование является неточным, так как рассматриваемый метод включает в себя не только изучение масс-спектра вторичной ионной эмиссии, но и изучение масс-спектра ионов, полученных ионизацией газовой фазы.

шению к реакции разложения аммиака связана с наличием на ее поверхности окислов железа. С целью проверки сделанного предположения железная полоска в течение четырех часов прокаливалась при 800°C в водороде при давлении порядка нескольких *мм рт. ст.* В дальнейшем давление водорода уменьшалось до $1 \cdot 10^{-4}$ *мм рт. ст.* и при этом давлении водорода снова исследовалась зависимость интенсивности пучков вторичных ионов Fe^+ , FeO^+ , Fe_2O_3^+ и Fe_3O_4^+ от температуры железной полоски. Как видно из рис. 12, на котором приведены соответствующие кривые $I(T)$, покрытие полоски окислами железа существенно уменьшилось в результате ее обработки водородом, так что при температурах выше 500°C окислы железа на поверхности полоски нельзя было обнаружить при максимальной чувствительности детектора вторичных ионов. Обработанная в водороде железная полоска, находящаяся затем в атмосфере водорода при давлении 10^{-4} *мм рт. ст.*, оказывается активной по отношению к реакции разложения аммиака. Действительно, при добавлении аммиака к водороду до давления аммиачно-водородной смеси $2 \cdot 10^{-4}$ *мм рт. ст.* можно наблюдать реакцию разложения аммиака на железной полоске, что видно по кривым $I(T)$ для ионов NH_3^+ , $\text{N}_2^+ + \text{CO}^+$ и H_2^+ , полученных ионизацией газовой фазы электронным ударом (рис. 13). Как видно из этого рисунка, начиная с 500°C , равновесное давление аммиака * в камере катализатора уменьшается, а давление азота и водорода увеличивается. Увеличение количества ионов с массой 28, наблюдавшееся в случае неактивного катализатора при температурах выше 600°C , связано с десорбцией с его поверхности молекул CO , образующихся благодаря окислению углеводородов, входящих в состав остаточного газа (см, работу [30]), Форма кривой $I(T)$ для этих ионов не изменяется после прекращения впуска аммиака в камеру катализатора. Как видно из рис. 13, количество ионов с массой 28 и в случае активного катализатора в атмосфере аммиака в области температур, больших 600°C , увеличивается с температурой быстрее, чем в случае неактивного катализатора. Увеличение равновесного давления водорода слабо заметно на фоне сравнительно большого давления водорода ($\sim 10^{-4}$ *мм рт. ст.*), непрерывно поступающего в камеру катализатора. Прекращение впуска

* Измерения производились в динамическом режиме при непрерывном впуске аммиака в камеру катализатора и непрерывной откачке из нее аммиака и продуктов его разложения.

водорода в камеру катализатора приводило к потере катализатором его активности и прекращению реакции разложения аммиака. Активность катализатора легко восстанавливалась обработкой в водороде и поддерживалась неограниченно долго при условии наличия в камере катализатора атмосферы H_2 .

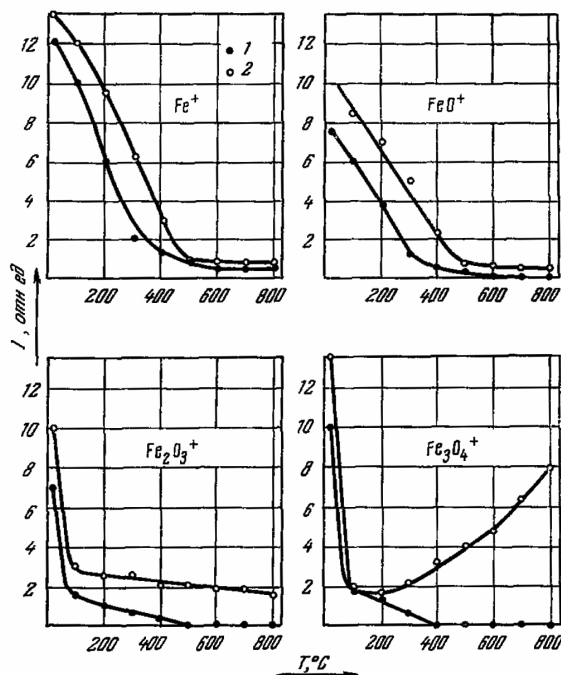


Рис. 12.

Зависимости интенсивности линий вторичных ионов Fe^+ , FeO^+ , $Fe_2O_3^+$ и $Fe_3O_4^+$ от температуры катализатора, находящегося в атмосфере водорода: 1 – активный катализатор; 2 – неактивный катализатор.

Таким образом, есть все основания утверждать, что условием протекания процесса разложения аммиака является очистка поверхности катализатора от окислов железа. Присутствие атмосферы водорода препятствует образованию окислов на поверхности катализатора при температурах выше $500^\circ C$, что и делает возможной реакцию разложения аммиака при этих температурах.

На рис. 13 приведены кривые $I(T)$ для ионов NH_3^+ , NH_2^+ , NH^+ , $\text{N}_2^+ + \text{CO}^+$, H_2^+ и N^+ как выбитых с поверхности катализатора, так и полученных при ионизации газовой фазы электронным ударом. Из этого рисунка видно, что ход кривых $I(T)$ существенно различен для активного и неактивного катализатора. Сопоставление и анализ этих кривых позволяют высказать предположение о наиболее вероятном характере элементарных процессов при каталитическом разложении аммиака на железе.

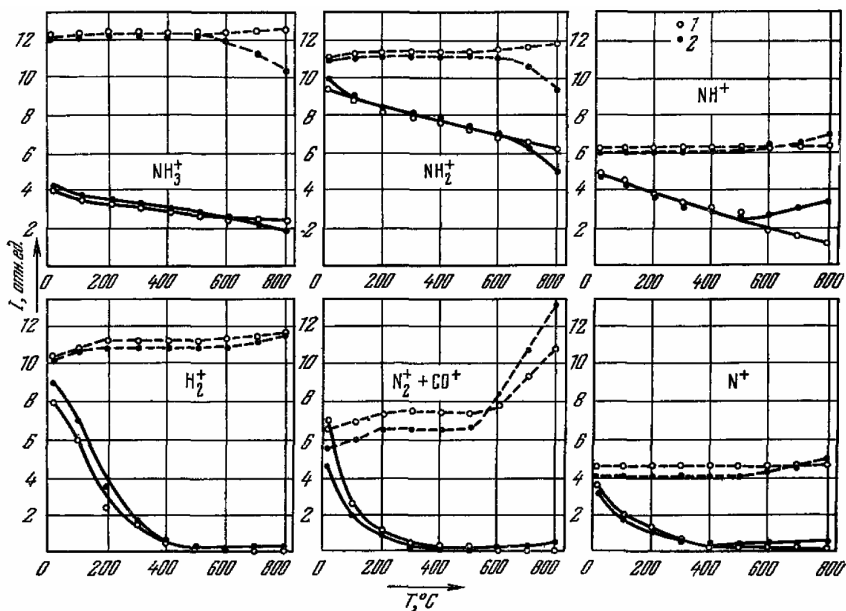


Рис. 13.

Зависимости интенсивности линий ионов NH_3^+ , NH_2^+ , NH^+ ,

H_2^+ , $\text{N}_2^+ + \text{CO}^+$ и N^+ от температуры катализатора.

Сплошные кривые – вторичные ионы, пунктир – ионы, полученные ионизацией газа электронным пучком. 1 – неактивный и 2 – активный катализатор в смеси водорода и аммиака.

Как и в случае платинового катализатора [30], первой стадией процесса разложения аммиака при температурах выше 500° С является распад

части адсорбированных на поверхности железа молекул NH_3 по схеме $\text{NH}_3 \rightarrow \text{NH} + \text{H}_2$ с последующей десорбцией NH и H_2 в газовую фазу.

Образование частиц NH в результате диссоциативной адсорбции NH_3 надежно устанавливается на основании следующих фактов.

1. В интервале температур $500\text{--}800^\circ\text{C}$ эмиссия вторичных ионов NH^+ увеличивается, а эмиссия ионов NH_3^+ и NH_2^+ уменьшается. Это различие в ходе кривых $I(T)$ для ионов NH^+ и NH_3^+ в указанном интервале температур свидетельствует о том, что ионы NH^+ возникают не только как осколки частиц NH_3 при ударе первичного иона, но и выбиваются из образующихся при разложении аммиака частиц NH .

Независимость отношения $I_{\text{NH}_2^+}/I_{\text{NH}_3^+}$ от температуры (рис. 14) указывает на то, что частицы NH_2 при разложении аммиака в заметном количестве не образуются, а ионы NH_2^+ являются осколками молекул NH_3 (см. ниже).

2. В том же интервале температур, несмотря на уменьшение количества молекул NH_3 в газовой фазе, интенсивность пучка ионов NH^+ , полученных ионизацией электронным ударом, увеличивается. Это обстоятельство объясняется десорбцией частиц NH в газовую фазу.

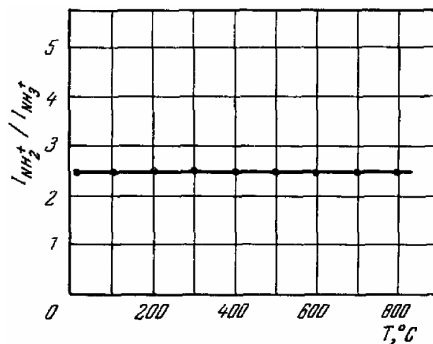


Рис. 14.

Отношение $\frac{I_{\text{NH}_2^+}}{I_{\text{NH}_3^+}}$ как функция от температуры.

Таким образом, возникающие в первой стадии процесса разложения аммиака молекулы NH частично десорбируются в газовую фазу. Другая часть этих молекул реагирует на поверхности катализатора по схеме $\text{NH} + \text{NH} \rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2$. Образующиеся в этой стадии процесса молекулы N_2 и H_2 десорбируются в газовую фазу. Предлагаемый на основании полученных в данной работе экспериментальных результатов механизм каталитического разложения аммиака на железе полностью совпадает с механизмом разложения аммиака, установленным ранее для платинового катализатора [30]. Такое совпадение является, по-видимому, не случайным, и может служить аргументом в пользу высказанного в работе [56] предположения об одинаковом механизме реакции разложения аммиака для ряда катализаторов.

В заключение следует отметить, что в масс-спектре вторичных ионов, выбитых с поверхности железа, находившегося в атмосфере аммиака, присутствовали ионы FeN^+ . Эмиссия этих ионов связана с образованием на поверхности катализатора нитрида железа. Эмиссия вторичных ионов FeN^+ монотонно уменьшалась с увеличением температуры катализатора и при температурах выше 500°C уже не могла быть обнаружена при максимальной чувствительности детектора вторичных ионов. Отсюда следует, что нитрид железа присутствует на поверхности катализатора в заметных количествах при температурах ниже 500°C . Перейдем теперь к изложению результатов исследования синтеза аммиака на том же железном катализаторе, на котором изучалась реакция разложения аммиака.

Следует указать на одну особенность реакции синтеза аммиака по сравнению с другими реакциями, изученными методом вторичной ионно-ионной эмиссии. Этот метод, как и всякий масс-спектрометрический метод, пригоден для изучения каталитических реакций только при низких давлениях смеси реагирующих газов (порядка 10^{-4} мм рт. ст.). Однако, как показывает расчет, при давлении азотно-водородной смеси равном 10^{-4} мм рт. ст., равновесное давление аммиака равно $1,7 \cdot 10^{-14}$ мм рт. ст. Очевидно, что при столь низком давлении аммиака нельзя получить информации о ходе каталитической реакции путем наблюдения масс-спектра ионизации газовой фазы электронным ударом, как это делалось в работах по разложению аммиака. В данном случае все заключения о механизме реакции надо было делать на основании изучения только масс-спектра вторичной ионно-ионной эмиссии.

Изучение реакции синтеза производилось при давлении азотноводородной смеси, равном $1,2 \cdot 10^4$ мм рт. ст. Отношение парциальных давлений N_2 и H_2 было равно 1 : 3 (стехиометрическая смесь). Реакция изучалась в интервале температур 20–800° С.

Как указывалось выше, необработанная железная полоска неактивна по отношению к реакции разложения аммиака. Только после прогрева в водороде железная полоска становится активной по отношению к этой реакции, и эта активность сохраняется при нахождении полоски в атмосфере водорода. Как и следовало ожидать, железо, активное по отношению к реакции разложения аммиака, оказалось также активным и по отношению к реакции синтеза аммиака. Об активности катализатора по отношению к реакции синтеза аммиака можно было судить по зависимости $I(T)$ для ионов NH_3^+ . Как видно из рис. 15, при температуре $\sim 200^\circ$ С на поверхности катализатора делается заметным присутствие молекул NH_3^* . При дальнейшем повышении температуры катализатора покрытие его поверхности молекулами NH_3 достигает максимума при температуре $\sim 400^\circ$ С, а затем монотонно уменьшается.

Процесс синтеза аммиака исследовался также в смеси $D_2 + N_2^{15}$. В этом случае образование аммиака на поверхности катализатора констатировалось по появлению ионов с массой $21(N^{15}D_3^+)$. Ионы $N^{15}D_3^+$ появлялись при температуре $\sim 150^\circ$ С. Ход кривой $I(T)$ для ионов $N^{15}D_3^+$ вполне подобен ходу соответствующей кривой для ионов NH_3^+ .

Для выяснения характера элементарных процессов, имеющих место на поверхности катализатора, были получены кривые $I(T)$ для ионов NH_3^+ , NH_2^+ , NH^+ , характеризующие молекулу NH_3 и ее осколки, возникающие при взаимодействии с ней первичного иона, и кривые для ионов H_2^+ , H^+ , N_2^+ , N^+ , характеризующие молекулы реагирующих газов и их

* Эмиссия вторичных ионов с массой 17 (ионы OH^+) при температурах ниже 200° С связана с наличием на поверхности катализатора адсорбированных молекул H_2O . Уменьшение интенсивности пучка ионов OH^+ в интервале температур $20 < T < 200^\circ$ С связано с десорбцией молекул H_2O с поверхности активного катализатора. Ход кривой $I(T)$ для ионов OH^+ в случае неактивного катализатора можно понять, если иметь в виду, что в атмосфере водорода происходит восстановление окислов на поверхности железа, сопровождающееся появлением на его поверхности молекул H_2O .

осколки. Кроме того, выяснилось, что при протекании на поверхности катализатора реакции синтеза аммиака с нее выбиваются ионы FeN_2^+ . Была получена кривая $I(T)$ и для этих ионов.

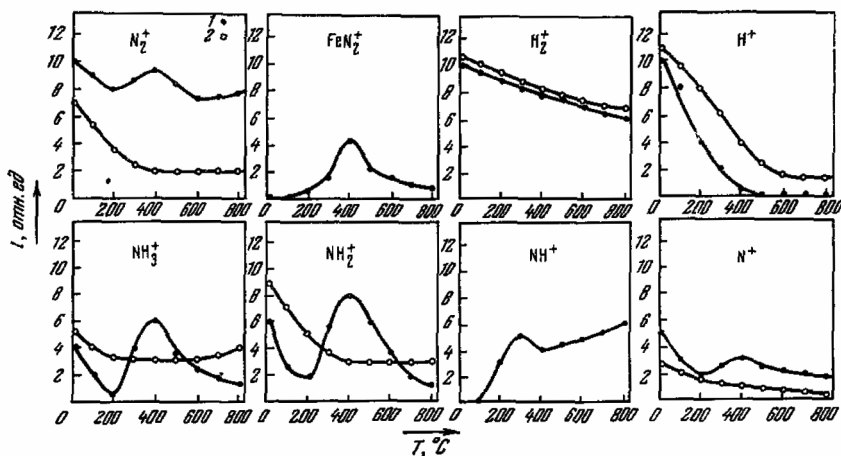


Рис. 15.

Кривые $I(T)$ (в относительных единицах) для вторичных ионов (в случаях активного (I) и неактивного (2) катализатора) в смеси азота и водорода при $p_{\text{N}_2} = 3 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. и $p_{\text{H}_2} = 9 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.

Представляло интерес выяснить, по какому из двух механизмов протекает реакция синтеза аммиака, по механизму Ленгмюра – Хиншельвуда (реагирующие частицы вступают в реакцию на поверхности катализатора) либо по механизму Райдила (одна из реагирующих частиц адсорбирована на поверхности катализатора, а другая, вступая с ней в реакцию, приходит из газовой фазы). Для этой цели были получены кривые зависимости интенсивности пучка ионов NH_3^+ от давления водорода и азота. Такие же кривые были получены для иона FeN_2^+ .

На рис. 15 и 16 приведены соответственно кривые $I(T)$ и $I(p)$ для перечисленных выше ионов.

В условиях реакции синтеза аммиака на железе, так же как и в случае раздельной адсорбции азота и водорода [55], не наблюдается диссоциации

молекул N_2 и H_2 на атомы. Этот вывод следует из рассмотрения кривых $I(T)$ для ионов N_2^+ , N^+ , H_2^+ и H^+ на рис. 15. Из формы кривой $I(T)$ для ионов N_2 можно сделать вывод, что эти ионы выбиваются как из адсорбированных молекул N_2 , так и из молекул нитрида FeN_2 . Рост интенсивности пучка ионов N_2^+ при температурах выше $600^\circ C$ связан с увеличением покрытия поверхности катализатора молекулами N_2 , образующимися в реакции разложения аммиака.

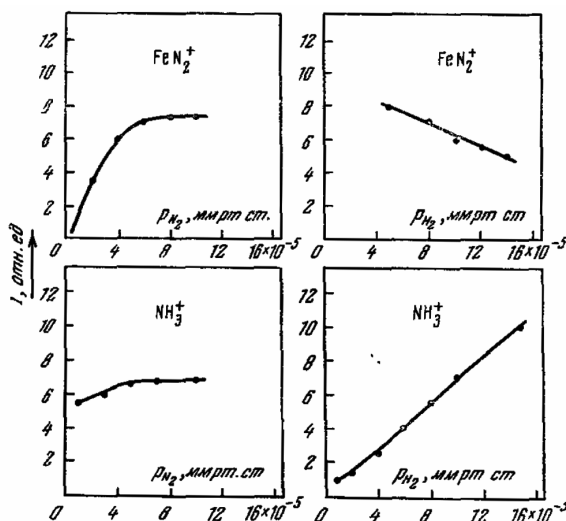


Рис. 16.

Кривые $I(p)$ (в относительных единицах)

для вторичных ионов NH_3^+ и FeN_2^+ при $T = 400^\circ C$.

Очень важным обстоятельством является то, что ход кривых $I(T)$ для ионов NH_3^+ и FeN_2^+ одинаков. Подобие формы кривых $I(T)$ для этих ионов можно объяснять двояко: 1) возникающие на поверхности катализатора молекулы NH_3 вступают с ним в реакцию, образуя молекулы нитрида железа FeN_2 , и 2) азот, хемосорбируясь на поверхности катализатора, образует FeN_2 , а затем гидрирование хемосорбированного азота приводит к появлению молекулы NH_3 . Первое из этих объяснений следует отбро-

силь. так как результаты работы по разложению аммиака показывают, что, во-первых, при воздействии аммиака на поверхность активного катализатора возникает нитрид железа FeN и, во-вторых, при температурах выше 500°C количество молекул FeN на поверхности катализатора делается исчезающе малым. Таким образом, остается только вторая возможность объяснения образования FeN_2 на поверхности катализатора, т. е. оказывается, что образование нитрида железа FeN_2 является первой стадией реакции синтеза аммиака.

Относительно второй стадии реакции синтеза аммиака можно сделать определенное заключение из сопоставления кривых $I(T)$ для ионов NH_3^+ , NH_2^+ и NH^+ . Отношение $I_{\text{NH}_2^+}/I_{\text{NH}_3^+}$ в интервале температур $20\text{--}800^\circ \text{C}$ не зависит от температуры катализатора. Отсюда можно сделать вывод, что ион NH_2^+ является осколком молекулы NH_3 , возникающим при диссоциативной ионизации этой молекулы ударом первичного иона.

Отношение $I_{\text{NH}_2^+}/I_{\text{NH}_3^+}$ изменяется с изменением температуры катализатора во всем интервале температур $20\text{--}800^\circ \text{C}$. Это означает, что ион NH^+ выбивается не только из молекулы NH_3 , но и из какой-то другой частицы. Такой частицей может быть только радикал NH . Этот радикал, как было показано выше, появляется на поверхности катализатора в результате реакции разложения аммиака. Однако было установлено [54], что реакция разложения аммиака идет с заметной скоростью при температурах выше 500°C . Таким образом, при температурах ниже 500°C частица NH должна появляться на поверхности катализатора и результате другого процесса. Таким процессом является гидрирование поверхностного нитрида FeN_2 , т. е. частица NH возникает в результате реакции

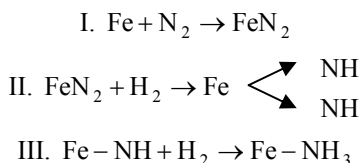
$$\text{FeN}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{Fe} \begin{matrix} \nearrow \text{NH} \\ \searrow \text{NH} \end{matrix}.$$

С этой точки зрения форма кривой $I(T)$ для

ионов NH^+ объясняется следующим образом. В интервале температур $100\text{--}400^\circ \text{C}$ определяющую роль в ходе этой кривой играют комплексы $\text{Fe} - \text{NH}$ и молекулы NH_3 на поверхности катализатора. В этом интервале температур ионы NH^+ выбиваются только из этих частиц. При температурах выше 400°C на поверхности катализатора появляются частицы NH вследствие того, что скорость реакции разложения аммиака делается

заметной. С повышением температуры скорость реакции разложения аммиака возрастает (см. рис. 13). Это и служит причиной появления растущей ветви на кривой $I(T)$ для ионов NH^+ в области температур выше 500°C .

Очевидно, что третьей стадией реакции синтеза аммиака, является гидрирование радикала NH по схеме $\text{Fe}-\text{NH} + \text{H}_2 \rightarrow \text{Fe}-\text{NH}_3$. Образующаяся молекула NH_3 в дальнейшем может десорбироваться в газовую фазу. Таким образом, на основании совокупности кривых $I(T)$ на рис. 15 можно сделать заключение, что реакция синтеза аммиака на железе состоит из следующих, стадий:



Рассмотрение кривых $I(p)$ на рис. 16 также дает возможность сделать некоторые выводы. Как видно из этого рисунка, покрытие катализатора молекулами нитрида FeN_2 с повышением давления азота достигает насыщения. Аналогичное обстоятельство имеет место и для зависимости покрытия поверхности катализатора молекулами NH_3 . Однако выход аммиака линейно возрастает с увеличением давления водорода. На основании этих данных можно сделать заключение, что реакция синтеза аммиака на железе идет по механизму Райдила. В реакцию вступают молекулы N_2 , хемосорбированные на поверхности катализатора, и молекулы водорода, приходящие из газовой фазы. Можно понять, почему покрытие катализатора хемосорбированным азотом уменьшается с увеличением давления водорода (кривая $I(p_{\text{H}_2})$ для ионов FeN_2^+ на рис. 16). Это происходит потому, что с увеличением давления водорода часть молекул хемосорбированного азота превращается в молекулы аммиака. Таким образом, следует ожидать, что на кривой $I(p_{\text{H}_2})$ для ионов NH_3^+ при более высоких давлениях должно будет наблюдаться уменьшение скорости роста числа молекул NH_3 с увеличением давления водорода. Это означает, что для увеличения выхода аммиака необходимо будет увеличивать не только давление водорода, но и давление азота.

Благодаря огромному промышленному значению реакции синтеза аммиака кинетика этой реакции подробно изучена. Вследствие малого выхода аммиака при низких давлениях азотно-водородной смеси кинетика синтеза аммиака изучалась при атмосферном и более высоких давлениях. В большинство случаев в качестве катализатора использовался дважды промотированный катализатор промышленного типа.

Имеющиеся в литературе данные о механизме синтеза аммиака основаны на указанных выше кинетических измерениях, а также на исследованиях адсорбции азота, водорода и аммиака. К настоящему времени на основе этих косвенных данных существует два основных представления о механизме синтеза аммиака. Одно из них поддерживается Хориути и его школой [57] и заключается в том, что азот и водород, адсорбированные на поверхности катализатора, диссоциируют на атомы. Синтез аммиака осуществляется в несколько стадий путем ассоциации одного атома азота и трех атомов водорода.

Другое представление на основании многолетних исследований выдвинуто М. И. Темкиным и его школой [58–60]. Согласно этому представлению первой стадией реакции синтеза аммиака является хемосорбция молекулярного азота. Во второй стадии хемосорбированный азот гидрируется и образуется адсорбированный радикал NH , и наконец, при втором гидрировании этого радикала образуется молекула NH_3 (третья стадия), которая затем и десорбируется в газовую фазу.

Результаты настоящей работы полностью противоречат представлениям школы Хориути о механизме синтеза аммиака. В процессе реакции синтеза не наблюдалось образования атомов H , N и частиц NH_2 , которые должны были бы присутствовать на поверхности катализатора, если бы реакция синтеза протекала через стадии, предложенные Хориути^{*}.

С другой стороны, существует полное совпадение схемы элементарных процессов при протекании реакции синтеза аммиака, установленной в настоящей работе с аналогичной схемой, предлагаемой М. И. Темкиным и его сотрудниками. Из этого совпадения можно сделать очень важный вывод о том, что механизм реакции синтеза аммиака не зависит от давления смеси реагирующих газов в интервале давлений от 10^{-4} мм рт. ст. и до

^{*} Ошибочность представления Хориути о механизме синтеза аммиака была также установлена в докладе Танака на III Международном конгрессе по катализу (см. отчет Г. К. Борескова [61] об этом конгрессе).

одной атмосферы. По-видимому, этот вывод можно распространить и до давлений порядка сотен атмосфер, поскольку кинетическое уравнение Темкина – Пыжева справедливо и при таких давлениях.

Вывод о независимости механизма каталитической реакции от давления смеси реагирующих газов над поверхностью катализатора вытекает и из общих соображений. Действительно, каталитические процессы протекают в слое газов, адсорбированных на поверхности катализатора. Концентрация вещества в этом слое очень велика и соответствует давлениям газа порядка тысяч атмосфер. Естественно, что увеличение давления смеси реагирующих газов даже до сотен атмосфер не может повлиять на характер элементарных процессов на поверхности катализатора, установившихся при низких давлениях. Указанное обстоятельство сильно увеличивает ценность метода вторичной ионно-ионной эмиссии, поскольку возникает возможность механизма каталитической реакции, определенный с помощью этого метода при давлениях порядка 10^{-4} мм рт. ст., приписывать этой же реакции, протекающей в промышленных условиях при высоких давлениях.

О характере информации, которую может дать метод вторичной ионной эмиссии при изучении газовой коррозии, можно получить представление по излагаемым ниже результатам исследования взаимодействия кислорода с ниобием [32].

Коррозионные процессы существенно отличаются от каталитических тем, что они протекают не в мономолекулярном слое, как эти последние, но, начинаясь на поверхности металла, затем благодаря диффузии реагирующих частиц распространяются в глубь металла, что приводит к образованию окисной пленки значительной толщины. Структура и химический состав слоев окисной пленки на поверхности металлов успешно изучаются рядом методов. С другой стороны, существующие методы изучения коррозии не дают возможности изучить начальную стадию коррозионного процесса, т. е. стадию образования поверхностных химических соединений *. Вторичные ионы химических соединений металла с молекулами окружающей его газовой среды, наблюдающиеся в спектре вторичной ионной эмиссии, вероятнее всего, возникают при взаимодействии первичных ионов с поверхностным,

* Не исключена возможность применения метода поглощения инфракрасных лучей к изучению газовой коррозии. Однако ввиду специфических трудностей подготовки образцов для изучения поверхностных процессов этим методом он едва ли сможет приобрести универсальное значение в исследованиях начальной стадии коррозионных процессов.

возможно, мономолекулярным, слоем на поверхности металла. Именно благодаря этому обстоятельству изучение зависимости интенсивности пучков этих вторичных ионов от температуры металла, рода и давления газовой среды позволяет получить сведения относительно начальной стадии коррозионных процессов, что и подтверждается изложенными ниже результатами исследования системы ниобий – кислород.

Ниобиевая полоска, помещенная в камеру мишени, сначала в течение десяти минут прогревалась в вакууме при температуре 2000°C . Затем после ее остывания до комнатной температуры исследовался масс-спектр вторичных ионов, выбитых с ее поверхности. В масс-спектре вторичных ионов, кроме положительных и отрицательных ионов, связанных с наличием на поверхности ниобия адсорбированных молекул остаточных газов наблюдались еще ионы, связанные с наличием окислов на его поверхности (Nb^+ , NbO^+ , NbO_2^+ , Nb_2O^+ , Nb_2O_2^+ , Nb_2O_3^+ , Nb_2O_4^+ , Nb_2O_5^+).

Нагрев ниобиевой полоски в атмосфере остаточного газа до температуры 2000°C приводит к исчезновению эмиссии всех вторичных ионов, кроме эмиссии ионов Nb^+ . Интенсивность пучка ионов Nb^+ при температуре 2000°C уменьшается на два порядка по сравнению с таковой при комнатной температуре. Исчезновение эмиссии вторичных ионов дает основание утверждать, что поверхность Nb, нагретая до 2000°C в остаточном газе при давлении $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст., очищается от адсорбированных частиц и окислов. Не зависящая от температуры в интервале $1500\text{--}2000^{\circ}\text{C}$ эмиссия вторичных ионов Nb^+ связана с выбиванием этих ионов из решетки металла. После остывания образца до комнатной температуры эмиссия всех вторичных ионов полностью восстанавливалась.

Некоторые суждения о составе окислов на поверхности Nb в атмосфере остаточного газа и кислорода при давлении $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. при различных температурах ниобиевой полоски можно высказать на основании рассмотрения рис. 5. На этом рисунке представлены кривые $I(T)$ для ионов, связанных с окислами на поверхности ниобия. Эти кривые были получены следующим образом. Сначала ниобиевая полоска нагревалась до температуры 2000°C и тем самым ее поверхность очищалась от адсорбированных частиц и окислов. Затем температура полоски снижалась ступеньками до комнатной. В ряде точек температурного интервала $20\text{--}2000^{\circ}\text{C}$ производилось измерение интенсивности пучков исследуемых вторичных ионов, т. е. получались кривые $I(T)$ при снижении температуры

ниобиевой полоски. После достижения комнатной температуры производилось повышение температуры ниобия и снова снимались кривые $I(T)$ вплоть до температуры 2000°C . Оказалось, что кривые $I(T)$, полученные при снижении температуры ниобия от 2000°C , и кривые, полученные затем при повышении температуры от 20 до 2000°C , в пределах ошибки эксперимента совпадают. Подобные обстоятельства имели место как в атмосфере остаточного газа, так и в атмосфере кислорода при давлении $5 \cdot 10^{-5}$ мм. рт. ст. Из приведенных фактов следует вывод, что в описанных выше условиях эксперимента чистая вначале поверхность Nb проходит при охлаждении через ряд состояний, которые затем воспроизводятся при последующем нагревании*.

Рассмотрение кривых $I(T)$ на рис. 5 позволяет сделать некоторые выводы. Форма кривых $I(T)$ для пар ионов NbO^+ и Nb^+ , Nb_2O_3^+ и Nb_2O^+ , Nb_2O_5^+ и Nb_2O_4^+ одинакова. С другой стороны, каждая пара указанных ионов имеет свою характерную форму кривой $I(T)$, отличную от формы соответствующих кривых других пар. Отсюда можно заключить, что ионы NbO^+ и Nb^+ выбиваются из окисла NbO, ионы Nb_2O_3^+ и Nb_2O^+ – из окисла Nb_2O_3 и ионы Nb_2O_5^+ и Nb_2O_4^+ из окисла Nb_2O_5 . Форма кривой $I(T)$ для иона NbO_2^+ отличается от формы всех других кривых $I(T)$, из чего можно сделать вывод, что ионы NbO_2^+ выбиваются из окисла NbO_2 . Таким образом, из анализа кривых $I(T)$, приведенных на рис. 5, можно сделать вывод, что в определенном температурном интервале ($20\text{--}2000^\circ\text{C}$ при давлении кислорода $5 \cdot 10^{-5}$ мм. рт. ст.) на поверхности Nb находятся окислы NbO, Nb_2O_3 , NbO_2 и Nb_2O_5 †.

Относительная концентрация этих окислов на поверхности Nb зависит от температуры его поверхности и давления кислорода. Влияние дав-

* Визуальное наблюдение ниобиевой полоски, извлеченной из камеры после проведения описанного выше эксперимента, показывает, что она сохранила металлический блеск. На микрофотографии поверхности полоски не наблюдалось островков окислов.

† Ход кривых $I(T)$ для ноиов NbO^- , NbO_2^- и Nb_2O_3^- такой же, как и соответствующих кривых для ионов Nb_2O_5^+ и Nb_2O_4^+ . По-видимому, эти ионы также выбиваются из поверхностного окисла Nb_2O_5 .

ления кислорода на концентрацию того или иного окисла на поверхности ниобия иллюстрируется кривыми $I(T)$ для иона $Nb_2O_3^+$, полученными при различных давлениях кислорода (см. рис. 5). Как видно из этого рисунка, максимум на кривой $I(T)$ смещается в сторону более высоких температур при увеличении давления кислорода.

В масс-спектре ионизации газовой фазы были обнаружены только ионы NbO^+ . Наличие этих ионов в масс-спектре свидетельствует о десорбции окисла NbO с поверхности Nb. Как видно из рис. 17, б (пунктирная кривая), эта десорбция начинает наблюдаться с температуры 1400°C , и с дальнейшим повышением температуры скорость десорбции быстро возрастает. Наряду с десорбцией молекул NbO в нейтральном состоянии наблюдается также десорбция ионов NbO^+ и Nb^+ (сплошные кривые на рис. 17, б)*. Ток термоэмиссии ионов NbO^+ и Nb^+ увеличивается с увеличением давления кислорода (кривые $I(p_{O_2})$ для термоионов NbO^+ и Nb^+ на рис. 17, а). В атмосфере остаточного газа при температуре 2000°C десорбция молекул NbO и ионов NbO^+ не наблюдается, соответственно этому не наблюдается и эмиссия вторичных ионов NbO^+ . С увеличением парциального давления кислорода на поверхности Nb образуется окисел NbO, о чем свидетельствует появление эмиссии вторичных ионов NbO^+ и десорбция молекул NbO и ионов NbO^+ в газовую фазу. Данные эксперимента, иллюстрируемого кривыми $I(T)$ и $I(p_{O_2})$ на рис. 17, показывают, что при высоких температурах Nb и низких давлениях кислорода коррозионный износ Nb происходит вследствие образования на его поверхности окисла NbO и дальнейшего его испарения в газовую фазу.

Некоторые интересные явления, имеющие место при взаимодействии кислорода с поверхностью нагретого Nb, иллюстрируются кривыми на рис. 18. На этом рисунке представлены кривые $I(T)$ для ионов O_2^+ и O^+ как вторичных, так и полученных ионизацией газовой фазы. Для сопоставления на этом же рисунке приведены также кривые $I(T)$ для вторичных ионов NbO_2^+ и NbO^+ . Сравнение кривых $I(T)$ для ионов O_2^+ и O^+ позволяет сделать заключение о том, что на поверхности Nb в интервале температур от 20°C до примерно 800°C идет процесс превращения молекулярного

* Термоэмиссия ионов Nb^+ и NbO^+ с поверхности раскаленного ниобия наблюдалась также в работе [62].

кислорода в атомарный с последующей десорбцией атомарного кислорода в газовую фазу.

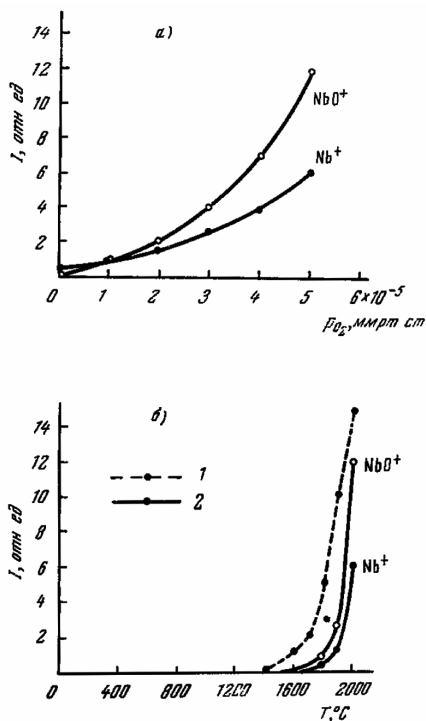


Рис. 17.

а) Зависимости $I(p_{O_2})$ при $T = 2000^\circ \text{C}$ для ионов термоэмиссии Nb^+ и NbO^+ .

б) Зависимости $I(T)$ для ионов Nb^+ и NbO^+ при $p_{O_2} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ мм. рт. ст.}$,

1 – ионы NbO^+ ионизации газовой фазы, 2 – термоионы.

Едва ли это превращение представляет собой каталитическую диссоциацию кислорода на поверхности Nb, так как при таком предположении остается непонятным, почему этот процесс имеет максимум при температуре 300°C . С другой стороны, обращает на себя внимание факт близкого подобия форм кривых $I(T)$ для ионов O^+ , NbO_2^+ и NbO^+ . На основании этого факта можно выдвинуть предположение, объясняющее явление превращения молекулярного кислорода в атомарный на поверхности Nb. Это предположение заключается в следующем. Молекула O_2 , взаимодей-

ствуя с поверхностью Nb, образует окисел NbO_2 . Этот окисел частично распадается по схеме $\text{NbO}_2^+ \rightarrow \text{NbO} + \text{O}$, и образующийся атомарный кислород десорбируется в газовую фазу. Таким образом, превращение молекулярного кислорода в атомарный происходит в результате реакции окисления Nb и последующего распада образующегося окисла. Описанные выше эксперименты показывают, что использование метода вторичной ионной эмиссии дает возможность исследовать начальную стадию окисления ниобия. Этот метод был также применен для исследования взаимодействия кислорода с серебром [28] и железом [31].

В заключение настоящего раздела статьи рассмотрим некоторые критические замечания, которые могут быть сделаны по поводу применения метода вторичной ионной эмиссии к изучению поверхностных процессов.

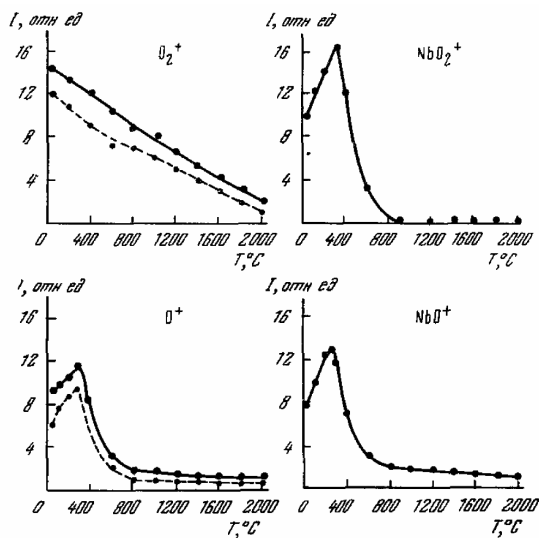


Рис. 18.

Зависимости $I(T)$ для ионов O^+ , O_2^+ , NbO^+ , NbO_2^+ .

Сплошные кривые для вторичных ионов, пунктирные — для ионов ионизации газовой фазы.

Одно из таких замечаний связано с формой кривых $I(T)$. Количество вторичных ионов N_i связано с поверхностной концентрацией частиц N , из которых они выбиваются соотношением

$$N_i = \alpha_i N, \quad (4)$$

где α_i – вероятность выбивания ионов. Интерпретация результатов, полученных методом вторичной ионной эмиссии, базируется на предположении о том, что зависимость величины N_i от температуры связана с зависимостью от температуры поверхностной концентрации N . Считается, что величина α_i не зависит от температуры. Если бы эта величина существенно зависела от температуры, то это сильно усложнило бы интерпретацию результатов, полученных методом вторичной ионной эмиссии.

Возникает вопрос о том, в какой мере справедливо предположение о независимости вероятности выбивания ионов от температуры. Прямой ответ на этот вопрос мог бы дать эксперимент, в котором бы одновременно измерялись и количество выбитых вторичных ионов, и поверхностная концентрация частиц, из которых они выбиваются. Эксперимент такого характера довольно труден и еще не производился. Однако есть много экспериментальных данных, которые косвенным образом подтверждают предположение о независимости (или слабой зависимости) вероятности выбивания вторичных ионов от температуры. Случай, когда $N = \text{const}$, реализуется для поверхности металла, очищенной от адсорбированных частиц и поверхностных соединений. Такой случай имеет место для Nb, находящегося в атмосфере остаточного газа в интервале температур 1500–2000° С (см. рис. 5). Как видно из этого рисунка, интенсивность пучка ионов Nb^+ в указанном интервале температур постоянна, что свидетельствует о постоянстве вероятности их выбивания. Ниже 1500° С на поверхности ниобия появляется окисел NbO , из которого также выбиваются ионы Nb^+ , и интенсивность пучка ионов Nb^+ начинает изменяться с температурой соответственно изменению покрытия поверхности ниобия окислом NbO , что видно из сопоставления кривых $I(T)$ для ионов Nb^+ и NbO^+ . Пример подобного рода дает также кривая $I(T)$ для ионов Mo^+ [21, 23]. После очистки поверхности молибдена от окислов интенсивность пучка ионов Mo^+ при дальнейшем повышении температуры перестает изменяться.

Если бы существовала зависимость вероятности выбивания вторичных ионов от температуры, то эта зависимость имела бы монотонный характер, однако есть много случаев, когда кривые $I(T)$ имеют немонотонный ход, который может быть объяснен только соответствующими изменениями

поверхностной концентрации молекул адсорбированных газов и молекул поверхностных соединений. Таковы, например, кривые $I(T)$ для ионов H_2O^+ при окислении аммиака на платине [51], для ионов C_2^- в случае неактивированного катализатора при разложении аммиака [30] (см. рис. 3), для ионов H_2O^+ в реакции $\text{NO} + \text{NH}_3$ [53] и т. д. С другой стороны, в большом числе случаев наблюдается монотонное уменьшение интенсивности пучка вторичных ионов с увеличением температуры мишени, связанное с десорбцией в газовую фазу частиц, ответственных за эмиссию вторичных ионов. Указанные факты позволяют утверждать, что температурная зависимость вероятности выбивания вторичных ионов едва ли может повлиять на выводы, которые делаются на основании формы кривых $I(T)$.

Как указывалось выше, при взаимодействии первичного иона с молекулой, находящейся на поверхности металла, выбиваются не только вторичные ионы, соответствующие нерасщепившейся молекуле, но и осколочные ионы, связанные с процессом диссоциации молекулы ударом первичного иона. Возникает вопрос о том, в какой мере процесс диссоциации молекул ударом первичного иона может влиять на интерпретацию результатов, полученных методом вторичной ионной эмиссии. В частности, можно ли однозначно установить происхождение осколочных ионов, имея в виду, что диссоциация адсорбированной молекулы может произойти и за счет действия адсорбционных сил, и эти ионы могут выбиваться из осколка молекулы, диссоциированной при адсорбции. В работе [51] указан критерий, с помощью которого можно установить, является ли данный вторичный ион фрагментом более сложной молекулы или его присутствие в масс-спектре связано с существованием на поверхности твердого тела молекулы одинакового с ним состава.

Наконец, следует рассмотреть вопрос о возможном влиянии бомбардировки мишени пучком первичных ионов на протекающие на ее поверхности процессы.

Уменьшение влияния первичного пучка на изучаемые процессы может быть достигнуто путем осуществления следующих условий эксперимента:

- а) выбором химически инертных, слабо адсорбирующихся на поверхности металла частиц первичного пучка,
- б) уменьшением плотности тока бомбардируемых ионов,
- в) уменьшением скорости бомбардирующих ионов,

г) уменьшением времени действия бомбардирующих ионов на поверхность, т. е. проведением измерений в режиме коротких импульсов тока первичного пучка.

Можно утверждать, что условия, в которых метод вторичной ионной эмиссии применялся к изучению поверхностных процессов (ионы Ag^+ со скоростью $3,2 \cdot 10^7$ см/сек, плотность тока 10^{-8} а/мм², непрерывный режим), не повлияли на течение этих процессов. Это утверждение, например, основано на том, что в случае окисления аммиака на платине кривые $I(T)$ для вторичных и газовых ионов NO^+ одинаковы (см. рис. 1 в работе [51]). Легко понять, что изменение скорости окисления аммиака с температурой для той части поверхности катализатора, которая бомбардируется ионным пучком, описывается кривой $I(T)$ для вторичных ионов NO^+ . Кривая $I(T)$ для газовых ионов NO^+ дает зависимость скорости реакции от температуры катализатора для всей остальной поверхности катализатора, площадь которой была примерно в 50 раз больше, чем площадь катализатора, бомбардируемая ионным пучком. Подобные обстоятельства имели место и для других исследованных реакций, например, при образовании N_2 в каталитической реакции между окисью азота и аммиаком [53].

Подводя итог всему, что было изложено в этом разделе настоящей статьи, можно утверждать, что новый метод исследования поверхностных процессов, основанный на использовании явления вторичной ионной эмиссии, дает новую и ценную информацию, и поэтому целесообразно его дальнейшее развитие и усовершенствование с целью последующего применения к широкому кругу адсорбционных, каталитических и коррозионных процессов.

б) Ионный микроскоп, основанный на явлении вторичной ионной эмиссии

Вторичные ионы, выбитые с поверхности твердого тела первичным пучком, можно сфокусировать с помощью системы электростатических линз, применяемых в электронных микроскопах, и получить увеличенное изображение поверхности мишени на экране. Полученное изображение будет образовано всеми вторичными ионами. Однако если сфокусированный электростатическими линзами пучок вторичных ионов пропустить через магнитную призму, то можно получить изображение поверхности мишени на экране, образованное ионами определенной массы. Величина

массы иона, с помощью которого получается изображение, определяется напряженностью поля магнитной призмы. Изменением направления электрического и магнитного полей можно получить изображение как с помощью положительных, так и отрицательных ионов.

Эта идея была применена в ионном микроскопе, основанном на явлении вторичной ионной эмиссии, построенном во Франции в Национальном институте прикладных наук [63] и на кафедре физики твердого тела Парижского университета [64, 65]. Ниже будет приведено описание ионного микроскопа, осуществленного в Парижском университете.

На рис. 19 приведена принципиальная схема ионного микроскопа, основанного на явлении вторичной ионной эмиссии. Пучок ионов Ag^+ с энергией 10 кэВ падает на поверхность мишени M . Пучок вторичных ионов, выбитых из мишени, ускорится и фокусируется электростатической линзой L_1 . В фокусе этой линзы S расположена диафрагма D_1 . Назначение диафрагмы – уменьшить разброс по составляющей скорости, перпендикулярной к оси пучка, в пучке, прошедшем через диафрагму. Магнитная призма P служит для выделения из пучка сфокусированных вторичных ионов компоненты с определенной массой. Углы входа пучка в магнитное поле и выхода из него подобраны такими, что имеет место фокусировка красным магнитным полем по двум направлениям – по направлению напряженности магнитного поля и в направлении ему перпендикулярном. Астигматизм магнитной призмы, возникающий от того, что фокальные точки для этих двух направлений не совпадают, исправляется приложением добавочного электрического поля между сеткой S и выходной щелью магнитной призмы D_2 . Пучок ионов определенной массы, пройдя через щель D_2 , с помощью электростатической линзы L_2 фокусируется на катод ионно-электронного преобразователя K . Электростатическая линза L_3 создает с помощью электронов, выбитых из катода K , изображение поверхности мишени на флуоресцирующем экране $\mathcal{E}$. Через боковое смотровое окно это изображение может быть сфотографировано. Описанный ионный микроскоп может быть легко превращен в масс-спектрометр, если после щели D_2 поместить цилиндр Фарадея для измерения ионного тока. Именно на таком приборе была выполнена работа [26].

Ионный микроскоп, основанный на явлении вторичной ионной эмиссии, может быть с успехом использован для исследования неоднородных поверхностей. В качестве иллюстрации возможностей ионного микроскопа авторы работы [64] приводят три снимка поверхности сплава $\text{Al} - \text{Mg} - \text{Si}$ (рис. 20), полученные с помощью ионов: $^{24}\text{Mg}^+$ (1), Al^+ (2) и $^{28}\text{Si}^+$ (3). Каждый из этих снимков дает распределение соответствующей компоненты сплава на поверхности образца. Авторы этой работы указывают, что с помощью построенного ими ионного микроскопа можно достигнуть разрешения порядка $0,03 \text{ микрона}$.

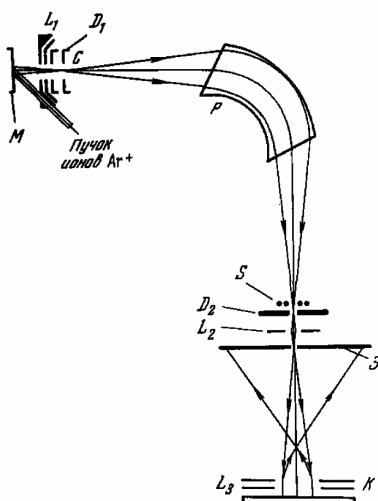


Рис. 19.

Рассмотренная выше конструкция ионного микроскопа, несомненно, окажется очень полезной при изучении адсорбционных и каталитических процессов на неоднородных поверхностях. В частности, можно указать на один очень важный опыт, который можно произвести с помощью такого ионного микроскопа. Одной из теорий катализа является так называемая теория активных центров. Сущность этой теории заключается в предположении, что каталитической активностью обладает не вся поверхность катализатора, а только определенные её участки – активные центры. Относительно физической природы активных центров нет единого мнения.



Рис. 20.

До сих пор не было дано прямого экспериментального доказательства существования активных центров. С помощью ионного микроскопа, основанного на явлении вторичной ионной эмиссии, можно сделать попытку решить вопрос о существовании активных центров. На примере реакции синтеза аммиака на железе можно пояснить, каким образом можно произвести рассматриваемый опыт. В процессе синтеза аммиака на железе на поверхности катализатора появляются молекулы FeN_2 , о чем свидетельствует появление эмиссии вторичных ионов FeN_2^+ (см. рис. 15, 16). Легко понять, что молекулы FeN_2 появляются на каталитически активных участках поверхности железа. Если теперь в качестве объекта ионного микроскопа взять железный катализатор и получить снимок его поверхности в процессе синтеза аммиака с помощью ионов FeN_2^+ , то этот снимок даст распределение по поверхности катализатора участков, обладающих каталитической активностью.

в) ПРИМЕНЕНИЕ ВТОРИЧНОЙ ИОННОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ АНАЛИЗА СОСТАВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Наличие ионов вещества твердого тела в составе вторичной ионной эмиссии дает основание для разработки метода анализа твердых тел путем измерения интенсивности пучков этих ионов.

Первая попытка произвести анализ сплава Ge – Si по отношению интенсивностей пучков вторичных ионов Ge^+ и Si^+ была сделана в работе [20]. Оказалось, что отношение $I_{\text{Si}^+} / I_{\text{Ge}^+}$ отличается от концентрации Si в сплаве и зависит от энергии первичных ионов. Этот результат не является удивительным, если учесть, что коэффициенты выбивания ионов Ge^+ и Si^+ из сплава Ge – Si могут быть различными, а зависимость их от энергии первичных ионов также может быть неодинаковой.

Некоторые предварительные исследования отношения интенсивностей пучков вторичных ионов компонент бинарных сплавов Cu – Ni и Cu – Al были проведены в работе [26]. Оказалось, что коэффициент выбивания ионов Cu^+ из сплава Cu – Al в 10 раз больше, чем из сплава Cu – Ni. Автор этой работы также пришел к выводу, что величина I_1/I_2 – отношения интенсивностей пучков вторичных ионов компонент сплава не равна отношению S_1/S_2 концентраций компонент сплава.

Отсутствие равенства величин I_1/I_2 и S_1/S_2 не является препятствием для разработки метода анализа, так как можно заранее построить градуировочную

кривую $I_1 / I_2 = f(S_1 / S_2)$ по ряду сплавов с известной концентрацией компонент. Более серьезным затруднением является то, что ионы вещества твердого тела выбиваются не только из его решетки, но и из химических соединений его атомов с молекулами окружающего остаточного газа. Это означает, что в конкретном случае бинарного сплава отношение I_1/I_2 будет зависеть от состояния его поверхности, иначе говоря, от покрытия поверхности молекулами химических соединений атомов сплава с молекулами остаточного газа. Необходимо специальное исследование для выяснения условий (температуры мишени, давления и состава остаточного газа), при которых величина I_1/I_2 будет с достаточной точностью воспроизводиться. Только при этих условиях имеет смысл строить градуировочную кривую $I_1 / I_2 = f(S_1 / S_2)$ для дальнейшего ее использования в аналитических целях. Исследования подобного рода пока еще не были проведены.

Исследование спектра вторичной ионной эмиссии может оказаться перспективным для качественного, а возможно, и количественного определения малых примесей в металлах. Некоторое представление о возможностях метода вторичной ионной эмиссии дает предварительное исследование, проведенное в лаборатории автора настоящей статьи. Исследовалась стальная лента со следующим содержанием примесей: C – 0,39%, Mn – 0,45%, Cr – 0,28%, P – 0,016%, Si – 0,01%. В масс-спектре вторичной ионной эмиссии были обнаружены следующие ионы, связанные с наличием примесей в железе: C^+ , C^- , C_2^- , Mn^+ , MnO^+ , MnO^- , Cr^+ , $Cr_2O_3^+$, P^- , PO_2^- , PO_3^- , Si^{*-} . Определение углерода в железе представляет трудности, так как ионы C^+ , C_2^- , C_4^- выбиваются также из молекул углеводородов, адсорбированных на поверхности железа. Что касается всех остальных примесей, то характеризующие их ионы появились в масс-спектре, так что возможность их качественного обнаружения методом вторичной ионной эмиссии можно считать доказанной. Следует, однако, заметить, что благодаря большому различию в коэффициентах выбивания интенсивность пучков ионов примесей не соответствует их содержанию в материале мишени.

* Ион $^{28}Si^+$ нельзя отделить от ионов N_2^+ и CO^+ той же массы. Отрицательный ион массы 28 может принадлежать только кремнию, поскольку ионы N_2^- и CO^- не стабильны [66].

Так, например, в исследованной стальной ленте имелась сравнительно большая примесь хрома и небольшая примесь фосфора. Интенсивность же пучка ионов Cr^+ мала, а пучка ионов P^- значительно больше.

Можно сослаться еще на один опыт, характеризующий возможности метода вторичной ионной эмиссии с точки зрения обнаружения примесей. Исследовалась тонкая пленка селена, испаренная на стеклянную подложку. Селен содержал медь в количестве $3 \cdot 10^{-4}\%$. В масс-спектре мишени были обнаружены пучки ионов изотопов меди. При указанных выше условиях был измерен ток ионов $^{63}\text{Cu}^+ \sim 10^{-14} \text{ а}$. В случае измерения тока ионов $^{63}\text{Cu}^+$ с помощью ионного счетчика [67] можно было бы обнаружить примесь меди в селене с концентрацией по крайней мере на четыре порядка меньшей. Этот пример показывает, что метод вторичной ионной эмиссии при соответствующей его разработке может быть применен для анализа на примеси сверхчистых металлов и полупроводников.

Метод вторичной ионной эмиссии может быть применен и для изотопного анализа образцов. Его возможности в этом отношении исследовались в работах [26, 68].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хотя исследование явления вторичной ионной эмиссии находится в самом начале и необходимы еще обширные и систематические исследования самого явления, чтобы установить его закономерности и создать его теорию, уже на данном этапе выявились важные возможности применения этого явления в различных областях физики и физико-химии. Особенно важным является применение явления вторичной ионной эмиссии к изучению таких процессов, как адсорбция, катализ и газовая коррозия. Не исключена возможность, что при более глубоком изучении вторичной ионной эмиссии будут найдены новые области применения этого явления.

Все это позволяет надеяться на то, что ближайшие годы будут временем интенсивных исследований явления, рассмотренного в настоящей статье.

Харьковский физико-технический
институт АН УССР

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. F. L. Arnot, Nature 138, 162 (1936).
2. F. L. Arnot and M. A. Milligan, Proc. Roy. Soc. A156, 538 (1936).
3. F. L. Arnot, Proc. Roy. Soc. A158, 137 (1937).
4. F. L. Arnot, Proc. Roy. Soc. A158, 157 (1937).
5. F.L. Arnot and C.Becket, Nature 141, 1011 (1938).
6. F. L. Arnot and C. Becket, Proc. Roy. Soc. A168, 103 (1938).
7. R. H. Sloane and R. Press, Proc. Roy. Soc. A168, 284 (1938).
8. В. Л. Грановский, Электрический ток в газе, Гостехиздат, М.-Л., 1952.
9. H. S. W, Massey and E. H. S. Burhop, Electronic and ionic impact phenomena, Oxford, 1952.
10. Ja. M. Fogel, B. T. Nadicto, V. F. Ribalko, R. P. Slabospitsky, I. E. Korobchanskaja and V. I. Shvachko, J. Catalysis 4, ,Ns 2, 153 (1965).
11. В. И. Векслер и Г. Н. Шуппе, ЖТФ 23, 1573 (1953).
12. В. И. Векслер и М. Б. Беньяминович, ЖТФ 26, 1671 (1956).
13. И. М. Митропан и В. С. Гуменюк, ЖЭТФ 32, 214 (1957).
14. И. М. Митропан и В. С. Гуменюк, ЖЭТФ 34, 235 (1958).
15. В. В. Панин, ЖЭТФ 41, 3 (1961).
16. W. Walter and H. Hinterberger, Zs. Natur. 18a, 843 (1963).
17. Я. М. Фогель, Р. П. Слабосницкий и А. Б. Растренин, ЖТФ 30, 63 (1960).
18. Б. М. Батанов, ФТТ 3, 642 (1961).
19. Б. М. Батанов, ФТТ 4, 1778 (1962).
20. R. E. Honig, J. Appl. Phys. 29, 549 (1958).
21. R. C. Bradley, J. Appl. Phys. 30, 1 (1959).
22. R. C Bradley, A. Arking and D. S. Beers, J. Chem. Phys. 33, 764 (1960).
23. Я. М. Фогель, Р. П. Слабосницкий и И. М. Карнаухов, ЖТФ 30, 824 (1960).
24. R. C. Bradley and E. Ruedl, J. Appl. Phys. 33, 880 (1962).
25. V. E. Krohn, J. Appl. Phys. 33, 3523 (1962).
26. J. Guepin, Theses, Paris, Centre D'Orsay, 1963.
27. J. A. Mc Hugh and J.C. Sheffield, J. Appl. Phys. 35, 512 (1964).
28. Я. М. Фогель, Б. Т. Надыкто, В. И. Швачко, В. Ф. Рыбалко, ЖФХ 38, 2397 (1964).
29. Я. М. Фогель, Р. П. Слабосницкий, А. С. Славный, Радиотехника и электроника 8, 684 (1963).

30. Я. М. Фогель, Б. Т. Надыкто, В. Ф. Рыбалко, Р. П. Слабосницкий, И. Е. Коробчанская, В. И. Швачко, Кинетика и катализ 5, 154 (1964).
31. В. И. Швачко, Б. Т. Надыкто, Я. М. Фогель, К. С. Гаргор, ДАН СССР 161, 886 (1965).
32. В. И. Швачко, Б. Т. Надыкто, Я. М. Фогель, Г. Н. Картмазов, Б. М. Васютинский, ФТТ 7, 1944 (1965).
33. D. T. Goldman and A. Simon, Phys. Rev. 111, 289 (1958).
34. R. Bernard, R. Goutte, C. Guillard et R. Javelas, C. R. 253, 1047 (1961).
35. В. И. Векслер, ЖЭТФ 38, 324 (1960).
36. R. Goutte, Theses, Lyon, 1959.
37. L. P. Levine and H. W. Berry, Phys. Rev. 118, 158 (1960).
38. H. E. Stanton, J. Appl. Phys. 31, 678 (1960).
39. Б. В. Панин, ЖЭТФ 42, 313 (1962).
40. F. Kirchner and A. Benninghoven, Phys. Letts. 8, 193 (1964).
41. A. Benninghoven, Ann. Phys. 15, 113 (1965).
42. У. А. Арифов, А. Х. Аюханов, В. А. Шустров, Р. М. Хасанов, В. И. Полторацкий, ДАН СССР, 155, 306 (1964).
43. Р. И. Гарбер и А. И. Федоренко, УФН 83, 385 (1964).
44. C. Brune, Zs. Phys. 147, 161 (1957).
45. М. А. Еремеев, ДАН СССР 79, 775 (1951).
46. У. А. Арифов, А. Х. Аюханов, Изв. АН СССР, сер. физ. 20, 1165 (1956).
47. Я. М. Фогель, А. Г. Коваль, Ю. З. Левченко и А. Ф. Ходячих, ЖЭТФ 39, 548 (1960).
48. Д. В. Пилипенко, Я. М. Фогель, ЖЭТФ 48, 404 (1965).
49. R. Bernard, R. Goutte, C. Guillard et R. Javelas. Electron Microscopie Conference, vol. 1, pp. C-7, Philadelphia, 1962.
50. В. И. Векслер, Изв. АН Узб. ССР Ж 4, 34 (1959).
51. Я. М. Фогель, Б. Т. Надыкто, В. Ф. Рыбалко, В. И. Швачко, И. Е. Коробчанская, Кинетика и катализ 5, 496 (1964).
52. Я. М. Фогель, Б. Т. Надыкто, В. И. Швачко, В. Ф. Рыбалко, И. Е. Коробчанская, ДАН СССР 155, 171 (1964).
53. Я. М. Фогель, Б. Т. Надыкто, В. И. Швачко, В. Ф. Рыбалко, И. Е. Коробчанская, Кинетика и катализ 5, 943 (1964).
54. В. И. Швачко, Я. М. Фогель, Кинетика и катализ 7, № 4 (1966).
55. В. И. Швачко, В. Я. Колот, Я. М. Фогель, Кинетика и катализ 7, № 5 (1966).

56. М. И. Темкин и С. Л. Киперман, ЖФХ 20, 151 (1946).
57. T. Horiuti, N. Takezawa, J. Res. Inst. Catalysis Hokkaido Univ. 8, 170 (1961).
58. М. И. Темкин, Н. М. Морозов, Е. Н. Шапатина, Кинетика и катализ 4, 260 (1963).
59. М. И. Темкин, Н. М. Морозов, Е. Н. Шапатина, Кинетика и катализ 4, 565 (1963).
60. М. И. Темкин, Сб. «Научные основы подбора и производства катализаторов», 46–67, 1964, Новосибирск.
61. Г. К. Боресков, Кинетика и катализ 6, 366 (1965).
62. L. L. Barnes, Phys. Rev. 42, 487 (1932).
63. R. Bernard, R. Goutte, C. Guillaud et R. Javelas, C. R. 246, 2597, (1958).
64. R. Castaing et G. Slodzian, C. R. 255, 1893 (1962).
65. Р. Кастень и Г. Слodziан, Радиотехника и электроника 10, 348 (1965).
66. Я. М. Фогель, В. Ф. Козлов и А. А. Калмыков, ЖЭТФ 36, 1354 (1959).
67. В. Ф. Козлов, В. Я. Колот, А. Н. Довбня, ПТЭ 6, 81 (1965).
68. E. A. White, J. C. Sheffield and F. M. Rourke, J. Appl. Phys. 33, 2915 (1962).

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ Я. М. ФОГЕЛЯ

1. Борисов Н. Д., Фогель Я. М. Количественный рентгеновский анализ хрома в его соединениях методом спектров флуоресценции // Ж. эксперим. и теор. физ. 1935. Т. 5. С. 744.
2. Борисов Н. Д., Фогель Я. М. Светосильный рентгеновский спектрограф с изогнутым кристаллом // Ж. техн. физ. 1937. Т. 7. С. 164.
3. Борисов Н. Д., Фогель Я. М. Применение светосильного спектрографа с изогнутым кристаллом и трубки Ленарда для количественного химического анализа // Ж. техн. физ. 1937. Т. 7. С. 931.
4. Борисов Н. Д., Фогель Я. М. Количественный рентгеновский анализ селена // Заводская лаборатория. 1938.
5. Борисов Н. Д., Фогель Я. М. Применение вакуумного светосильного спектрографа для количественного рентгеновского анализа легких элементов // Ж. техн. физ. 1938. Т. 8. С. 1799.
6. Борисов Н. Д., Фогель Я. М. Несколько замечаний к статье В. Л. Корчагина и И. И. Киселева «Относительная интенсивность линий К-серии железа и серебра» // Ж. эксперим. и теор. физ. 1939. Т. 9. С. 114.
7. Борисов Н. Д., Фогель Я. М. К ответу В. Л. Корчагина на наше замечание по поводу статьи В. Л. Корчагина и И. И. Киселева «Относительная интенсивность линий К-серии железа и серебра» // Ж. эксперим. и теор. физ. 1939. Т. 9. С. 512.
8. Фогель Я. М. Исследование спектральных линий K_{β} -группы кремния в различных его соединениях // Ж. эксперим. и теор. физ. 1939. Т. 9. С. 1217.
9. Фогель Я. М. Влияние химической связи на спектральные линии K_{β} -группы железа // Ж. эксперим. и теор. физ. 1940. Т. 10. С. 1455.
10. Борисов Н. Д., Фогель Я. М. Количественный рентгеновский анализ бинарных сплавов Cu–Zn и Cu–Ni с помощью ионизационного спектрометра // Ж. техн. физ. 1940. Т. 10. С. 1085.
11. Фогель Я. М. Разработка и применение вакуумного светосильного рентгеновского спектрографа для количественного анализа легких элементов и их соединений. Дисс. на соискание степени канд. физ.-мат. наук. Харьков: 1940.

12. Фогель Я. М. Изучение спектральных линий K_{β} -группы серы и некоторых ее соединений // Ж. эксперим. и теор. физ. 1945. Т. 15. С. 545.
13. Фогель Я. М., Брауде С. Я. Гармонические колебания электронов и их применение для генерации сверхвысоких радиочастот // Ж. эксперим. и теор. физ. 1946. Т. 16. С. 187.
14. Фогель Я. М., Борисов Н. Д. Рентгеновские трубки для получения спектров флуоресценции от образцов, находящихся при высокой и низкой температуре // Ж. эксперим. и теор. физ. 1946. Т. 16. С. 1471.
15. Борисов Н. Д., Фогель Я. М. К вопросу применения счетчика Гейгера – Мюллера для химического анализа небольших концентраций элементов в различных объектах // Ж. техн. физ. 1947. Т. 17. С. 599.
16. Корсунский М. И., Фогель Я. М. О фокусировании молекулярного пучка неоднородным магнитным полем // Ж. эксперим. и теор. физ. 1951. Т. 21. С. 25.
17. Фогель Я. М. О движении частиц с магнитным моментом в экспоненциальном магнитном поле // Ж. эксперим. и теор. физ. 1951. Т. 21. С. 38.
18. Фогель Я. М., Крупник Л. И. Образование отрицательных ионов кислорода при столкновениях положительных ионов кислорода с молекулами газов // Ж. эксперим. и теор. физ. 1955. Т. 29. Вып. 2. С. 209–220.
19. Фогель Я. М., Крупник Л. И., Сафронов Б. Г. Захват электронов и ионизация протонами в водороде // Ж. эксперим. и теор. физ. 1955. Т. 28. Вып. 5. С. 589–602.
20. Фогель Я. М., Сафронов Б. Г., Крупник Л. И. Образование отрицательных ионов водорода при прохождении протонов через тонкие металлические фольги // Ж. эксперим. и теор. физ. 1955. Т. 28. Вып. 6. С. 711–718.
21. Фогель Я. М., Лисичкин Г. А., Степанова Г. И. Сверхзвуковое истечение ртутного пара в вакууме // Ж. техн. физ. 1955. Т. 25. С. 1944.
22. Фогель Я. М., Митин Р. В. Образование отрицательных ионов водорода при столкновениях протонов с молекулами газов // Ж. эксперим. и теор. физ. 1956. Т. 30. Вып. 3. С. 450–457.
23. Фогель Я. М., Митин Р. В., Коваль А. Г. Изучение процессов захвата двух электронов при столкновениях положительных ионов углерода

- и кислорода с молекулами газов // Ж. эксперим. и теор. физ. 1956. Т. 31. Вып. 3(9). С. 397–404.
24. Фогель Я. М., Крупник Л. И., Анкудинов В. А. Образование отрицательных ионов водорода при прохождении положительных ионов водорода через сверхзвуковую струю ртутного пара // Ж. техн. физ. 1956. Т. 26. Вып. 6. С. 1209.
25. Корсунский М. И., Фогель Я. М., Быкова Г. А., Лившиц Л. И., Лозовский Н. С., Човник Г. С. Исследование топографии неоднородного плоского магнитного поля шестиполюсного электромагнита // Ж. техн. физ. 1956. Т. 26. С. 1222.
26. Фогель Я. М., Крупник Л. И., Слабоспицкий Р. П. Образование отрицательных ионов водорода при прохождении положительных ионов водорода через сверхзвуковую струю паров масел // Ж. техн. физ. 1957. Т. 27. Вып. 5. С. 981–987.
27. Фогель Я. М., Крупник Л. И., Коваль А. Г., Слабоспицкий Р. П. Состав равновесного пучка, образующегося при прохождении однозарядных положительных ионов кислорода через газовые мишени // Ж. техн. физ. 1957. Т. 27. Вып. 5. С. 988–996.
28. Тимофеев А. Д., Фогель Я. М. О разделении атомного пучка на компоненты с ориентированным спином электронной оболочки с помощью экспоненциального магнитного поля // Ж. техн. физ. 1957. Т. 27. Вып. 9. С. 2129–2133.
29. Фогель Я. М., Анкудинов В. А., Слабоспицкий Р. П. Потеря двух электронов при однократных столкновениях отрицательных ионов водорода с молекулами газов // Ж. эксперим. и теор. физ. 1957. Т. 32. Вып. 3. С. 453–462.
30. Фогель Я. М. О применимости для пучков ионов стационарного состава соотношения детального равновесия // Ж. эксперим. и теор. физ. 1957. Т. 32. Вып. 3. С. 604–605.
31. Фогель Я. М., Митин Р. В., Козлов В. Ф. К вопросу о методике измерения эффективных сечений процессов образования отрицательных ионов при атомных столкновениях // Ж. техн. физ. 1958. Т. 28. Вып. 7. С. 1526.

32. Фогель Я. М., Анкудинов В. А., Пилипенко Д. В., Тополя Н. В. Захват и потеря электрона при столкновениях быстрых атомов водорода с молекулами газа // Ж. эксперим. и теор. физ. 1958. Т. 34. Вып. 3. С. 579–592.
33. Фогель Я. М., Митин Р. В., Козлов В. Ф., Ромашко Н. Д. О применимости адиабатической гипотезы Мессе к процессам двойной перезарядки // Ж. эксперим. и теор. физ. 1958. Т. 35. Вып. 3. С. 565–573.
34. Фогель Я. М., Анкудинов В. А., Пилипенко Д. В. Захват и потеря электрона при столкновениях быстрых атомов углерода и кислорода с молекулами газов // Ж. эксперим. и теор. физ. 1958. Т. 35. Вып. 4. С. 868–874.
35. Фогель Я. М., Тимофеев А. Д. Двойная перезарядка ионов Li^+ при однократных столкновениях с молекулами газов // Учен. записки Харьковского университета. Т. 98. Тр. физ. отдел. физ.-мат. фак. 1958. Т. 7. С. 177–193.
36. Фогель Я. М., Митин Р. В. Двойная перезарядка однозарядных положительных ионов хлора при однократных столкновениях с молекулами газов // Учен. записки Харьковского университета. Т. 98. Тр. физ. отдел. физ.-мат. фак. 1958. Т. 7. С. 195–202.
37. Фогель Я. М., Коваль А. Г., Тимофеев А. Д. Источник отрицательных ионов // Ж. техн. физ. 1959. Т. 29. Вып. 11. С. 1381–1387.
38. Фогель Я. М., Козлов В. Ф., Калмыков А. А., Муратов В. И. Прямое доказательство применимости адиабатического критерия Мессе к процессам двойной перезарядки // Ж. эксперим. и теор. физ. 1959. Т. 36. Вып. 4. С. 1312–1314.
39. Фогель Я. М., Козлов В. Ф., Калмыков А. А. К вопросу о существовании отрицательного иона азота // Ж. эксперим. и теор. физ. 1959. Т. 36. Вып. 5. С. 1354–1356.
40. Коваль А. Г., Крупник Л. И., Тимофеев А. Д., Фогель Я. М. К вопросу о получении пучка отрицательных ионов водорода перезарядкой положительных ионов в канале катода высокочастотного источника // Электростатические генераторы. М.: Атомиздат, 1959. С. 15–22.
41. Фогель Я. М., Слабоспицкий Р. П., Гужовский И. Т. Образование отрицательных ионов гелия, углерода, кислорода и хлора при прохождении

- положительных ионов через сверхзвуковую струю ртутного пара // Электростатические генераторы. М.: Атомиздат, 1959. С. 32–45.
42. Фогель Я. М., Маркус А. М., Толоч В. Т., Шварц Я. И. Ионные источники для электростатических генераторов в сжатом газе // Электростатические генераторы. М.: Атомиздат, 1959. С. 113–140.
43. Фогель Я. М., Крупник Л. И., Коваль А. Г., Тимофеев А. Д. Источник отрицательных ионов водорода для перезарядного электростатического генератора // Электростатические генераторы. М.: Атомиздат, 1959. С. 141–182.
44. Вальтер А. К., Таранов А. Я., Пивовар Л. И., Фогель Я. М., Беляев В. Х., Цытко С. П. Перезарядный электростатический генератор на 5 МэВ // Электростатические генераторы. М.: Атомиздат, 1959. С. 193–199.
45. Фогель Я. М., Анкудинов В. А., Пилипенко Д. В. Захват и потеря электрона при столкновениях быстрых атомов He, V и F с молекулами газов // Ж. эксперим. и теор. физ. 1960. Т. 38. Вып. 1. С. 26.
46. Фогель Я. М., Коваль А. Г., Левченко Ю. З. Ионизация газов отрицательными ионами // Ж. эксперим. и теор. физ. 1960. Т. 38. Вып. 4. С. 1053–1060.
47. Фогель Я. М., Коваль А. Г., Левченко Ю. З., Ходячих А. Ф. Состав медленных ионов, образующихся при ионизации газов отрицательными ионами // Ж. эксперим. и теор. физ. 1960. Т. 39. Вып. 3 (9). С. 548–555.
48. Фогель Я. М., Козлов В. Ф., Полякова Г. Н. Двойная перезарядка ионов щелочных металлов // Ж. эксперим. и теор. физ. 1960. Т. 39. Вып. 5. С. 1186.
49. Фогель Я. М., Слабоспицкий Р. П., Растрепин А. Б. Эмиссия заряженных частиц с поверхности металлов при бомбардировке положительными ионами // Ж. техн. физ. 1960. Т. 30. Вып. 1. С. 63–73.
50. Фогель Я. М., Слабоспицкий Р. П., Карнаухов И. М. Масс-спектрометрическое исследование вторичной положительной и отрицательной ионной эмиссии, возникающей при бомбардировке поверхности Mo положительными ионами // Ж. техн. физ. 1960. Т. 30. Вып. 7. С. 824–834.

51. Фогель Я. М. Образование отрицательных ионов при атомных столкновениях // Успехи физ. наук. 1960. Т. 71. Вып. 2. С. 243–287.
52. Фогель Я. М., Коваль А. Г., Левченко Ю. З. Образование медленных отрицательных ионов при однократных столкновениях быстрых отрицательных ионов водорода и кислорода с молекулами газов // Ж. эксперим. и теор. физ. 1961. Т. 40. Вып. 1. С. 13–22.
53. Фогель Я. М. Исследование некоторых процессов захвата и потери электронов быстрыми однозарядными положительными ионами, нейтральными атомами при однократных столкновениях с молекулами газов. Дисс. на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. Харьков: 1961.
54. Козлов В. Ф., Марченко В. Л., Фогель Я. М. Высокочастотный ионный источник с разрядом в парах солей // Приборы и техн. эксперимента. 1961. № 1. С. 25.
55. Фогель Я. М., Надыкто Б. Т., Рыбалко В. Ф., Слабоспицкий Р. П., Коробчанская И. Е. О возможности применения явления вторичной ионно-ионной эмиссии к изучению гетерогенных каталитических реакций // Докл. АН СССР. 1962. Т. 147. № 2. С. 414–417.
56. Фогель Я. М., Рекова Л. П., Колот В. Я. Термоионная эмиссия металлов в атмосфере различных газов // Ж. техн. физ. 1962. Т. 32. Вып. 10. С. 1259–1265.
57. Пилипенко Д. В., Фогель Я. М. Захват и потеря электрона при прохождении быстрых атомов водорода в молекулярных газах // Ж. эксперим. и теор. физ. 1962. Т. 42. Вып. 4. С. 936.
58. Фогель Я. М., Слабоспицкий Р. П., Славный А. С. Масс-спектрометрическое исследование вторичной ионной эмиссии при бомбардировке платины ионами аргона // Радиотехн. и электрон. 1963. Т. VIII. № 4. С. 684–690.
59. Пилипенко Д. В., Фогель Я. М. Захват и потеря электрона при прохождении быстрых атомов водорода в молекулярных газах // Ж. эксперим. и теор. физ. 1963. Т. 44. Вып. 6. С. 1818–1822.
60. Козлов В. Ф., Фогель Я. М., Страншенко В. А. Двухэлектронная перезарядка протонов малых энергий // Ж. эксперим. и теор. физ. 1963. Т. 44. Вып. 6. С. 1823–1825.

61. Абраменков А. Д., Рыбалко В. Ф., Фогель Я. М. Ионизация сверхзвуковой струи ртутного пара пучком ионов водорода // Изв. вузов. Физ. 1963. № 5. С. 74.
62. Полякова Г. Н., Фогель Я. М., Цю-Ю-Мэй. Спектры свечения разреженных молекулярных газов, возбужденных смешанным пучком протонов и атомов водорода // Астрон. ж. 1963. Т. 40. Вып. 2. С. 351.
63. Фогель Я. М., Надыкто Б. Т., Швачко В. И., Рыбалко В. Ф. Исследование состояния кислорода, адсорбированного на поверхности серебра, методом вторичной ионно-ионной эмиссии // Ж. физ. химии. 1964. Т. 38. № 10. С. 2397–2402.
64. Фогель Я. М., Надыкто Б. Т., Рыбалко В. Ф., Слабоспицкий Р. П., Коробчанская И. Е., Швачко В. И. О новом методе исследования гетерогенных каталитических реакций. 1. Разложение аммиака на платине // Кинетика и катализ. 1964. Т. 5. Вып. 1. С. 154–162.
65. Фогель Я. М., Надыкто Б. Т., Рыбалко В. Ф., Швачко В. И., Коробчанская И. Е. Изучение реакции каталитического окисления аммиака на платине методом вторичной ионно-ионной эмиссии // Кинетика и катализ. 1964. Т. 5. Вып. 3. С. 496–504.
66. Фогель Я. М., Надыкто Б. Т., Швачко В. И., Рыбалко В. Ф., Коробчанская И. Е. Исследование каталитических реакций между аммиаком и окисью азота и разложение окиси азота на платине методом вторичной ионно-ионной эмиссии // Кинетика и катализ. 1964. Т. 5. Вып. 5. С. 942–946.
67. Фогель Я. М., Надыкто Б. Т., Швачко В. И., Рыбалко В. Ф., Коробчанская И. Е. Исследование реакции каталитического окисления аммиака на платине методом вторичной ионно-ионной эмиссии // Докл. АН СССР. 1964. Т. 155. № 1. С. 171–174.
68. Рекова Л. П., Стрельченко С. С., Фогель Я. М. К вопросу о механизме влияния газов на термоионную эмиссию металлов // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1964. Т. 28. С. 1377.
69. Рекова Л. П., Стрельченко С. С., Фогель Я. М., Хуа Синь-Шен. Воздействие различных газов на термоионную эмиссию вольфрама // Радиотехн. и электрон. 1964. № 1. С. 144.
70. Швачко В. И., Надыкто Б. Т., Фогель Я. М., Гаргер К. С. Исследование коррозионных процессов на поверхности стали методом вторичной

- ионно-ионной эмиссии // Докл. АН СССР. 1965. Т. 161. № 4. Химия. С. 886–887.
71. Швачко В. И., Надикто Б. Т., Фогель Я. М., Васютинский Б. М., Картазов Г. Н. Применение метода вторичной ионно-ионной эмиссии к изучению взаимодействия кислорода с поверхностью ниобия // Физ. тверд. тела. 1965. Т. 7. Вып. 7. С. 1944–1951.
72. Fogel' Ya. M., Nadykto B. T., Rybalko V. F., Slabospitsky R. P., Korobchanskaya I. E., Shvachko V. I. A new method of investigation of heterogeneous catalytic reactions. 1. Ammonia decomposition on platinum // J. Catalysis. 1965. V. 4. P. 153–160.
73. Коваль А. Г., Коппе В. Т., Фогель Я. М. Спектры испускания разреженных молекулярных газов, возбужденных быстрыми электронами // Тез. докл. 3-й Всесоюз. конф. по физике электронных и атомных столкновений. Харьков: 1965. С. 37.
74. Рекова Л. П., Фогель Я. М., Александров А. П. К вопросу о механизме влияния газов на термоионную эмиссию платины и вольфрама // Ж. техн. физ. 1965. Т. 35. Вып. 9. С. 1642.
75. Пилипенко Д. В., Фогель Я. М. Состав медленных ионов, образующихся при прохождении быстрых атомов водорода через молекулярные газы // Ж. эксперим. и теор. физ. 1965. Т. 48. Вып. 2. С. 404.
76. Пилипенко Д. В., Гусев В. А., Фогель Я. М. Потеря электрона и образование медленных отрицательных ионов при столкновениях атомов и отрицательных ионов водорода молекулами газов // Ж. эксперим. и теор. физ. 1965. Т. 49. Вып. 11. С. 1402.
77. Полякова Г. Н., Попов А. И., Фогель Я. М. Изучение амплитудных распределений импульсов на выходе фотоумножителя // Радиотехн. и электрон. 1965. Т. X. № 5. С. 929.
78. Полякова Г. Н., Попов А. И., Фогель Я. М. Характеристики фотоумножителей для измерения слабых световых потоков // Приборы и техн. эксперимента. 1965. № 5. С. 198.
79. Коваль А. Г., Коппе В. Т., Фогель Я. М. Спектры испускания разреженных молекулярных газов, возбужденных быстрыми электронами. // Космич. исслед. 1966. Т. 4. Вып. 1. С. 74–88.
80. Коваль А. Г., Коппе В. Т., Фогель Я. М. Спектры свечения CO, CO₂ и NO, возбужденных электронами с энергией 13 кэВ // Астрон. ж. 1966. Т. 43. № 1. С. 209–219.

81. Швачко В. И., Фогель Я. М. Исследование реакции разложения аммиака на железе методом вторичной ионно-ионной эмиссии // Кинетика и катализ. 1966. Т. 7. Вып. 4. С. 722–726.
82. Швачко В. И., Фогель Я. М., Колот В. Я. Исследование реакции синтеза аммиака на железе методом вторичной ионно-ионной эмиссии // Кинетика и катализ. 1966. Т. 7. Вып. 5. С. 847.
83. Полякова Г. Н., Татусь В. И., Стрельченко С. С., Фогель Я. М., Фридман В. М. К вопросу о распределении молекул, возбужденных ионным ударом, по уровням вращательной энергии // Ж. эксперим. и теор. физ. 1966. Т. 50. Вып. 6. С. 1464.
84. Гусев В. А., Пилипенко Д. В., Фогель Я. М. Образование медленных ионов при прохождении быстрых протонов и атомов водорода через закись азота // Ж. эксперим. и теор. физ. 1966. Т. 51. Вып. 10. С. 1007.
85. Чечетенко В. В., Савченко Е. В., Фогель Я. М., Шкляревский И. Н., Яровая Р. Г. Изучение влияния протонной бомбардировки на оптические постоянные тонких металлических слоев // Оптика и спектроскопия. 1967. Т. 22. Вып. 4. С. 626–629.
86. Фогель Я. М. Вторичная ионная эмиссия // Успехи физ. наук. 1967. Т. 91. № 1. С. 75–112.
87. Колот В. Я., Рыбалко В. Ф., Фогель Я. М., Тихинский Г. Ф. О возможности применения метода вторичной ионно-ионной эмиссии к изучению коррозионных процессов // Защита металлов. 1967. Т. 3. № 6. С. 723–729.
88. Фогель Я. М., Надыкто Б. Т., Рыбалко В. Ф., Швачко В. И., Слабоспицкий Р. П., Коробчанская И. Е. О новом методе исследования каталитических реакций, основанном на исследовании явления вторичной ионно-ионной эмиссии // Глубокий механизм каталитических реакций. М.: 1967. С. 309–318.
89. Швачко В. И., Фогель Я. М., Колот В. Я. Исследование реакции синтеза аммиака на железе методом вторичной ионно-ионной эмиссии // Докл. АН СССР. 1967. Т. 172. № 6. Химия. С. 1353–1356.
90. Полякова Г. Н., Татусь В. И., Фогель Я. М. Распределение молекул N_2 , возникших при соударениях ионов с молекулами азота, по уровням вращательной и колебательной энергии // Ж. эксперим. и теор. физ. 1967. Т. 52. С. 657.

91. Полякова Г. Н., Фогель Я. М., Зац А. В. Распределение ионов N_2^+ , возникших при соударениях электронов с молекулами азота, по уровням вращательной и колебательной энергии // Ж. эксперим. и теор. физ. 1967. Т. 52. С. 1495.
92. Полякова Г. Н., Фогель Я. М. Распределение интенсивностей во вращательной и колебательной структуре полос N_2^+ , возникающих при прохождении ионов N_2^+ через смесь азота и гелия // Оптика и спектроскопия. 1967. Т. 22. С. 988.
93. Полякова Г. Н., Фогель Я. М. Распределение интенсивностей во вращательной и колебательной структуре 1-й отрицательной системы полос N_2^+ , возникающих при диссоциации молекул ионным ударом // Химия высоких энергий. 1967. Т. 1. С. 103.
94. Швачко В. И., Надыкто Б. Т., Фогель Я. М., Васютинский Б. М., Картазов Г. Н. Поверхностные процессы, протекающие при вакуумной термообработке ниобия // Матер. VII науч.-техн. конф. М.: 1967.
95. Рыбалко В. Ф., Колот В. Я., Фогель Я. М. Окисление вольфрама при комнатной температуре // Физ. тверд. тела. 1968. Т. 10. Вып. 10. С. 3176–3177.
96. Коппе В. Т., Коваль А. Г., Грицына В. В., Фогель Я. М. Зависимость момента электронного перехода Re от межъядерного расстояния r для системы полос Мейнела иона N_2^+ // Оптика и спектроскопия. 1968. Т. 24. Вып. 6. С. 821–823.
97. Коваль А. Г., Коппе В. Т., Данилевский Н. П., Фогель Я. М. Инфракрасные спектры разреженных молекулярных газов, возбужденных быстрыми электронами. // Матер. 4-й Всесоюз. конф. по изучению комет как индикаторов солнечной активности и условий в межпланетном пространстве. Киев: 1968. С. 21–22.
98. Коваль А. Г., Данилевский Н. П., Коппе В. Т., Фогель Я. М. Спектры свечения некоторых молекулярных газов в инфракрасной области спектра, возбужденных быстрыми электронами // Астрон. ж. 1968. Т. 45. № 6. С. 1322–1325.
99. Gritsyna V. V., Kiyan T. S., Koval A. G., Fogel' Ya. M. Luminescence of particles produced in the process of scattering of hydrogen ions at the surface of metallic targets // Phys. Lett. 1968. V. 27A. No. 5. P. 292–293.

100. Чечетенко В. В., Тищенко Л. П., Фогель Я. М. Изучение влияния протонной бомбардировки на электрическое сопротивление тонких пленок серебра // Физ. тверд. тела. 1968. Т. 10. С. 638–640.
101. Абраменков А. Д., Тронь А. С., Фогель Я. М., Швачко В. И. Исследование методом вторичной ионно-ионной эмиссии состава поверхностного слоя компонентов биметалла никель–медь // Физ. и химия обраб. матер. 1968. № 2. С. 111–116.
102. Рекова Л. П., Абраменков А. Д., Фогель Я. М. Исследование окисления примесей щелочных металлов на поверхности платины и вольфрама методом вторичной ионно-ионной эмиссии // Ж. техн. физ. 1968. Т. 38. Вып. 2. С. 331–338.
103. Рекова Л. П., Абраменков А. Д., Фогель Я. М. Исследование взаимодействия четыреххлористого углерода с примесями щелочных металлов на поверхности вольфрама и платины // Ж. техн. физ. 1968. Т. 38. Вып. 9. С. 1570–1580.
104. Козлов В. Ф., Пистряк В. М., Фогель Я. М. Возможность применения явления вторичной ионно-ионной эмиссии к изучению объемных процессов в твердых телах // Физ. тверд. тела. 1968. Т. 10. Вып. 12. С. 3713–3715.
105. Рекова Л. П., Фогель Я. М. Воздействие газов на термоионную эмиссию металлов, подвергнутых деформации // Ж. техн. физ. 1968. Т. 38. Вып. 11. С. 1980.
106. А. с. № 226927 (СССР). Способ получения непрерывных спектров излучения инертных газов в ультрафиолетовой области / Верховцева Э. Т., Фогель Я. М., Веркин Б. И., Осыка В. С., Соколов В. Н. Заявка № 1168773 с приоритетом от 03.07.67. Оpubл. 02.07.1968.
107. Полякова Г. Н., Фогель Я. М., Ерко В. Ф., Зац А. В., Толстолицкий А. Г. О некоторых особенностях передачи вращательной и колебательной энергии в процессах ионно-молекулярных столкновений // Ж. эксперим. и теор. физ. 1968. Т. 54. Вып. 2. С. 374.
108. Гусев В. А., Полякова Г. Н., Фогель Я. М. Исследование диссоциативной ионизации молекул N_2 , обусловленной возбуждением колебательного движения ядер ударом быстрых ионов и атомов // Ж. эксперим. и теор. физ. 1968. Т. 55. Вып. 12. С. 2128.

109. Верховцева Э. Т., Фогель Я. М., Соколов В. Н., Осыка В. С. Газоструйный источник ВУФ. // Криогенная и вакуумная техника. Харьков: ФТИНТ АН УССР, 1968. Т. 4. С. 132.
110. Рыбалко В. Ф., Фогель Я. М., Татусь В. И., Грановский В. Г. Парортутный диффузионный насос малой производительности для получения сверхвысокого вакуума // Приборы и техн. эксперимента. 1968. № 4. С. 159.
111. Полякова Г. Н., Фогель Я. М., Зац А. В., Ерко В. Ф. Распределение ионов N_2^+ плазмы дугового разряда по уровням вращательной энергии // Ж. техн. физ. 1968. Т. 38. Вып. 9. С. 1575.
112. Верховцева Э. Т., Фогель Я. М., Осыка В. С. О непрерывных спектрах инертных газов в области вакуумного ультрафиолета, полученных с помощью газоструйного источника // Оптика и спектроскопия. 1968. Т. 25. Вып. 3. С. 440.
113. Грицына В. В., Киян Т. С., Коваль А. Г., Фогель Я. М. Свечение возбужденных молекул гелия, возникающее при бомбардировке твердых мишеней пучком быстрых ионов гелия. // Письма в ЖЭТФ. 1969. Т. 9. № 1. С. 212–215.
114. Коваль А. Г., Коппе В. Т., Фогель Я. М. Спектры испускания некоторых молекулярных газов, возбужденных быстрыми электронами, в инфракрасной области спектра // Проблемы космической физики. Киев: Изд-во КГУ, 1969. Вып. 4. С. 112–133.
115. Данилевский Н. П., Попова Л. И., Коваль А. Г., Фогель Я. М. Спектр свечения азота в инфракрасной области спектра, получаемый при возбуждении чистого азота и смеси азота с гелием электронами с энергией 13 кэВ. // Тез. докл. IV Всесоюз. конф. по физике электронных и атомных столкновений. Рига: 1969. С. 133–134.
116. Коппе В. Т., Коваль А. Г., Фогель Я. М. Эффективные сечения возбуждения полос 1-й отрицательной системы иона N_2^+ электронами с энергией 0.5–20 кэВ // Там же. 1969. С. 134.
117. Коваль А. Г., Коппе В. Т., Прошак Л. И., Фогель Я. М. Эффективное сечение возбуждения полосы $(0-0)$ с $\lambda = 3914 \text{ \AA}$ первой отрицательной системы иона N_2^+ , возникающей при столкновении быстрых электронов с молекулами азота // Оптика и спектроскопия. 1969. Т. 27. С. 372–373.

118. Коваль А. Г., Коппе В. Т., Грицына В. В., Фогель Я. М. Спектры свечения азота, кислорода и воздуха, возбужденных быстрыми электронами в инфракрасной области спектра, и сравнение их со спектрами полярных сияний // Геомагнетизм и астрономия. 1969. Т. 9. № 1. С. 113–119.
119. Чечетенко В. В., Тищенко Л. П., Фогель Я. М., Белов А. Г. Энергия активации отжига дефектов, образующихся в тонких пленках серебра при протонной бомбардировке // Физ. тверд. тела. 1969. Т. 11. С. 1384–1386.
120. Чечетенко В. В., Тищенко Л. П., Фогель Я. М. Изучение влияния протонной бомбардировки на электрическое сопротивление тонких пленок серебра // Физика металлических пленок, сб. Металлофизика. Вып. 26. К: Наукова думка, 1969. С. 43–52.
121. Чечетенко В. В., Тищенко Л. П., Фогель Я. М., Любарский И. М. Изучение влияния протонной бомбардировки на электрическое сопротивление тонких пленок серебра // Тр. ФТИНТ АН УССР. Криогенная и вакуумная техника. Харьков: 1969. С. 21–28.
122. Фогель Я. М. Явление вторичной ионно-ионной эмиссии и некоторые практические применения этого явления // Сб. лекций 1-й Всесоюзной школы по электронным и атомным столкновениям. Харьков: 1969. Т. 3. С. 114–129.
123. Рыбалко В. Ф., Колот В. Я., Фогель Я. М. О вероятности выбивания вторичных ионов окислов вольфрама ионами Ag^+ // Укр. физ. ж. 1969. Т. XIV. № 6. С. 913–919.
124. Рыбалко В. Ф., Колот В. Я., Фогель Я. М. Изучение адсорбции кислорода на вольфраме методом вторичной ионно-ионной эмиссии // Ж. техн. физ. 1969. Т. 39. Вып. 9. С. 1717–1719.
125. Рыбалко В. Ф., Колот В. Я., Фогель Я. М. Влияние давления кислорода на процесс окисления вольфрама // Физ. тверд. тела. 1969. Т. 11. Вып. 5. С. 1404–1406.
126. Рыбалко В. Ф., Колот В. Я., Фогель Я. М. Изучение окисления вольфрама методом вторичной ионно-ионной эмиссии // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1969. Т. 33. № 5. С. 836–839.
127. Рыбалко В. Ф., Фогель Я. М., Колот В. Я. О влиянии ионной бомбардировки на пленку газов, адсорбированных на поверхности металла // Ж. физ. химии. 1969. Т. 43. № 4. С. 955–960.

128. Колот В. Я., Рыбалко В. Ф., Палатник Л. С., Фогель Я. М., Чернякова Л. Е. Исследование методом вторичной ионно-ионной эмиссии природы поверхностной пленки, образовавшейся на золоте в результате электролитического травления // Защита металлов. 1969. Т. 5. № 4. С. 428–430.
129. Кучаев В. Л., Василевич А. А., Апельбаум Л. О., Темкин М. И., Фогель Я. М. К методике изучения механизма каталитических процессов с помощью вторичной ионно-ионной эмиссии // Кинетика и катализ. 1969. Т. 10. Вып. 3. С. 678–680.
130. Верховцева Э. Т., Кравченко А. В., Осыка В. С., Фогель Я. М. Моделирование распределения энергии излучения Солнца в области спектра 500–1500 Å при помощи газоструйного источника // Космич. исслед. 1969. Т. 7. Вып. 6. С. 925.
131. Полякова Г. Н., Фогель Я. М. Исследование вращательных и колебательных распределений молекул в различных элементарных процессах и значение этих исследований для астрофизики // Проблемы космической физики. Киев: Изд-во КГУ, 1969. № 4. С. 103–111.
132. Рекова Л. П., Фогель Я. М., Нестеров Л. В. Влияние газов на скорость диффузии примесей металлов через дислокации // Физ. тверд. тела. 1969. Т. 11. Вып. 7. С. 1891.
133. Полякова Г. Н., Ерко В. Ф., Гусев В. А., Зац А. В., Фогель Я. М. Возбуждение полосы $\lambda = 4278 \text{ Å}$ первой отрицательной системы ионами N_2^+ и атомами благородных газов // Ж. эксперим. и теор. физ. 1969. Т. 56. Вып. 1. С. 161.
134. Полякова Г. Н., Ерко В. Ф., Фогель Я. М., Зац А. В., Физгеер Б. М. Возбуждение вращательного и колебательного движения ионов N_2^+ , образованных при столкновениях атомов инертных газов с молекулами азота // Ж. эксперим. и теор. физ. 1969. Т. 56. Вып. 6. С. 1851.
135. Фогель Я. М. Вращательное и колебательное возбуждение двухатомных молекул в элементарных процессах // Сб. лекций I Всесоюз. школы по электронным и атомным столкновениям. 1970. Т. 4. С. 97–109.
136. Грицына В. В., Киян Т. С., Коваль В. Г., Фогель Я. М. Выбивание возбужденных медленных атомов и молекул гелия из углеродной пленки, образованной при бомбардировке твердых мишеней пучком быстрых ионов гелия // Ж. эксперим. и теор. физ. 1970. Т. 58. Вып. 5. С. 1491–1496.

137. Коваль А. Г., Бобков В. В., Ривлин А. А., Фогель Я. М. Изучение коррозии алюминия и сплава алюминий-магний в водных растворах методом вторичной ионно-ионной эмиссии. // Тез. докл. XIV Всесоюз. конф. по эмиссионной электронике. Ташкент: 1970. С. 4.
138. Коваль А. Г., Сахаров А. А., Фогель Я. М. Свечение, возникающее при бомбардировке твердых мишеней электронами. // Там же. 1970. С. 6.
139. Грицына В. В., Киян Т. С., Коваль А. Г., Фогель Я. М. Выбивание возбужденных медленных атомов и молекул из углеродной пленки, образованной при бомбардировке твердых мишеней пучком быстрых ионов. // Там же. 1970. С. 7.
140. Грицына В. В., Киян Т. С., Гутт Р., Коваль А. Г., Фогель Я. М. Свечение, возникающее при бомбардировке твердых мишеней быстрыми ионами. // Там же. 1970. С. 7.
141. Чечетенко В. В., Тищенко Л. П., Перегон Т. И., Фогель Я. М. Влияние протонной бомбардировки на электрическое сопротивление тонких пленок серебра и меди // Там же. 1970. Секц. 7. С. 103.
142. Коппе В. Т., Коваль А. Г., Физгеер Б. М., Фогель Я. М., Иванов С. И. Измерение эффективных сечений и функций возбуждения полос первой отрицательной системы молекулярного иона при возбуждении азота быстрыми электронами // Ж. эксперим. и теор. физ. 1970. Т. 59. Вып. 6 (12). С. 1878 – 1883.
143. Грицына В. В., Киян Т. С., Фогель Я. М., Коваль А. Г., Климовский Ю. А. Свечение медленных частиц неона, возникающее при бомбардировке углеродной пленки пучком быстрых ионов неона. // Оптика и спектроскопия. 1970. Т. 29. Вып. 4. С. 641 – 643.
144. Колот В. Я., Татусь В. И., Рыбалко В. Ф., Фогель Я. М. Изучение адсорбции кислорода на поверхности молибдена методом вторичной ионно-ионной эмиссии // Ж. техн. физ. 1970. Т. 40. Вып. 11. С. 2469 – 2471.
145. Абраменков А. Д., Фогель Я. М., Слезов В. В., Танатаров Л. В., Леденев О. П. Исследование методом вторичной ионно-ионной эмиссии диффузии атомов подложки в пленку // Физ. мет. и металловед. 1970. Т. 30. № 6. С. 1310 – 1312.
146. Абраменков А. Д., Слезов В. В., Танатаров Л. В., Фогель Я. М. Исследование диффузии атомов меди по поверхности молибдена методом вторичной ионно-ионной эмиссии // Физ. тверд. тела. 1970. Т. 12. Вып. 10. С. 2929 – 2933.

147. Абраменков А. Д., Слезов В. В., Танатаров Л. В., Фогель Я. М. Образование островков диффундирующего вещества при поверхностной диффузии // Физ. тверд. тела. 1970. Т. 12. Вып. 10. С. 2934–2941.
148. Абраменков А. Д., Ажажа В. М., Фогель Я. М., Швачко В. И. Применение метода вторичной ионно-ионной эмиссии к изучению процессов, происходящих в начальной стадии нанесения титанового покрытия на молибден // Физ. мет. и металловед. 1970. Т. 29. № 3. С. 519–523.
149. Колот В. Я., Татусь В. И., Рыбалко В. Ф., Фогель Я. М. Вивчення процесу очищення молибдену від домішки вуглецю методом вторинної іонно-іонної емісії // Укр. фіз. ж. 1970. Т. 15. № 2. С. 265–267.
150. Колот В. Я., Татусь В. И., Рыбалко В. Ф., Фогель Я. М. Изучение процесса очистки молибдена от примеси углерода методом вторичной ионно-ионной эмиссии // Укр. физ. ж. 1970. Т. XV. № 2. С. 266–268.
151. Козлов В. Ф., Пистряк В. М., Тихинский Г. Ф., Фогель Я. М. К вопросу об исследовании объемного состава твердых тел методом вторичной ионно-ионной эмиссии // Получение и исследование свойств чистых металлов. Т. 1. Харьков: 1970. С. 102–111.
152. Пистряк В. М., Гнап А. К., Козлов В. Ф., Гарбер Р. И., Федоренко А. И., Фогель Я. М. Профиль распределения внедренных в кремний ионов бора с энергией 30 и 100 кэВ // Физ. тверд. тела. 1970. Т. 12. Вып. 4. С. 1281–1283.
153. Rybalko V. F., Kolot V. Ya., Fogel' Ya. M. Study of surface oxidation of tungsten by the secondary ion emission method. – Recent Develop. Mass Spectroscopy // Proc. Int. Conf. Mass Spectroscopy. Kyoto: 1970. P. 1109–1111.
154. Полякова Г. Н., Ерко В. Ф., Зац А. В., Фогель Я. М. Отклонение от принципа Франка–Кондона при заселении колебательных уровней состояния $A^2\Pi$ ионов CO^+ , образованных при столкновениях электронов с молекулами CO // Письма в ЖЭТФ. 1970. Т. 12. С. 303.
155. Полякова Г. Н., Гусев В. А., Ерко В. Ф., Фогель Я. М., Зац А. В. Образование заряженных и возбужденных частиц при столкновениях ионов и атомов благородных газов с молекулами водорода // Ж. эксперим. и теор. физ. 1970. Т. 58. Вып. 4. С. 1186.
156. Гусев В. А., Оксюк А. А., Фогель Я. М., Пилипенко Д. В. Образование медленных атомарных отрицательных ионов кислорода при столкно-

- вениях быстрых протонов и атомов водорода с молекулами O_2 // Ж. эксперим. и теор. физ. 1970. Т. 59. Вып. 6. С. 1910.
157. Рекова Л. П., Фогель Я. М. Воздействие газов на термоионную эмиссию металлов, подвергнутых деформации // Металлофиз. 1970. № 29. С. 63–70.
158. Полякова Г. Н., Ерко В. Ф., Зац А. В., Фогель Я. М., Толстолуцкая Г. Д. Аномальное колебательное возбуждение иона CO^+ , образованного при столкновениях ионов благородных газов с молекулами CO // Письма в ЖЭТФ. 1970. Т. 11. С. 562.
159. Рекова Л. П., Мозгин В. В., Фогель Я. М. Связи между дислокациями и облаками примеси калия в платине // Физ. тверд. тела. 1970. Т. 12. Вып. 10. С. 3040.
160. Gusev V. A., Polyakova G. N., Erko V. F., Fogel' Ya. M. Formation of protons and excited hydrogen atoms on the collisions of ions and atoms of noble gases with hydrogen molecules // Abstr. of Papers of the VI Inter. Conf. the Phys. Electr. Atomic Coll. 1970. P. 809.
161. Абраменков А. Д., Серюгин А. Л., Мартынов И. С., Слезов В. В., Фогель Я. М. Образование островков из атомов меди, диффундирующих на поверхности молибдена // Физ. тверд. тела. 1971. Т. 13. Вып. 12. С. 3496–3500.
162. Зашквара В. В., Колот В. Я., Редькин В. С., Демин В. Н., Корсунский М. И., Фогель Я. М. Изменения в спектре характеристических потерь энергии молибдена, наблюдающиеся при окислении его поверхности // Физ. тверд. тела. 1971. Т. 13. Вып. 11. С. 3376–3380.
163. Колот В. Я., Татусь В. И., Рыбалко В. Ф., Фогель Я. М., Водолажченко В. В., Евсеев В. М. Влияние давления кислорода на начальную стадию окисления молибдена // Физ. тверд. тела. 1971. Т. 13. Вып. 6. С. 1521–1524.
164. Колот В. Я., Татусь В. И., Рыбалко В. Ф., Фогель Я. М. Изучение состава поверхностных окислов молибдена методом вторичной ионно-ионной эмиссии // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1971. Т. 35. № 2. С. 255–260.
165. Фогель Я. М., Коваль А. Г. Взаимодействие атомных частиц с твердым телом: Симпозиум в Харькове // Вестн. АН СССР. 1971. № 10. С. 89–90.

166. Грицына В. В., Киян Т. С., Гутт Т., Коваль А. Г., Фогель Я. М. Влияние безызлучательных переходов на спектр свечения возбужденных частиц, выбитых из твердых мишеней быстрыми ионами аргона // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1971. Т. 35. № 3. С. 578–584.
167. Коппе В. Т., Коваль А. Г., Данилевский Н. П., Попова Л. И., Физгеер Б. М. Измерение эффективных сечений возбуждения полос видимой части спектра молекул СО и ионов CO^+ электронами с энергией 0,4–20 кэВ // Ж. эксперим. и теор. физ. 1971. Т. 61. Вып. 3. С. 906–911.
168. Коппе В. Т., Коваль А. Г., Данилевский Н. П., Попова Л. И., Фогель Я. М. Измерение эффективных сечений и функций возбуждения некоторых систем молекул СО и CO_2 , возбужденных электронами с энергией 0,4–20 кэВ. // Тез. докл. XIII Пленума Комиссии по кометам и метеородам. Киев: 1971. С. 41.
169. Коваль А. Г., Бобков В. В., Климовский Ю. А., Суходуб Л. Ф., Фогель Я. М. Изучение методом вторичной ионно-ионной эмиссии состава химических соединений, образующихся на меди при различных температурах. // Препринты докл. Всесоюз. симпозиума по взаимодействию атомных частиц с твердыми телами. Харьков: 1971. С. 4–6.
170. Грицына В. В., Киян Т. С., Коваль А. Г., Фогель Я. М., Аксенов П. И. Влияние безызлучательных переходов на спектр свечения, возникающего при бомбардировке твердых мишеней ионами благородных газов. // Там же. 1971. С. 20.
171. Чечетенко В. В., Тищенко Л. П., Перегон Т. И., Фогель Я. М. Изучение отжига радиационных дефектов, образованных в тонких металлических пленках при бомбардировке их протонами // Там же. 1971. С. 33.
172. Данилевский Н. П., Попова Л. И., Коваль А. Г., Федорова Н. И., Коппе В. Т., Фогель Я. М. Спектр свечения азота в инфракрасной области спектра при возбуждении чистого азота и смеси азота с гелием быстрыми электронами // Геомагнетизм и аэрономия. 1971. Т. 11. № 4. С. 630–636.
173. Чечетенко В. В., Тищенко Л. П., Перегон Т. И., Фогель Я. М. Изучение влияния внедренных примесей гелия и кислорода на характер отжига радиационных дефектов, создаваемых в тонких пленках серебра протонной бомбардировкой // Тез. докл. науч. конф. Физические основы ионно-лучевого легирования. Горький: Изд-во ГГУ, 1971. С. 60.

174. Danilevsky N. P., Popova L. I., Koval' A. G., Koppe V. T., Fogel' Ya. M., Fedorova N. I. The Study of Nitrogen glowing in theirs spectral band under excitation of pure nitrogen and nitrogen-helium mixture by fast electrons. // Abstr. XV General Assembly International Union of Geodesy and Geophysics. Moscow: 1971. P. 7.
175. Фогель Я. М., Коваль А. Г. Взаимодействие атомных частиц с твердыми телами. Симпозиум в Харькове // Вестник АН СССР. 1971. № 10. С. 89–90.
176. А. с. № 312184 G 01 13/00 (СССР). Способ определения скорости объемной диффузии металлов / Абраменков А. Д., Слезов В. В., Танатаров Л. В., Фогель Я. М. Заявка № 1326654 с приоритетом от 19.04.69. Опубл. 19.08.71. // Открытия, изобретения, промышленные образцы. 1971. № 25. С. 171.
177. Гарбер Р. И., Гнап А. К., Козлов В. Ф., Пистряк В. М., Фогель Я. М., Федоренко А. И. Масс-спектрометрическое определение профиля распределения примеси бора в ионно-легированных монокристаллах кремния // Радиационная физика неметаллических кристаллов. Т. 3. Ч. 2. К.: 1971. С. 143–148.
178. Рекова Л. П., Мозгин В. В., Кисель О. В., Фогель Я. М. Воздействие газов на термоионную эмиссию пластически деформируемых металлов // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1971. Т. 35. № 3. С. 567.
179. Гусев В. А., Полякова Г. Н., Ерко В. Ф., Зац А. В., Оксюк А. А., Фогель Я. М. Образование заряженных и возбужденных частиц при столкновениях ионов He^+ , Ne^+ , Ar^+ с молекулами CO // Ж. эксперим. и теор. физ. 1971. Т. 60. Вып. 5. С. 1597.
180. Полякова Г. Н., Ерко В. Ф., Зац А. В., Фогель Я. М. Эффективные сечения возбуждения при столкновениях ионов He^+ с молекулами CO // Астрометрия и астрофизика. 1971. № 12. С. 79.
181. Водолажченко В. В., Гродштейн А. Е., Кирсанов Н. Д., Колот В. Я., Пономарев Г. А., Рыбалко В. Ф., Татусь В. И., Фогель Я. М. Влияние состава поверхностного слоя электродов на электрические параметры приборов // Электронная техника. Сер. 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы. 1972. Вып. 2. С. 120–125.
182. Колот В. Я., Татусь В. И., Водолажченко В. В., Рыбалко В. Ф., Гродштейн А. Е., Кирсанов Н. Д., Фогель Я. М. Исследование очистки мо-

- либдена от примеси углерода // Ж. техн. физ. 1972. Т. 42. Вып. 1. С. 144–146.
183. Колот В. Я., Татусь В. И., Водолажченко В. В., Рыбалко В. Ф., Фогель Я. М. О переходе пленки окислов на поверхности молибдена из двумерной фазы в трехмерную // Ж. техн. физ. 1972. Т. 42. Вып. 7. С. 1486–1490.
184. Колот В. Я., Татусь В. И., Рыбалко В. Ф., Водолажченко В. В., Фогель Я. М. О процессах, определяющих состав двумерной окисной пленки на поверхности молибдена // Ж. техн. физ. 1972. Т. 42. Вып. 11. С. 2416–2421.
185. Коваль А. Г., Лысая А. И., Бобков В. В., Ривлин А. А., Фогель Я. М., Лунев О. А. Исследования поверхности алюминиевого сплава после контакта с раствором NaCl методом вторичной ионно-ионной эмиссии. // Защита металлов. 1972. Т. 8. № 2. С. 152–156.
186. Грицына В. В., Киян Т. С., Коваль А. Г., Фогель Я. М., Серюгина А. Л., Мартынов И. С. К вопросу о механизме свечения частиц гелия и неона, внедренных в полимерную пленку, образованную в процессе ионной бомбардировки твердых тел // Сб. докл. Второго Всесоюз. симпоз. по взаимодействию атомных частиц с твердым телом. М.: 1972. С. 76–78.
187. Коваль А. Г., Прошак Л. И., Мельников В. Н., Исаев Ф. М., Фогель Я. М., Бронфин М. Б. Изучение состава химических соединений на поверхности никеля методом вторичной ионно-ионной эмиссии // Там же. 1972. С. 164–167.
188. Коваль А. Г., Бобков В. В., Климовский Ю. А., Стрельченко С. С., Шубина В. В., Лебедев В. В., Фогель Я. М. Изучение окислов и гидроокислов на гранях (100) (111) арсенида галлия методом ВИИЭ // Там же. 1972. С. 168–171.
189. Коваль А. Г., Бобков В. В., Климовский Ю. А., Стрельченко С. С., Шубина В. В., Лебедев В. В., Фогель Я. М. Исследование масс-спектра вторичных ионов, выбитых с поверхности монокристаллов арсенида галлия ионами аргона // Там же. 1972. С. 172–175.
190. Козлов В. Ф., Пистряк В. М., Тихинский Г. Ф., Фогель Я. М. Исследование сплава Ni–Be методом вторичной ионно-ионной эмиссии // Там же. 1972. С. 176.

191. Серюгин А. Л., Мартынов И. С., Бойко Б. Т., Грицына В. В., Коваль А. Г., Деревянченко А. С., Фогель Я. М. Исследование структуры пленки, образующейся при ионной бомбардировке твердых тел, находящихся в вакууме, созданном масляными насосами // Там же. 1972. С. 258.
192. Тищенко Л. П., Перегон Т. И., Фогель Я. М., Серюгин А. Л., Мартынов И. С. Изучение влияния внедрения газовых ионов на электрическое сопротивление металлических пленок // Там же. 1972. С. 306.
193. Чечетенко В. В., Тищенко Л. П., Перегон Т. И., Фогель Я. М. Об особенностях отжига радиационных нарушений, возникающих в тонких пленках серебра и меди при бомбардировке их протонами // Укр. физ. ж. 1972. Т. XVII. № 1. С. 56–62.
194. Чечетенко В. В., Тищенко Л. П., Перегон Т. И., Фогель Я. М., Костин Е. Г., Весноватый Ю. А. Влияние примесей на отжиг радиационных дефектов в тонких пленках серебра // Физ. и химия обраб. матер. 1972. № 6. С. 60–65.
195. Чечетенко В. В., Тищенко Л. П., Перегон Т. И., Серюгин А. Л., Фогель Я. М., Мартынов И. С. Влияние подложки и структуры металлической пленки на характер отжига радиационных дефектов, создаваемых в ней протонной бомбардировкой // Физ. мет. и металловед. 1972. Т. 34. № 4. С. 858–861.
196. Фогель Н. Я., Мошенский А. А., Дмитренко И. М., Тищенко Л. П., Перегон Т. И., Фогель Я. М. Влияние внедренных атомов гелия на кристаллические параметры сверхпроводящих пленок индия // Тез. докл. XVII Всесоюз. совещ. по физике низких температур. Донецк: 1972. С. 20–22.
197. Gritsyna V. V., Kiyan T. S., Koval' A. G., Fogel' Ya. M. An investigation of the velocity spectrum of excited particles by fast ions from a solid as a means to study its electronic level structure // Radiat. Eff. 1972. V. 14. P. 77–79.
198. Danilevsky N. P., Popova L. I., Koval' A. G., Fedorova N. I., Koppe V. T., Fogel' Ya. M. The infrared spectrum of nitrogen excited by fast electrons. // Extrait des Annales de Geophysique. 1972. V. 28. No. 2. P. 409–414.
199. Фогель Я. М. Использование явления вторичной ионно-ионной эмиссии в масс-спектрометрии // Матер. I Всесоюз. конф. по масс-спектрометрии. Л.: 1972. С. 160–179.

200. Fogel' Ya. M. Ion-ion emission – a new tool for mass-spectrometric investigations of processes on the surface and in the bulk of solids // Int. J. Mass Spectrom. and Ion Phys. 1972. V. 9. No. 2. P. 109 – 125.
201. Абраменков А. Д., Серюгин А. Л., Дятлова В. В., Фогель Я. М., Потеня Г. Ф. Исследование методом вторичной ионно-ионной эмиссии начальной стадии процесса образования вакуумного конденсата серебра на никелевой подложке // Физ. мет. и материаловед. 1972. Т. 33. № 4. С. 853 – 855.
202. Коробчанская И. Е., Атрощенко В. И., Рыбалко В. Ф., Фогель Я. М. Об отделении газовых ионов от вторичных при исследовании гетерогенных каталитических реакций методом вторичной ионно-ионной эмиссии // Укр. хим. ж. 1972. Т. 38. Вып. 4. С. 300 – 304.
203. Рекова Л. П., Мозгин В. В., Кисель О. В., Фогель Я. М. Изменение характера влияния кислорода на ток термоэмиссии ионов K^+ // Физ. тверд. тела. 1972. Т. 14. Вып. 8. С. 2265.
204. Полякова Г. Н., Ерко В. Ф., Зац А. В., Фогель Я. М. К вопросу о распределении по уровням вращательной энергии ионов N_2^+ , возникающих при ионизации молекул медленными электронами // Ж. эксперим. и теор. физ. 1972. Т. 62. Вып. 1. С. 57 – 60.
205. Гусев В. А., Оксюк А. А., Фогель Я. М. О процессе диссоциации двухатомных молекул ударом быстрых ионов и атомов // Ж. эксперим. и теор. физ. 1972. Т. 62. Вып. 4. С. 1284.
206. Верховцева Э. Т., Яременко В. И., Фогель Я. М. Исследование некоторых эксплуатационных характеристик газоструйного источника вакуумного ультрафиолета // Криогенная и вакуумная техника. Харьков: ФТИНТ АН УССР, 1972. Вып. 2. С. 19.
207. Полякова Г. Н., Физгеер Б. М., Фогель Я. М., Зац А. В. Распределение по уровням вращательной энергии возбужденных молекул CH , возникающих при диссоциации молекул CH_4 и C_2H_2 электронным ударом // Тез. докл. V Всесоюз. конф. по физике электронных и атомных столкновений. Ужгород: 1972. С. 48.
208. Грицына В. В., Киян Т. С., Коваль А. Г., Фогель Я. М. О некоторых особенностях излучения неона, возбужденного пучком ионов Ne^+ // Там же. 1972. С. 93.

209. Атрощенко В. И., Коробчанская И. Е., Фогель Я. М. К вопросу об исследовании окисления аммиака на платине методом вторичной ионно-ионной эмиссии // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика высоких энергий и атомного ядра. Харьков: ФТИ АН УССР. 1973. Вып. 7 (9). С. 89–90.
210. Рекова Л. П., Фогель Я. М. О новом методе исследования процессов в твердых телах, основанном на явлении термоионной эмиссии // Вопросы атомной науки и техники. Харьков: ФТИ АН УССР, 1973. Вып. 7 (9). С. 96.
211. Абраменков А. Д., Фогель Я. М. Новый метод исследования процессов, происходящих при нанесении испарением в вакууме тонкослойных покрытий на металлическую подложку // Вопросы атомной науки и техники. Харьков: ФТИ АН УССР, 1973. Вып. 7 (9). С. 98–99.
212. Чечетенко В. В., Тищенко Л. П., Перегон Т. И., Серюгин А. Л., Фогель Я. М., Мартынов И. С. О влиянии подложки и структуры серебряной пленки на характер отжига радиационных дефектов, создаваемых в ней протонной бомбардировкой // Вопросы атомной науки и техники. Харьков: ФТИ АН УССР, 1973. Вып. 7 (9). С. 104.
213. Коваль А. Г., Бобков В. В., Климовский Ю. А., Фогель Я. М. Исследование поверхности меди методом вторичной ионно-ионной эмиссии // Кратк. содерж. докл. XV Всесоюз. конф. по эмиссионной электронике. Киев: 1973. Ч. 2. С. 198–200.
214. Грицына В. В., Киян Т. С., Коваль А. Г., Фогель Я. М. Исследование спектров свечения молекул, сбитых с поверхности мишеней ионным пучком ($E = 20$ кэВ). // Там же. 1973. Ч. 2. С. 200–201.
215. Коваль А. Г., Вягин Г. И., Бобков В. В., Климовский Ю. А., Стрельченко С. С., Фогель Я. М. К вопросу о различии состава заряженных и нейтральных частиц, выбитых пучком ионов Ag^+ из арсенида галлия. // Ж. техн. физ. 1973. Т. 43. Вып. 8. С. 1753–1754.
216. Грицына В. В., Киян Т. С., Коваль А. Г., Фогель Я. М., Серюгина А. Л., Мартынов И. С. О механизме свечения полимерных пленок, возникающего в процессе их образования при бомбардировке твердых тел ионным пучком. // Ж. эксперим. и теор. физ. 1973. Т. 64. Вып. 1. С. 207–216.
217. Бобков В. В., Климовский Ю. А., Коваль А. Г., Фогель Я. М. Применение метода вторичной ионно-ионной эмиссии для изучения про-

- цессов диффузионной вакуумной сварки // Сб. науч. тр. VII Всесоюз. науч.-тех. конф. Диффузионная сварка в вакууме металлов, сплавов и неметаллических материалов. М.: 1973. № 6. С. 155–159.
218. Атрощенко В. И., Коробчанська І. Є., Фогель Я. М. Стосовно окислення аміаку на платині методом вторинної іонно-іонної емісії // Вісник Харківського політехнічного інституту. 1973. № 79. Вип. 5. С. 19–21.
219. Пистряк В. М., Тетельбаум Д. И., Козлов В. Ф., Васильев В. К., Зорин Е. И., Павлов П. В., Фогель Я. М. Влияние аморфизации на распределение бора в кремнии при ионной бомбардировке // Физ. и техн. полупроводн. 1973. Т. 7. № 10. С. 1987–1990.
220. Полякова Г. Н., Ерков В. Ф., Зац А. В., Фогель Я. М. О заселенностях вращательных и колебательных уровней возбужденных электронных состояний молекул азота, образованных при столкновении электронов с молекулами N_2 // Проблемы космической физики. 1973. № 8. С. 81.
221. Коваль А. Г., Бобков В. В., Климовский Ю. А., Фогель Я. М., Король Н. Л., Нам Б. П., Эстрина Н. Л. Влияние легирования меди алюминием на состав химических соединений, появляющихся на ее поверхности // Электронная техника. Сер. 6. Материалы. 1974. Вып. 4. С. 24–31.
222. Коваль А. Г., Мельников В. Н., Прошак Л. И., Исаев Ф. М., Бронфин М. Б., Фогель Я. М. Изучение химических соединений на поверхности никеля методом вторичной ионно-ионной эмиссии // Исследование коррозионной стойкости материалов и покрытий в атмосфере морского тропического климата. Киев: 1974. С. 112–123.
223. Тищенко Л. П., Перегон Т. И., Зац А. В., Фогель Я. М., Гусев В. А., Мартынов И. С., Серюгин А. Л. Спектры десорбции гелия из тонких серебряных пленок, облученных ионами гелия // Взаимодействие атомных частиц с твердым телом. Киев: Наукова думка, 1974. Ч. 1. С. 145–147.
224. Коваль А. Г., Бобков В. В., Климовский Ю. А., Фогель Я. М. Исследование масс-спектров вторичных ионов, выбитых пучком ионов Ag^+ с поверхности алюминия и железа в вакууме. // Там же. 1974. Ч. 1. С. 188–191.
225. Ибралилов К. М., Татусь В. И., Прошак Л. И., Колот В. Я., Фогель Я. М. Изучение взаимодействия кислорода с никелем с помощью масс-спектрометрической методики // Там же. 1974. Ч. 1. С. 196–199.

226. Татусь В. И., Зац А. В., Козлов В. Ф., Колот В. Я., Фогель Я. М. Коррозионное воздействие воздуха и остаточных газов вакуума на поверхность магния // Там же. 1974. Ч. 1. С. 200–201.
227. Грицына В. В., Киян Т. С., Логачев Ю. Е., Коваль А. Г., Фогель Я. М. О спектре свечения возбужденных атомов кальция, выбитых пучком ионов Ag^+ с поверхности кальциевой мишени // Там же. 1974. Ч. 2. С. 3–6.
228. Грицына В. В., Киян Т. С., Логачев Ю. Е., Фогель Я. М. О свечении молекулярных частиц, выбитых с поверхности металлов пучком ионов с энергией 30 кэВ. // Там же. 1974. Ч. 2. С. 7–9.
229. Тищенко Л. П., Перегон Т. И., Зац А. В., Фогель Я. М., Гусев В. А., Мартынов И. С., Серюгин А. Л. Отжиг электросопротивления тонких серебряных пленок, содержащих внедренные частицы гелия // Там же. 1974. Ч. 2. С. 109–112.
230. Коваль А. Г., Бобков В. В., Климовский Ю. А., Стрельченко С. С., Шубина В. В., Лебедев В. В., Фогель Я. М. Исследование масс-спектра вторичных ионов, выбитых с поверхности монокристаллов арсенида галлия ионами аргона // Ж. техн. физ. 1974. Т. 44. Вып. 12. С. 2563–2567.
231. Коваль А. Г., Бобков В. В., Климовский Ю. А., Фогель Я. М. Масс-спектры вторичных ионов, выбиваемых пучком ионов Ag^+ с поверхности меди и алюминия. // Тез. докл. Второй Всесоюз. конф. по масс-спектрометрии. Л.: 1974. С. 215–216.
232. Фогель Н. Я., Мошенский А. А., Дмитренко И. М., Тищенко Л. П., Перегон Т. И., Фогель Я. М. Влияние внедрения атомов гелия на сверхпроводящие свойства индиевых пленок // Ж. эксперим. и теор. физ. 1974. Т. 66. С. 626–634.
233. Фогель Н. Я., Мошенский А. А., Дмитренко И. М., Тищенко Л. П., Перегон Т. И., Фогель Я. М., Гусев В. А., Мартынов И. С. Критические токи тонких индиевых пленок с внедренным гелием // Сб. докл. XVIII Всес. совещ. по физике низких температур. Киев: 1974. С. 320–321.
234. Тищенко Л. П., Перегон Т. И., Фогель Я. М., Серюгин А. Л., Мартынов И. С. Образование и отжиг дефектов, возникших в тонких пленках серебра, облученных ионами гелия // Атом. энергия. 1974. Т. 37. Вып. 3. С. 246.

235. Тищенко Л. П., Перегон Т. И., Зац А. В., Фогель Я. М., Мартынов И. С., Серюгин А. Л. О нагреве в вакууме серебряных пленок с внедренными частицами гелия // Атом. энергия. 1974. Т. 37. Вып. 6. С. 494–495.
236. Тищенко Л. П., Перегон Т. И., Зац А. В., Фогель Я. М., Гусев В. А., Мартынов И. С., Серюгин А. Л. Процессы, протекающие при нагреве в вакууме серебряных пленок с внедренным гелием // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физ. радиац. повреждений и радиац. материаловедение. Харьков: ФТИ АН УССР. 1974. Вып. 1 (1). С. 55–57.
237. Тищенко Л. П., Перегон Т. И., Зац А. В., Фогель Я. М. Исследование процессов, протекающих при нагреве в вакууме серебряных пленок, содержащих внедренные частицы гелия // Тез. докл. Республ. совещ. Радиационные повреждения в твердых телах. Харьков: 1974. Ч. 2. С. 11–12.
238. Gritsyna V. V., Kiyan T. S., Koval' A. G., Fogel' Ya. M. On the emission band spectrum of the Ne_2 molecule in the visible and near infrared spectral region // Opt. commun. 1974. V. 10. No. 4. P. 320–322.
239. Рекова Л. П., Мозгин В. В., Звягинцева Л. Н., Бондаренко В. Н., Фогель Я. М. Изучение процесса очистки платины, нагреваемой в атмосфере кислорода, от примеси углерода // Ж. техн. физ. 1974. Т. 44. Вып. 11. С. 2378–2382.
240. Абраменков А. Д., Фогель Я. М., Стриха В. И., Ткаченко В. М., Потехина Г. Ф., Забашта Л. А. О химическом составе поверхностного слоя кремния, находящегося в вакууме // Физ. тверд. тела. 1974. Т. 16. Вып. 8. С. 2395–2396.
241. Верховцева Э. Т., Яременко В. И., Овечкин А. Е., Фогель Я. М. О непрерывном спектре в вакуумной ультрафиолетовой области, излучаемом сверхзвуковой струей аргона, возбужденной электронным пучком. // Оптика и спектроскопия. 1974. Т. 37. Вып. 2. С. 221.
242. Верховцева Э. Т., Яременко В. И., Катрунова Е. А., Фогель Я. М. О полосатом спектре излучения молекулы Ar_2 в области резонансной линии аргона $\lambda = 1048 \text{ \AA}$ ($^1P_1 - ^1S_0$) // Письма в ЖЭТФ. 1974. Т. 20. Вып. 7. С. 479.
243. Татусь В. И., Колот В. Я., Фогель Я. М., Бокштейн С. З., Бронфин М. Б. Изучение сублимации магния в высоком вакууме с помощью масс-спектрометрической методики // Изв. АН СССР. Мет. 1974. № 6. С. 104.

244. Татусь В. И., Колот В. Я., Фогель Я. М., Бронфин М. Б. Изучение сублимации магния в атмосфере водорода низкого давления // Изв. АН СССР. Мет. 1974. № 5. С. 44.
245. Атрощенко В. И., Коробчанская И. Е., Сахаров А. А., Фогель Я. М., Панасенко В., Зезекало И. Г. Исследование взаимодействия кислорода с платиной методом вторичной ионно-ионной эмиссии // Вестн. ХПИ, Химическое машиностроение и технология. 1974. № 98. Вып. 2. С. 39–41.
246. Атрощенко В. И., Коробчанская И. Е., Сахаров А. А., Фогель Я. М., Панасенко В., Зезекало И. Г. Исследование взаимодействия аммиака с платиной методом вторичной ионно-ионной эмиссии. // Вестн. ХПИ, Химическое машиностроение и технология. 1974. № 98. Вып. 2. С. 41–43.
247. Погребняк П. С., Павленко Ю. А., Верховцева Э. Т., Фогель Я. М., Удовенко В. Устройство для возбуждения рентгеновского излучения в сверхзвуковой газовой струе. // Приборы и техн. эксперимента. 1974. № 5. С. 193.
248. Веркин Б. И., Верховцева Э. Т., Фогель Я. М. Газоструйный источник вакуумного ультрафиолетового излучения // Физика вакуумного ультрафиолетового излучения. Киев: 1974. С. 38–58.
249. Коваль А. Г., Бобков В. В., Климовский Ю. А., Фогель Я. М. Влияние объемных примесей меди на состав соединений, образующихся на ее поверхности // Докл. АН УССР. Сер. А. 1975. № 2. С. 181–184.
250. Фогель Я. М., Коваль А. Г. Вторинна іонно-іонна емісія // Вісник АН УРСР. 1975. № 3. С. 101–103.
251. Фогель Я. М. К вопросу о выборе величины плотности тока пучка первичных ионов при изучении методом ВИИЭ процессов на поверхности твердых тел. Тр. 1 Всесоюз. науч. семинара по вторичной ионно-ионной эмиссии. Харьков: ХГУ, 1975. С. 2–6. Деп. в ВИНТИ 30.09.1975. № 2783–75.
252. Деревянченко А. С., Палатник Л. С., Коваль А. Г., Мартынов И. С., Серюгина А. Л., Грицына В. В., Киян Т. С., Фогель Я. М. О структуре образований, возникающих при одновременном падении на поверхность монокристалла NaCl потока молекул углеводов и пучка ионов Ne^+ // Кристаллография. 1975. Т. 20. Вып. 4. С. 803–806.

253. Коваль А. Г., Бобков В. В., Климовский Ю. А., Стрельченко С. С., Шубина В. В., Лебедев В. В., Фогель Я. М. Применение метода вторичной ионно-ионной эмиссии для исследования полупроводниковых соединений типа $A^{III}B^V$ // Процессы роста и синтеза полупроводниковых кристаллов и пленок. Новосибирск: 1975. Ч. 2. С. 328–332.
254. Тищенко Л. П., Перегон Т. И., Зац А. В., Фогель Я. М. О процессах, протекающих при нагреве тонких серебряных пленок, содержащих внедренные частицы гелия // Изв. АН СССР. Мет. 1975. № 6. С. 80–82.
255. Fogel' N. Ya., Moshensky A. A., Tishchenko L. P., Peregon T. I., Fogel' Ya. M., Dmitrenko I. M. Effect of bombardment by helium ions on critical currents of thin indium films // Phys. Lett. 1975. V. 53A. No. 1. P. 52–54.
256. Фогель Н. Я., Мошенский А. А., Глухов А. М., Тищенко Л. П., Фогель Я. М., Дмитренко И. М. Критические токи сверхпроводящих тонких пленок индия и эффекты макроскопических неоднородностей // Proc. 14-th Intern. Conf. in Low Temp. Phys. 1975. V. 2. P. 239.
257. Исапилов К. М., Татусь В. И., Прошак Л. И., Колот В. Я., Фогель Я. М. Изучение испарения никеля и его окислов в вакууме и в атмосфере разреженного кислорода с помощью масс-спектрометрической методики // Укр. физ. ж. 1975. Т. XX. № 7. С. 1199–1201.
258. Исапилов К. М., Татусь В. И., Прошак Л. И., Колот В. Я., Фогель Я. М. Исследование взаимодействия кислорода с никелем методами масс-спектрометрии // Укр. физ. ж. 1975. Т. XX. Вып. 11. С. 1845–1853.
259. Татусь В. И., Колот В. Я., Фогель Я. М., Бронфин М. Б., Исапилов К. М. Изучение пленки продуктов коррозии, образующейся на поверхности магния при воздействии воздуха и остаточных газов высокого вакуума // Защита металлов. 1975. Т. 11. Вып. 1. С. 54–57.
260. Атрощенко В. И., Коробчанская И. Е., Сахаров А. А., Фогель Я. М., Рекова Л. П., Гринь Г. И., Мандрыка Л. А. К вопросу о роли интерметаллических соединений платины в каталитическом окислении аммиака // Вестн. ХПИ, Технология неорганических веществ. 1975. № 106. Вып. 7. С. 19–21.
261. Киян Т. С., Грицына В. В., Логачев Ю. Е., Фогель Я. М. О непрерывном спектре, испускаемом частицами, выбитыми ионным пучком с поверхности твердых тел // Письма в ЖЭТФ. 1975. Т. 21. С. 77–80.

262. Верховцева Э. Т., Яременко В. И., Катрунова Е. А., Фогель Я. М. Исследование возможностей улучшения эксплуатационных характеристик газоструйного источника вакуумного ультрафиолетового излучения. // Препринт ФТИНТ АН УССР. Харьков: 1975.
263. Верховцева Э. Т., Яременко В. И., Фогель Я. М., Овечкин А. Е., Катрунова Е. А. О распределении интенсивности в непрерывном спектре в области 1074–1130 Å, излучаемом сверхзвуковой струей аргона, возбужденной электронным пучком // Оптика и спектроскопия. 1975. Т. 38. № 1. С. 176.
264. Исрапилов К. М., Прошак Л. И., Фогель Я. М. Сверхвысоковакуумная масс-спектро-метрическая установка для изучения поверхностных процессов методом вторичной ионно-ионной эмиссии // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика высоких энергий и атомного ядра. 1975. Вып. 3 (15). ХФТИ АН УССР. С. 67–73.
265. Рекова Л. П., Мозгин В. В., Звягинцева Л. Н., Бондаренко В. Н., Фогель Я. М. Изучение эффекта влияния кислорода на термическую эмиссию ионов примесных частиц с поверхности платины // Ж. техн. физ. 1975. Т. 45. Вып. 3. С. 616.
266. Фирсов О. Б., Фогель Я. М., Юрасова В. Е. Вторичная ионно-ионная эмиссия металлов и сплавов // Укр. физ. ж. 1975. Т. XX. № 10. С. 1748.
267. Фогель Я. М. Вторичная ионно-ионная эмиссия. Сист. указатель литературы (1947–1974). Харьков: ХГУ, 1975.
268. Verkhovtseva E. T., Ovechkin A. E., Fogel' Ya. M. The vacuum–UV spectra of the supersonic jet of the Ar–Kr–Xe mixtures excited by an electronic beam. // Chem. Phys. Lett. Japan. 1975. V. 30. No. 1. P. 120–122.
269. Kiyan T. S., Gritsyna V. V., Logachev Yu. E. Fogel' Ya. M. On the continuous spectrum emitted by particles ejected from the surface of solid targets by an ion beam // Abstr. Papers VI Inter. Conf. Atomic Coll. in Solid. Amsterdam. 1975. P. 227.
270. Kiyan T. S., Gritsyna V. V., Fogel' Ya. M. On the spectrum emitted by excited particles ejected from the surface of a calcium target by a beam of Ar^+ ions. // Abstr. Papers VI Inter. Conf. Atomic Coll. in Solid. Amsterdam. 1975. P. 231.

271. Kiyani T. S., Gritsyna V. V., Logachev Yu. E., Fogel' Ya. M. Continuous spectra emitted by particles knocked out by an ion beam from the surface of a solid target. // JETP Lett. 1975. V. 21. No. 1. P. 35–37.
272. Fogel' N. Ya., Moshensky A. A., Tishchenko L. P., Peregon T. I., Fogel' Ya. M., Dmitrenko I. M. Effect of Bombardment by Helium Ions on Critical Currents of Thin Indium Films // Phys. Lett. 1975. V. 53A. No. 1. P. 52–54.
273. Коваль А. Г., Бобков В. В., Климовский Ю. А., Фогель Я. М. Масс-спектр вторичных ионов, выбиваемых пучком ионов Ag^+ с поверхности меди // Укр. физ. ж. 1976. Т. XXI. № 2. С. 236–239.
274. Киян Т. С., Грицына В. В., Фогель Я. М. Изучение атомарных и молекулярных спектров свечения частиц, выбитых с поверхности щелочноземельных металлов пучком ионов // Кратк. содерж. докл. XVI Всесоюз. конф. по эмиссионной электронике. Махачкала: 1976. Ч. 2. С. 144–145.
275. Тищенко Л. П., Гамаюнова Л. А., Фогель Я. М., Гусев В. А. Изучение процессов, протекающих при внедрении частиц гелия в тонкие пленки серебра // Там же. 1976. Ч. 2. С. 241–242.
276. Тищенко Л. П., Гамаюнова Л. А., Перегон Т. И., Фогель Я. М. Влияние внедрения ионов гелия на параметр элементарной ячейки пленок серебра // Кратк. содерж. докл. Четвертой Всесоюз. конф. Взаимодействие атомных частиц с твердым телом. Харьков: ХГУ, 1976. Ч. 2. С. 6–9.
277. Тищенко Л. П., Перегон Т. И., Фогель Я. М., Гусев В. А. Сопоставление характера процессов, протекающих при нагреве поликристаллических и монокристаллических пленок серебра, содержащих внедренные частицы гелия. // Там же. 1976. Ч. 2. С. 10–11.
278. Киян Т. С., Грицына В. В., Фогель Я. М. О непрерывном спектре, испускаемом частицами, выбитыми ионным пучком с поверхности редкоземельных металлов // Там же. 1976. Ч. 2. С. 176–177.
279. Киян Т. С., Грицына В. В., Фогель Я. М. Определение энергетической ширины зоны проводимости окиси магния спектроскопическим методом // Там же. 1976. Ч. 2. С. 178–180.
280. Рекова Л. П., Морозов А. Н., Кисель О. В., Фогель Я. М. Изучение объемных примесей на поверхности кремния методом вторичной ионно-ионной эмиссии // Там же. 1976. Ч. 3. С. 82–85.

281. Мошенский А. А., Фогель Н. Я., Сидоренко А. С., Глухов А. М., Дмитренко И. М. Тищенко Л. П., Фогель Я. М. Критические токи тонких пленок и их связь с неоднородностями параметров сверхпроводников // Физ. низк. температур. 1976. Т. 2. № 6. С. 685–695.
282. Погребняк П. С., Гнатченко Е. В., Верховцева Э. Т., Фогель Я. М. Об особенностях излучения сверхзвуковой струи аргона в ультрамягкой рентгеновской области спектра // Изв. АН СССР. 1976. Т. 40. № 2. С. 307–310.
283. Погребняк П. С., Верховцева Э. Т., Фогель Я. М. К вопросу о возможности радиационного распада коллективных уровней атома аргона // Письма в ЖЭТФ. 1976. Т. 24. № 8. С. 464–467.
284. Пістряк В. М., Козлов В. Ф., Тихинський Г. П., Фогель Я. М. Залежність струму емісії вторинних іонів від складу сплавів берилій–нікель // Укр. фіз. ж. 1976. Т. XXI. № 8. С. 1248–1252.
285. Верховцева Э. Т., Погребняк П. С., Гнатченко Е. В., Фогель Я. М. Об особенностях излучения искровых линий сверхзвуковой струей аргона в спектральной области 300–1000 Å // Оптика и спектроскопия. 1976. Т. 41. С. 155.
286. Фогель Я. М. Постадийное протекание процессов взаимодействия кислорода с металлами // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1976. Т. 40. № 12. С. 2553–2558.
287. Фогель Я. М. К вопросу о выборе величины плотности пучка первичных ионов при изучении методом ВИИЭ процессов на поверхности твердых тел // Ж. техн. физ. 1976. Т. 46. Вып. 8. С. 1787.
288. Yaremenko V. I., Katrunova E. A., Verkhovtseva E. T., Fogel' Ya. M. On the 1920 Å continuous spectrum of the supersonic Ar jet excited by an electron beam. // Opt. commun. 1976. V. 17. No. 2. P. 188–191.
289. Kiyani T. S., Gritsyna V. V., Fogel' Ya. M. On the continuous spectrum emitted by particles ejected from the surface of solid targets by an ion beam. // Nucl. Instrum. and Meth. 1976. V. 132. P. 415–417.
290. Kiyani T. S., Gritsyna V. V., Fogel' Ya. M. On the spectrum emitted by excited particles ejected from the surface of a calcium target by a beam of Ar^+ ions // Nucl. Instrum. and Meth. 1976. V. 132. P. 432–435.
291. Тищенко Л. П., Перегон Т. И., Фогель Я. М., Гусев В. А. Поведение при нагреве поли- и монокристаллических пленок с внедренным гелием // Атом. энергия. 1977. Т. 43. Вып. 3. С. 198–199.

292. Тищенко Л. П., Гамаюнова Л. А., Козьма А. А., Перегон Т. И., Фукс М. Я., Фогель Я. М. Изменение параметров структуры тонких пленок серебра при внедрении ионов гелия и последующем отжиге легированных гелием пленок // Тез. докл. Республ. конф. Структура и физические свойства тонких пленок. Ужгород: Изд-во Патент, 1977. С. 38–39.
293. Тищенко Л. П., Глухов А. М., Фогель Н. Я., Гамаюнова Л. А., Фогель Я. М. Изучение зависимости электросопротивления тонких пленок серебра с внедренным гелием от температуры пленки // Там же. 1977. С. 67–68.
294. Перегон Т. И., Зац А. В., Тищенко Л. П., Фогель Я. М., Гусев В. А. К вопросу о легировании пленок меди ионами гелия // Там же. 1977. С. 74.
295. Гамаюнова Л. А., Козьма А. А., Тищенко Л. П., Фогель Я. М., Фукс М. Я. Рентгено-дифрактометрическое исследование влияния облучения ионами гелия на субструктуру монокристаллических пленок серебра // Тез. докл. Всесоюз. конф. Радиационные эффекты в твердых телах. Ашхабад: 1977. С. 51–52.
296. Атрощенко В. И., Коробчанская И. Е., Сахаров А. А., Фогель Я. М., Гринь Г. И. Исследование реакции окисления аммиака на платине масс-спектрометрическими методами // Кинетика и катализ. 1977. Т. 18. Вып. 1. С. 179–183.
297. А. с. № 573069 (СССР). Способ получения непрерывных спектров излучения инертных газов в ультрафиолетовой области / Верховцева Э. Т., Фогель Я. М., Веркин Б. И., Яременко В. И., Овечкин А. Е. Заявка № 2313695 с приоритетом от 12.01.76. Оpubл. 20.05.1977 г.
298. Verkhovtseva E. T., Katrunova E. A., Ovechkin A. E., Fogel' Ya. M. Study of the VUV spectrum of a supersonic krypton jet excited by an electron beam. // Chem Phys. Lett. 1977. V. 50. No. 3. P. 463–467.
299. Kiyani T. S., Gritsyna V. V., Fogel' Ya. M. On the spatial intensity distribution of the continuous spectrum emitted by particles ejected from metals by an ion beam. // Abstr. Papers of VII Inter. Conf. on Atomic Coll. in Solids. M.: 1977, p. 2. P. 321.
300. Палатник Л. С., Козьма А. А., Фукс М. Я., Фогель Я. М., Тищенко Л. П. Радиационный полиморфизм в твердых растворах Ag–He // Докл. АН СССР. 1978. Т. 242. № 2. С. 333–336.

301. Tishchenko L. P., Gamayunova L. A., Fogel' Ya. M., Gusev V. A. Study of Processes at Helium Ion Bombardment of Thin Silver Films // Radiat. Eff. 1978. V. 35. No. 1–2. P. 7–11.
302. Палатник Л. С., Козьма А. А., Фукс М. Я., **Фогель Я. М.**, Тищенко Л. П., Перегон Т. И. Твердые растворы Не, имплантированного в монокристаллические пленки серебра и золота // Матер. V Всесоюз. конф. Взаимодействие атомных частиц с твердым телом. Минск: 1978. Ч. 3. С. 138–141.
303. Физгеер Б. М., Полякова Г. Н., Фогель Я. М. Энергетические распределения осколков, возникающих в процессе диссоциативного возбуждения молекул электронным ударом // Матер. Всесоюз. сем. Процессы диссоциации молекул электронами. Деп. в ВИНТИ 10.08.78. № 2683-78. С. 28–53.
304. Верховцева Э. Т., Овечкин А. Е. Фогель Я. М. К вопросу о механизме излучения непрерывного спектра аргона с максимумом интенсивности $1920 \text{ \AA}$ // Оптика и спектроскопия. 1978. Т. 44. Вып. 1. С. 192–193.
305. Яременко В. И., Верховцева Э. Т., Фогель Я. М. О ВУФ спектре излучений сверхзвуковой струи аргона, возбужденной электронным пучком // Препринт ФТИНТ АН УССР. № 3-78. Харьков: 1978. С. 1–25.
306. Верховцева Э. Т., Яременко В. И., Фогель Я. М. О происхождении непрерывного спектра с максимумом интенсивности $\lambda = 1090 \text{ \AA}$, излучаемого возбужденной электронным пучком сверхзвуковой струей аргона // Оптика и спектроскопия. 1978. Т. 44. Вып. 2. С. 389–390.
307. Киян Т. С., Грицына В. В., **Фогель Я. М.** О непрерывных спектрах, излучаемых частицами, выбитыми ионным пучком из металлических мишеней // Ж. эксперим. и теор. физ. 1978. Т. 74. Вып. 4. С. 1394–1405.
308. Kiyani T. S., Gritsyna V. V., **Fogel' Ya. M.** Influence of the radiationless transitions on an intensity of the optical radiation emitted by excited atoms ejected from solids by an ion beam. // Z. Phys. 1978. V. 285A. P. 257–258.
309. Verkhovtseva E. T., Pogrebnyak P. S., Fogel' Ya. M. New interpretation of ultrasoft X-ray emission spectrum of argon in the region of 250–270 eV. // Phys. Lett. 1978. V. 65 A. No. 2.
310. Kiyani T. S., Gritsyna V. V., **Fogel' Ya. M.** Influence of cascade transitions on the effective lifetime of excited atoms ejected from solids under ion

- bombardment. // Abstr. Papers of VI Inter. Conf. on Atomic Phys. Riga: 1978. P. 320–321.
311. Перегон Т. И., Зац А. В., Гусев В. А., **Фогель Я. М.**, Грановский В. Г. Исследование влияния концентрации на десорбцию гелия из монокристаллических пленок меди // Тез. докл. IX Всесоюз. совещ. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. М.: МГУ, 1978. С. 89–90.
312. Перегон Т. И., Зац А. В., Гусев В. А., **Фогель Я. М.**, Грановский В. Г. Исследование влияния концентрации на десорбцию гелия из монокристаллических пленок меди // Тр. IX Всесоюз. совещ. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. М.: МГУ, 1979. Ч. 4. С. 259–263.
313. Палатник Л. С., Козьма А. А., Фукс М. Я., **Фогель Я. М.**, Тищенко Л. П., Перегон Т. И. Полиморфные превращения при имплантации гелия в эпитаксиальные пленки Ag и Au // Металлофизика. 1979. Т. 1. № 1. С. 106–114.
314. Тищенко Л. П., **Фогель Я. М.** Изучение процессов, протекающих в системе металлическая пленка–имплантированный газ // Тез. докл. Всесоюз. сем. Вторичная ионная и ионно-фотонная эмиссия. Харьков: ХГУ, 1980. С. 124–126.
315. Верховцева Э. Т., **Фогель Я. М.** Применение газоструйного источника для решения некоторых физических задач // Там же. 1980. С. 169–170.
316. Тищенко Л. П., **Фогель Я. М.** Изучение процессов, протекающих в системе металлическая пленка–имплантированный газ // Радиотехн. и электрон. 1981. Т. XXVI. № 9. С. 1961–1968.
317. А. с. 1117521, МКИ³ G 01 N 27/20 (СССР). Способ определения радиационных точечных дефектов в конструкционных материалах / Фогель Я. М., Тищенко Л. П., Перегон Т. И., Коваль А. Г. Заявка № 3509818/18-25. с приоритетом от 09.11.82. Оpubл. 07.10.84. // Бюл. 1984. № 37. 2 с.
318. А. с. 1163162 (СССР). Способ возбуждения спектров гелия и неона / Фогель Я. М., Грицына В. В., Киян Т. С., Коваль А. Г. Заявка № 3575740. с приоритетом от 11.01.83. Оpubл. 22.02.85. // Бюл. 1985. № 23. 2 с.

Диссертации, защищенные учениками Я. М. Фогеля

- Крупник Л. И. Источник отрицательных ионов водорода, основанный на явлении захвата электронов положительными ионами при их прохождении через вещество. 1956.
- Митин Р. В. Образование отрицательных ионов при однократных столкновениях ионов H^+ , C^+ , O^+ , B^+ , Cl^+ с молекулами газов. 1958.
- Анкудинов В. А. Изучение процессов захвата и потери электрона атомами H, He, B, C, O и F при однократных столкновениях с молекулами газов. 1959.
- Слабоспицкий Р. П. Изучение вторичной ионной эмиссии при бомбардировке металла положительными ионами. 1961.
- Коваль А. Г. Изучение некоторых процессов взаимодействия отрицательных ионов с энергией 10–50 кэВ при однократных столкновениях с молекулами газов. 1962.
- Надыкто Б. Т. Применение явления вторичной ионной эмиссии к изучению механизма гетерогенных каталитических реакций. 1964.
- Козлов В. Ф. Двойная перезарядка однозарядных положительных ионов при малых энергиях. 1965.
- Пилипенко Д. В. Исследование процессов потери и захвата электрона быстрыми атомами и отрицательными ионами водорода при их взаимодействии с молекулами газа. 1965.
- Швачко В. И. Изучение некоторых коррозионных и каталитических процессов методом вторичной ионно-ионной эмиссии. 1966.
- Полякова Г. Н. Некоторые закономерности возбуждения колебательного и вращательного движения молекул в элементарных процессах ионно- и электронно-молекулярных столкновений. 1967.

- Рекова Л. П. Исследование влияния газов на термоионную эмиссию металлов. 1969.
- Рыбалко В. Ф. Изучение взаимодействия кислорода с поверхностью вольфрама методом вторичной ионно-ионной эмиссии. 1971.
- Верховцева Э. Т. Источник вакуумного ультрафиолетового излучения, основанный на возбуждении сверхзвуковой струи газа электронным пучком. 1971.
- Абраменков А. Д. Исследование методом вторичной ионно-ионной эмиссии процессов, происходящих при нанесении металлической пленки на металлическую поверхность. 1972.
- Колот В. Я. Изучение взаимодействия кислорода с поверхностью молибдена методом вторичной ионно-ионной эмиссии. 1972.
- Чечетенко В. В. Изучение влияния ионной бомбардировки на некоторые структурно-чувствительные параметры тонких металлических пленок. 1972.
- Коппе В. Т. Исследование эмиссий молекулярных газов, возбужденных быстрыми электронами. 1973.
- Грицына В. В. Исследование спектров и свойств свечения, возникающего при бомбардировке твердых тел ионами средних энергий. 1973.
- Гусев В. А. Исследование процессов диссоциации и ионизации при столкновениях ионов и атомов водорода и благородных газов с двухатомными молекулами. 1973.
- Ерко В. Ф. Возбуждение двухатомных молекул электронами и тяжелыми частицами малых энергий. 1974.
- Пистряк В. М. Применение метода вторичной ионно-ионной эмиссии для количественного определения содержания и распределения примесей в твердых телах и для исследования некоторых процессов, происходящих в твердых телах. 1974.

- Мозгин В. В. Эффект влияния газов на термоионную эмиссию примесей в металлах и возможности его применения. 1974.
- Коробчанская И. Е. Исследование реакции окисления аммиака на платине масс-спектрометрическими методами. 1974.
- Исрапилов К. М. Исследование взаимодействия кислорода с никелем методами масс-спектрометрии. 1975.
- Физгеер Б. М. Распределение энергии по различным степеням свободы осколков, образованных при диссоциации многоатомных молекул электронным ударом. 1976.
- Татусь В. И. Изучение сублимации магния в высоком вакууме и атмосфере разреженного водорода с помощью масс-спектрометрических методик. 1979.
- Тищенко Л. П. Изучение процессов, протекающих в системе тонкая металлическая пленка – имплантированный газ. 1980.
- Яременко В. И. Излучение вакуумного ультрафиолета сверхзвуковой струей аргона, возбужденной электронным пучком. 1981.
- Киян Т. С. Исследование спектров свечения частиц, выбитых ионным пучком с поверхности твердых тел. 1983.
- Бобков В. В. Исследование процессов взаимодействия поверхности металлов с кислородом и объемными примесями методом масс-спектрометрии вторичных ионов. 1983.
- Погребняк П. С. Радиационный распад вакансий в субвалентных оболочках атомов Ag, Kr, Xe, возбужденных электронным пучком. 1984.
- Перегон Т. И. Образование и поведение дефектов в тонких металлических пленках, облученных ионами гелия и водорода. 1993.

THERE IS NO BETTER FATHER THAN MINE

My father... Adorable. Significant. Reliable as a rock. Infinitely kind. Modest. Clever as nobody else in my surrounding. Strong, with tremendous fortitude. The ideal I was always striving to.

He gave me everything... Not just his genes. They were apparently good. The most important thing is that he actually defined what personality I would become. And I will be grateful to him for that to my last day.

I do not remember him teaching me in any obvious manner, giving me lectures or punishing. His vocabulary almost did not contain the word “prohibited”, maybe be only “you’d better not”... I never heard from him any words of censure. He was never moralizing to me, did not stand me in corner. He was not shouting at me and his hands were always tender. He was just talking to me. If it happened that I was guilty, he did not speak about the fault. He was considering my misconduct (I’d like to emphasize – not using the words “guilt” or “fault”) from the “scientific” and everyday point of view. He told me some stories from his own life, just stories. He gave me an opportunity to see myself from the side view, but not talking specifically about me. And then I could make a conclusion if I was right or not, what I should not repeat in the future and whether I should bring my apologies to anyone. As a result I understood that I had done some stupid or not quite admirable deed. I decided on my own that I would never do anything similar and I never changed my decision. This became a postulate, a part of my nature. Sometimes one father’s joke was enough for me to understand what sin I had made. He was always speaking to me almost as to an adult, even when I was five. I’m afraid that when growing my son I did not always succeed to be as restrained and wise as my father was.

I was brought up in an amazing family, where there wasn’t ever a quarrel or a scandal. Of course, sometimes there were some disagreements, but they were always solved in course of a peaceful discussion.

We had a traditional ritual at home: in the evening, when I was going to bed, my father read books to me, mostly poetry, but also stories and tales. Poems of Lermontov, Burns, Utkin (“Each roof has its own mice” – remembered it as a Commandment), Walter Scott’s and Schiller’s ballades translated by Zhukovsky, many of Marshak’s translations including several Shakespeare’s sonnets stuck in my memory most of all. I was reading many of them to my son and later to my grandson with the same pleasure. In particular, we all loved the great tales by Oscar Wilde.

My father was born in a small mining town of Lugansk in Ukraine. He was a fifth child in the family, but all his four elder brothers died in infancy. The father survived by a miracle. His father was a manager of a little mine and his mother was a housewife. His father was killed in a mine explosion when my father was about 8. After this accident and certainly because of it my father became a tramp, as neglected children were called at that time. His mother had to work hard, so she did not manage to keep an eye on her son. Little Yanya in a company of others boys hung around, pilfered apples from neighboring gardens and was a part of all sorts of cheeky pranks. And, of course, his speech was that of a tramp. Sometimes he caught it hot for all his feats. On the other hand, he was absolutely different from the other boys, especially for his passion for books. First he read everything he could find. And later on he developed a taste for good literature. He read not only belles-lettres, but also all those few popular science editions he came across. As a result, he got great interest for natural sciences, especially for astronomy. Foreign languages were another of my Dad's passions. He studied them himself since the family had no possibility to pay for a teacher.

His skills, aspiration for knowledge and persistence gave excellent results. He became a first-generation intellectual, and of the highest grade. He turned out to be a magnificent physicist. I am sure that people of his professional environment could prove it. Besides, he perfectly knew literature, music and painting. Rembrandt was his favorite artist. When my father came across Rembrandt's album on a black market, he bought it not ever asking for its price. I remember the reverence he had when turning the pages of the album and showing it to me and my mother, remember how he commented his favorite paintings, how excited he was. The number one composer for him was Mozart. He could listen to his music for hours. He had a dream to have the entire Mozart's oeuvre. And he really made a big collection of records. I remember that when I was going on a business trip, which happened quite often, the first thing to pack was a copy of a well-known Köchel' catalogue with the list of all works of the great composer where I marked those that Dad already had in his collection. If I was not able to find something new of Mozartiana I got horribly upset. But mostly I came back with a new catch and it was a great joy for all of us. My father had many favorite poets but he loved Lermontov the best. He liked very much English belles-lettres. England seemed to him to be the best country in the world. He always had a dream to visit it, but... Of course, he was not allowed to travel abroad.

Also I'd like to say that no matter how many new things my Dad read, heard or saw, his preferences remained almost unchanged through the years. As for philosophy, he didn't have much interest for it. Maybe the reason was in the forced manner used for imposing of Marxist-Leninist philosophy in students' minds at the institute.

The scale of Dad's education was very impressive.

The most essential thing revealing a true intellectual in my father was his deep moral basis not allowing him to violate his own principles. He was kind, responsive. He always helped his colleagues and just acquaintances to solve their private problems, giving to it all his time and effort. Not to mention that enormous amount of time that he devoted to each of his students to open to them both the basics and the fine nuances of Science. He also did not miss any chance to impart cultural and moral values to them.

As well I want to say several words about my mother. As a "dowry" she brought to my father an excellent library. My grandfather who died even before I was born, was a book collector. He had all complete sets of works published at Marks, Sytin, Panteleev brothers, Soikin and other publishing houses of many authors from almost unknown now Schnitzler, Sheller-Mikhailov, d'Annunzio and others to Dickens, Jack London, Dostoevsky, Tolstoy... My mother grew up on those books. Unfortunately, during the War a part of them were used for kindling in an iron wood stove. Our family, except of my father, had to stay in Kharkov which was occupied by Germans. I will describe it in details later. The books were Dad's main hobby. He was an inveterate bibliophile and never missed a Sunday book market. Good books were hard to get, as well as nearly everything else. My father was not of that sort of the people who knew how to get something. That is why the black market was just for him. With our very modest life style we never denied ourselves good books whatever their prices were.

My mother's passions were music and cinema. Mom had finished Kharkov Conservatoire and she played piano quite well. The music did not become her profession and remained only her big love (my mother had two higher educations – later on she graduated from the Institute of Hydrometeorology where she met Dad). Therefore a good parlour Becker grand piano became the first and maybe the only acquisition of our family after the War. Chopin was Mom's idol. She played him most often. Dad listened to Chopin with great pleasure and I also loved his music not less than Mom did. Later my preferences changed and I had more interest for Rakmaninov, Brahms, Gershwin, Schnittke. But my

childhood love for Chopin was still there. If at the beginning of my life Mozart seemed to me pretty dull and monotonous (with just several exceptions – “Don Juan” opera, Requiem and the Piano Concerto No. 21), as time went on I started to understand and value him much more. The list of my favorite compositions by Mozart became much wider, but still he was not my favorite.

We – all our family together – often went to the theatre, to the opera and never missed a concert at the philharmonic hall. Mom and Dad being great music lovers always took me with them. I’m happy that my childhood, my youth were filled with music, true music.

As for cinema, Mom was a real cinephile, and to a great extent she communicated this addiction to my father. They never missed a good film. They watched some for several times. My parents adored neorealism cinema. And my Mom was a walking encyclopedia – she knew who and when produced the film, what actors were involved, which films were awarded at the festivals etc. Just as father collected fiction and scientific books, Mom bought all the books and magazines related to cinema. I have found my own niche – I collected poems and art albums.

But I would like to get back to the main contents of my father’s life. Since I also became a physicist (surely, not without Dad’s influence, but also without any pressure from his side, even in the form of advices), I can quite competently and I hope without prejudice judge his scientific abilities and aspirations. On the one hand, he generated many valuable scientific ideas. There are very little people capable of such flashes of inspiration in science, as well as in other life situations. On the other hand, he knew how to bring his ideas to life. Such a combination of valuable features of a scientist in one person can be for sure met very rarely. As a rule, there are people generating ideas and the other ones – good executors. Obviously, science needs both. But a combination of these abilities turns a man into a scientist of God-given talent.

From my childhood I know these special features of his, since as a rule when Dad came home he used to tell me and my mother about everything interesting that had happened to him at work. He had a brilliant ability to talk about the most complicated things in simple terms, to make his story exciting, to explain it all using simple analogues. First, when at junior school, I mostly listened to him, and starting from, say, the forth form I began asking questions and even tried to hypothesize. As soon as Dad had a new idea, he told it to such “dummies” as me and Mom, and we were really interested, listened to him with delight. He explained to us what kind of experiments were to be made to check if

the idea was correct. And after that he told us about the results of measurements he got and if the idea proved to be really good. He seemed to be a fountain of ideas.

But now I'd like to tell you about my father's biography in some more details. In his youth, despite of communicating mostly with tramps, he already knew what he wanted to do in his life. He had interest for natural sciences and especially, as I already mentioned, for the astronomy. At that time there was just one astronomy faculty in the whole huge USSR – at Leningrad University with only 20 vacancies per year. Dad went to Leningrad to enter this University. He failed. Of course, he didn't fail at the exams. He just was not the right person. At that time of proletarian dictatorship when selecting students to enter high education institutions special attention was paid first of all to origin of the applicants, and only then to the marks received. All people entering institutes and universities were divided into 4 categories:

Children of workers

Children of peasants

Children of officers

Others.

Unfortunately, my Dad was attributed to the last category, since his father was not from any of the first three groups. Children of workers had the biggest advantage. The other categories are ranged in descending order of benefits for entering the higher education institutions and actual chances to obtain the higher education.

After his failure to become a student of the astronomy faculty my father came to a conclusion that at a repeat attempt to enter this university his chances would still be zero. He had to make another choice. Then he fixed upon physics which was quite natural, since this science captivated him as well as astronomy. But unlike the situation with astronomy, there were many faculties with orientation on physics which significantly increased probability of admission. Indeed in 1928 he easily entered the Institute of Physics, Chemistry and Mathematics in Kharkov.

Still being a forth year student my Dad started experimental work at the Ukrainian Institute of Physics and Technology (UIPhT). He worked at the laboratory of A. I. Leypunsky, where at that time the first experiments in the USSR on light atom nuclear fission were carried out. To choose an experimentalist profession instead of a theorist one was as natural for him as to breathe. He always believed that the most beautiful, the most elegant and remarkable theory is

of course necessary and important, but the final word in establishment of truth belongs to Its Majesty the Experiment.

After graduating from the Institute my father was placed to work at the same laboratory at the UIPhT as junior research assistant. In several years, before Leypunsky went on a business trip abroad, to Rutherford, my father passed to work at the Ukrainian Institute of Applied Chemistry (currently – State Research and Design Institute of Basic Chemistry (NIOCHIM)). There he defended his PhD thesis, supervised by N. Borisov. And though life, and first of all – the War have parted the student and his teacher (Borisov used to live in Kiev after the War), their relations always remained warm and friendly.

Together with experimental work my father did a lot of teaching at many higher education institutions of Kharkov. Before the War he became the Head of the chair of physics at Kharkov Hydrometeorological Institute.

Later this fact played a sad role in our family's destiny. At the very beginning of the War Dad tried to join the acting army as a volunteer. He received a flat refusal – he had a too “strong” exemption from active duty, since by that time the Hydrometeorological Institute was naturally included in the list of military higher education institutions. And very soon after that my father was appointed responsible for the evacuation of the Hydrometeorological Institute to the East.

The Hydrometeorological Institute had great difficulties with evacuation. The Institute was given a train to evacuate equipment, staff and their families when Hitler's army was already in several dozens of kilometers from Kharkov – just a couple of days before Kharkov was occupied. This train appeared to be the last one that managed to leave Kharkov before the Germans captured the city.

Dad was in painful condition. He had to solve a difficult dilemma – to decide if he should take the family with him or not. In which case his family would be more likely to stay alive? The train had very little chances to break through. Living in an occupied city was really very hard. But Soviet radio then told nothing about the atrocities of fascists in the occupied territories. On the day of Dad's departure he, Mom and grandmother – my Dad's Mom, who lived with us – made a common decision that in the existing situation all of us, except of my father, should stay. They considered that it would be less risky for us to stay on the same place than to leave together with Dad. And he, of course, had no choice.

But by a miracle the train managed to break through despite of bombing and artillery attacks. Of course, there were many victims, but many people survived and made it to Ashkhabad where the Institute worked in the times of occupation. But my grandma, she died. She was shot in Drobitsky Yar together with the other Jews. She had chances to survive, she didn't really look like a typical Jew. Mom's relatives suggested her to move to their place in Klochkovska street and to live there under a false name. But grandmother thanked them and refused. She didn't want to endanger them, since all the leaflets hanging all over the city were telling that those harboring Jews would face death penalty.

Our communal flat neighbors were quite anti-Semite, so Mom didn't want to take a risk and let me stay with her at home. During the entire occupation period my mother hid me at her aunt and uncle's, Natalia Vasilievna and Ivan Fedorovich Malikov, who actually saved my life. Their love, kindness, devotion and courage knew no bounds. They didn't have their own children, and all of their love was focused on me. They protected me and loved me extremely. And the price they paid for it almost every day was huge! They lived in a communal flat, but no one in the other 7 rooms ever saw me during the occupation period, no one suspected that I was staying there. Fortunately, there was a direct exit from the room of aunt Tusja and uncle Vanja to the backstairs that were walled up from below, so nobody used it. Except of me. If someone rang or knocked on the door, I grabbed my coat and hat (if it was cold outside) that were always lying near, and rushed out. My destiny was somewhat alike with that of Anne Frank, but I managed to escape tragic death since the Germans didn't find me. And, of course, there was no chance for me to keep a diary – I was 3 to 5 years old during the occupation period. Till the very last day aunt Tusja and uncle Vanja still were for me the closest people.

Dad managed to get back to Kharkov several months after its liberation. The Hydrometeorological Institute he used to work at was reevacuated to Odessa instead of Kharkov. Since everyone knew that my father's family stayed in Kharkov, he was allowed to quit the job at the Hydrometeorological Institute and to go home.

Dad found out about the death of his mother only when back to Kharkov from Ashkhabad. This was one of the most painful situations in his life. Right after coming back my father went to work at the UIPhT and continued working there till that black day when he was kicked out of the institute, absurdly and dishonestly, despite of all the creative potential that he still had and his very successful work. I will write about it in more details a bit later.

Work always excited him and, of course, to a certain extent helped to distract him from the grief. I think that close contact with me also had some curative effect. Strange as it may seem, almost every day I came to Dad's work. I went to a kindergarten of the UIPhT located just next to laboratory buildings. It was very modest and badly equipped. At that time there was no sleeping accommodation. So for day-time sleep my father set up a folding bed for me. Normally he put it in a huge room where he used to work and where an enormous Van-de-Graaf linear accelerator was installed. My folding bed usually was placed behind this colossal apparatus, high as a 4-storey building. I was a curious child and I was asking questions all the time. And why do we need that accelerator? How is it made inside? What is this shutter or some other part for? Dad answered all of my questions in an understandable for me manner. I wouldn't say that I became a big specialist in accelerative units, but from the early childhood I had lots of physics terms in my vocabulary.

I do not remember my father before the War, since I wasn't even three when fascists occupied our city. I met him when I was 5 and when he was back from evacuation. He seemed to me to be the most kind and smart, the most wonderful and beautiful father in the world. My whole future life was a proof of my first impression.

Our family was unique. As I already said before, kind attitude and calmness reigned in our house. I never witnessed any quarrel. I never heard Mom or Dad to raise their voices even in case of some misunderstanding. All the conflicts were being solved through consensus, though this word wasn't used in Russian language at that time. Dad was guiding me with a firm hand, but his hands were always gentle. What is meant by a firm hand? Nobody ever shouted at me, and, of course, never abused. But I also wasn't pampered, my family's life – and mine as well – was quite Spartan. However, Dad never punished me or gave me strict orders. Very early I learned from my father the Ten Commandments. And again they were not given to me as instructions, but rather as folklore created almost at the dawn of human society, preserving the wisdom of our ancient ancestors and containing the evident and everlasting value for all the times. The Commandments meant the Good, the non-observance of them – the Evil. They were so simple and easy to understand that needed no explanation. Surely, the Commandments have been etched in my memory and in my mind forever.

After the challenges of the War it happened so that it never came to my mind to be capricious, I never tortured my parents with demands to buy something. I was absolutely disinterested to toys. But I always loved and cared for a

handmade rabbit that my Dad brought to me from Ashkhabad. The books took the place of the toys in my life. Probably, it was caused both by father's devotion to books and his wonderful tradition to read to me everything that he considered to be the best in literature.

In summer, during the holidays I wasn't pampered as well. I'd never been to a pioneer camp. My Dad considered it unethical to buy a cheap voucher at the Institute for me to go to the camp, since there were many people who needed such vouchers more than we did.

Mostly we spent our vacation in Yuzhny village not far from Kharkov, renting a dacha for the period of father's vacation or on Vorskla river in a small village Skelk, usually together with our good friends. Dad loved to play tennis (there were tennis courts on the UIPhT territory), but later he gave it up not wanting to waste the time that he could use for his work. On vacation we played volleyball, many intellectual games that were popular at that time, traveled in boats down Vorskla river, walked a lot. Only once we've been to the Crimea, to Alushta, camp wild. Alushta was good, but I preferred countryside vacations. And Mom as well. In some rare cases Dad spent a part of his vacation in the Crimea, but not together with me and Mom.

Dad's work went on quite successfully. But there were hard times, approximately in 1950, at the period of inspired by Stalin struggling against so called cosmopolitism. Even then everyone knew that the word "cosmopolite" at that time was actually a synonym of the word "Jew" (as we would say today, the word "cosmopolite" was a politically correct synonym of another word – "Jew"). Many Jews, including even such well-known scientists as Korsunsky and Pines, were thrown out of the UIPhT. Lots of Jews were dismissed. It was accompanied by taking away flats owned by the Institute and earlier provided for their families. Strange as it may seem, but then it didn't happen to my father. It didn't, though he definitely had some "sins". For example, before the War he employed to his chair a son of the arrested "public enemy". Then I knew everything about a wave of dismissals of Jews that covered not only the UIPhT but also other scientific and research institutions. For a long time before my eyes I had a bright example of what could happen to those who were dismissed. That was a story of one of the families that lived next to us. They were turned out of their apartment and for half a year or so they took shelter under the staircase of the building with all of their stuff.

I never thought of asking Dad why he didn't become a victim of that campaign. The answer seemed absolutely obvious to me – he was a too necessary person, irreplaceable. Then Dad worked at the department of Korsunsky and if

he had been kicked out after the dismissal of Korsunsky, a whole sector would have been beheaded. Now I may assume that it was the Deputy Director of the Institute Anton Karlovich Valter to defend my father, as he highly appreciated Dad's work and had very good relations with my father. But it's just my guess. Dad got a blow from the other side – unexpectedly my mother faced that same wave of dismissals. A 100% Russian, Bykova Galina Aleksandrovna, she worked at the same department. Maybe she was dismissed because of a paragraph “Wives and husbands of Jews” in the reports required by NKVD.

I can say for sure that father perfectly understood everything that was going on in the country, what Stalin, NKVD and the other sinister authorities were. He always discussed with my mother all the news of the country, including innumerable arrests and violence at the end of the 30s, not only the struggle against “cosmopolitanism”. All this was talked over in my presence. Only once father asked me: “I'm sure you understand that you shouldn't repeat anything similar to what you hear at home elsewhere, don't you?” Of course, I did understand it. He trusted me absolutely, so there was not a case when their discussions ended up when I entered the room.

Then there was another shock – a well-known “Doctors' plot”. Our whole family was very worried and upset about it. And we all breathed a sigh of relief when the Tyrant died. I couldn't cry as everyone around did at the mourning meeting at our school. I had to imitate tears with my saliva. It was so scary to stand out against the others.

Despite the awfully difficult situation, Dad kept on working hard together with his colleagues creating ion beam sources of a new type. Using these sources he actively studied nuclear and molecular collisions and soon became one of the most famous personalities in this field of physics.

Again he started teaching, this time at the faculty of physics and mathematics of Kharkov University. There he also organized a new experimental laboratory of ion processes. He created a new sector studying interaction of ion beams with the solid body surfaces and secondary ion emission. For a long time he'd been doing it on a voluntary basis. Later on by the decision of the Board of the State Committee for science and technology of the Council of Ministers of the USSR the laboratory received official status, my Dad became its Head.

Starting from 1972 after coming into force of the Decree of the Council of Ministers of the USSR on prohibition of combining executive positions in scientific institutes and higher education institutions, associate professor A. G. Koval became the Head of this laboratory, and my father on a voluntary basis remained scientific advisor of many works carried out there.

Together with intensive and fruitful activity as a Head of laboratories at PhTI of the Academy of Sciences of Ukrainian Soviet Socialist Republic and at the Kharkov University, he was also a leader of a science group at the ILTPhE (Institute for Low Temperature Physics and Engineering) of the AS of Ukrainian SSR where a complex of devices for imitation of solar radiation was being developed.

My father's career history includes many great achievements in several fields of physics. Also we shouldn't forget about the works in x-ray spectroscopy that he performed before the War at the dawn of this area of expertise.

As we know from the history of the Soviet Union, good scientific name, wide publicity within the country and abroad, outstanding results in scientific activity meant nothing in our country. How many eminent scientists such as Shubnikov, Vavilov were destroyed in Stalin times! If it wasn't for the interference of Kapitsa the same could have happened to Lev Landau, the future Nobel prize winner. Of course, during the stagnation period the Regime already wasn't that terrible. But its main postulates were still in force. It had a tragic influence on my father's life. One "fine" day at the beginning of the 70s he was forced to leave the Institute.

In such situation that was critically difficult for him, Dad behaved more than decently. He never complained, never demonstrated his depression and despair which, I'm sure, lived in his heart when he was deprived of work that he loved. He was absorbed in his work not less than before. He continued working with his University students as if nothing had happened. Physics was the greatest love of his life. He worked on a voluntary basis, i.e. without getting paid, but with the same enthusiasm. There he worked almost to his last day.

He looked the same as before. But it appeared that the awful stress he'd been through – and which, I'm sure, he felt every day – cost him life.

My father was a Man of the highest standard in every respect, and I always wanted to live my life according to my father's pattern. I hope I managed to do it, at least to a certain extent.

N. Ya. Fogel,

*Doctor of Physics and Mathematics,
Professor emeritus.*

The final version of the text was not agreed with Nina Yakovlevna because of her death in Israel on 03.05.2010.

MY FIRST TUTOR. PASSAGE FROM THE BOOK “MY LIFE...” 2006.

Beginning 1951 I am a 5-th year student of special department at physico-mathematical faculty of Kharkov State University. I showed up at famous Physico-Technical Institute of UkrSSR (UPhTI), as it turned out, for the next 36 years. I was lucky, Yakov Mikhailovich Fogel' took me to his scientific group to make my diploma work. With good experimental equipment and of course with such a tutor I completed my work on high-frequency ion source for the electrostatic accelerator ahead of schedule and on a high “fogel” level. Already before defence of graduation project the work was published. At that time I was one of Fogel's diploma students. Together with my workmate Yan'ka Schwarz we were often “grinding away” 11–12 hours per day performing different jobs. We were all beat up incredibly but our enthusiasm was not running low. We knew we are doing a real task for the tight work plan of the Institute.

(I have to mention, at the time I had a marriage I've got half a day to complete it: way to registry office and back).

Yakov Mikhailovich Fogel' was a “natural” physicist. I think more than three tens of excellent specialists setting the tone later on not only at the Institute were prepared by his unofficial school. He was sometimes sharp and direct. He afforded expressions in direction of his higher bosses with no respect of persons. (That made an influence on his fate later). He could give me and Yan'ka a dressing-down for the slightest oversight. But he provided all the working conditions and explained the incomprehensible into every detail. It was interesting and also useful to ask him questions. As beginners in a real experimental laboratory we saw him as an example of true physics-experimentalist. It was a highest but rare encouragement when we had no blowing-up during the summation at the end of the working day.

He was my first real tutor. He cultivated in me not only the love to the experiment and to search. He taught me also to scrupulously carry out the measurements and to make lab records. How often in my further work exactly these accurate records helped to explain the appeared difficulties, to confront the old result with a “fresh” one and to make the summary more precise. Unfortunately, I observed this quality later on not by all the scientists.

Many years after my second tutor at the Institute L. I. Bolotin which scientific group I joined after finishing my diploma work by Fogel' told me that he

was demonstrating my “fogel” lab journal to the young experimentalists as an example of experiment management.

I had after also other tutors: great Kirill Dmitrievich Sinel’nikov who transferred a leadership on research of controlled thermonuclear reactions to me. Igor Vasil’evich Kurchatov influenced my scientific fate by giving me a task of development of stellarator direction. I had an effective support in development of vacuum-plasma technologies from the side of Boris Yevgenievich Paton.

Nevertheless my special memories will be going to my First Teacher Yakov Mikhailovich Fogel’ who gave me a start into beautiful science – physics.

V. T. Tolok,

*Corresponding Member of Academy
of Sciences of the Ukraine,*

*Doctor of Physico-Mathematical Sciences,
Professor.*

YA. M. FOGEL’. TEACHER AND TUTOR

When I and all who know
And love me vanish so,
What harm to them or me
Will the lost memory be?

J. G. Whittier

It is hard to start recalling memories of half a century old.

Just at that time in autumn 1948 we, 3rd year students of Physical-Technical Faculty of Kharkov State University, have got to know a neat lecturer of middle stature entering our small auditorium for a lecture on accelerators of charged particles. He shocked us immediately with a message that everything he going to tell us doesn’t appear in any technical book and moreover in the recommended student textbooks.

This lecturer was a research worker of Kharkov Ukrainian Physical-Technical Institute (UPhTI) Yakov Mikhailovich Fogel’. His lectures were not included in traditional University program. They were based completely on materials from current scientific papers and short journal letters.

He was always bringing a pile of new scientific journals to his lectures. He told us, 3rd year greenhorns, about new studies and new technical achievements

in this young scientific branch: atomic and nuclear physics. Despite the fact that Yakov Mikhailovich was not mature professional lecturer his lectures left brightest spots and were actively attended by the students. In addition to such an unusual lecture style he wondered us by treating us as future physicists. Soon he proposed us to choose small scientific topics, to look into them with help of published materials and to make common discussions. These discussions were really significant and without any allowances on our limited knowledge. They were accompanied by long confidential conversation on our future plans, on our life approach and, most important – on place of science in our lives.

The SCIENCE was main sense of life for Yakov Mikhailovich himself. His passion to the scientific work and his frank reflections on this topic became for me the main paternal directions which I'm still following.

Probably, at the beginning of adult life the meeting with a person who defines your further way is important for every of us. It was especially important in those momentous and critical years in the middle of XX century. The euphoria of victorious end of the second world of course had an effect on our young minds and on hope for common welfare and equality. But the imminent shadow of the cold war with the allies and the confrontation of two world systems established from the current century and firmly fixed by politics of Soviet Union cooled these hopes off. This reality was reflected unfortunately also on science and their votaries. Atomic and nuclear physics turned out under control of L. P. Berija. Most of Research Institutes and Laboratories dealing with these topics got into category of "closed" organisations. Physics faculties and chairs at universities got also this kind of attention.

At the physics and mathematics faculty of Kharkov State University a special chair was created. It was under the auspice of Ministry of middle engineering industry. There a students from many cities of Soviet Union: Leningrad, Odessa, Rostov-Na-Dene, Dnepropetrovsk etc., were selected based on a special inquiry form. There was an old little housing on the Universitetskaya street where at that time the age-old buildings of the main University office, physics and mathematics faculty and chemistry faculty were located. There we have got several rooms called "auditory" which doors were conspicuously sealed with a sealing-wax. The entrance was organised strictly according to a permit. It was allowed to summarize the lectures in special notebooks which had a numbered and sealed pages. Taking into account that we were selected to the special chair as a 3rd year student our lecture summaries on general physics contained mainly Ohm's and Faraday's laws. It is absolutely clear that the confidentiality of this

content had to be under strict protection. All the notebooks had to be rigorously given after the lectures to the "Privy Seal".

In such a difficult and not really normal for the students conditions I met Yakov Mikhailovich Fogel' – the man who despite of all the nonsense of that life was bringing us into the modern science, the man which lections were awaited with unusual for the students desire.

Scientific life in Kharkov UPhTI after the war end and return from the evacuation has got strict style of closed official institution. Scientific work was done only according on the topics planned by the Committee on atomic science and technology being located in Moscow and under watchful eye of L. P. Beriia.

A smallest failure to implement planed designing or just a delay with implementation was strictly punished, right up to dismissal of scientists and closing the laboratories. A lab leaded by M. I. Korsunsky where Yakov Mikhailovich was working also felt under this steamroller. A delay with a getting of new result on newly developed setup for isotope separation by method of magnetic resonance caused a negative reaction from the high instance. Strict sanctions followed and the lab was eliminated.

M. I. Korsunsky was a prominent scientist and author of very popular monographs on atomic physics which educated many students and favored coming of a new generation of enthusiasts to the modern nuclear physics. And this scientist was completely removed from research and was compelled to move to Kazakhstan.

Research area on isotope separation was closed. A few scientists remaining in the institute were forced to start working in other branches of physics.

In this situation Yakov Mikhailovich discovered for himself some new direction of research. It lay in the field of atomic physics and more precisely in research of elementary atomic collisions. Research of these processes was just begun in the experimental physics. They were very urgent for understanding of atom structure and of origin of interaction processes of colliding particles.

In the USSR scientists of Leningrad Physical-Technical Institute had leading position in this field. The Institute was founding father of UPhTI. At that time it was not yet named after A. F. Ioffe since the famous Father-Ioffe chaired personally his brainchild. There a group of physicists under a leadership of Vladimir Markovich Dukel'sky was studying interaction processes of colliding particles; measuring cross sections of charge exchange an ionisation processes etc.

Yakov Mikhailovich brought the papers of V. M. Dukel'sky, N. V. Fedorenko, E. J. Zandberg, N. I. Ionov and others, published in Journal of Technical

Physics, to us students. That was at “homestead” as we called our isolated auditoriums. The papers were read. The methods of measurements and obtained results were discussed. And Yakov Mikhailovich after appropriate negotiations with department leaders has started organisation of experimental laboratory at “homestead”. To common pleasure the storage rooms of the faculty possessed quite a lot of standard pre-war laboratory equipment: forevacuum and low-power oil pumps, mercury Mc-Leod manometers, string galvanometers etc. Such old experimental equipment is hard to find even in the darkest corner of the modern lab but an experience which we have got with it gave us a permit to the real science. Therewith the faculty had quite good mechanical workshop with good, not young fine-mechanicians who knew specifics of experimental techniques. All the small things and glasswork which were vital for every serious setup Yakov Mikhailovich was bringing from the Institute. The work got in full swing and a student lab of atomic physics got born.

All the free time and to be honest not only the time which was free from lectures we were spending in the lab. We had to complete the planed tasks and to demonstrate something new to the visit of the “chief” as we called Yakov Mikhailovich now. He became really a chief for us.

Here I would like to point out how patient and respectful Yakov Mikhailovich treated us “green students” and how urgent and actual were the tasks he assigned for our experimental work.

One of the tasks was a development of ion source based on phenomena of thermionic emission. At the beginning of the work it was known that that some mixture of salts deposited on a filament or on a metallic substrate can emit ions under heating.

In 1940th-1950th years of XX century more regard was paid to development of ion sources because they got widely used in ion accelerators, in experiments on measurement of nuclear reaction constants with use of ion beams, in physics of elementary atomic collisions etc. Yakov Mikhailovich recognized an urgency of this development. Therefore he already started at UPhTI a development of high frequency ion sources. He got a record-breaking intensity of hydrogen ions and for the first time successfully installed a high frequency ion source in Van-de-Graaf electrostatic generator (accelerator).

We as students have got a task on development of ion source of another type. It should be based on the effect of thermionic emission and could emit basically alkali ions. With a great enthusiasm we have been absorbed in understanding of processes of salt caking, in making of long life emitter and in charac-

terisation of thermionic source. The source which we created was successfully used later for obtaining of accelerated ion beams of alkali elements and in studies of elementary processes of atomic collisions.

I can not hold from telling here that now, at the end of the first decade of XXI century, having more then fifty years of scientific experience in different fields of experimental physics I successfully use these old student developments on thermionic sources in a modern installations on controlled fusion, in tokamaks and stellarators. Thermionic sources as yet developed in Kharkov possess unique parameters and are actively used in Spain, Germany, Russia and other countries.

I mentioned this here to emphasize this amazing ability of our chief to look into the future and to anticipate the urgency of his scientific initiatives. There are many such an examples and I will give them again.

On the threshold of my diploma work in 1951 it was clear that my husband Safronov Boris Georgievich who was a 2nd War veteran and a student of the same special chair will be taken by Yakov Mikhailovich to his institute for diploma work. My position remained somehow unclear. The next neighbourhood at the Institute was grinning when talking about my possible appearance at UPhTI as a writer of a degree thesis by Yakov Mikhailovich. So, one fine day the chief finally made me happy saying that after long considerations and hesitations he takes me as a second student for making a diploma work within the walls of UPhTI. He added smiling that he will become not only my tutor and teacher. He hoped that I will become a kind of educational entity for him as well. A real sense of this humorous expression I got clarified later when I was within the walls of laboratory rooms of the Institute where we were assembling the installations for our diploma projects.

Subject of our diploma works lay in the field of atomic collisions physics. This direction was completely new for the Institute. This research niche was discovered by Yakov Mikhailovich owing to his deep understanding of the problems of modern physics and as a result of studying the last scientific publications. He got his education in 1930th in the making of soviet intellectuals. These were the years of workers' courses and collective knowledge acquirement. Yakov Mikhailovich was meanwhile a person of wide encyclopaedic knowledge and high culture. Being a scientist of natural sciences he excellently knew the world belles-lettres. He was an inveterate bibliophile and an owner of a reach library that was created in an after-war years mainly using a "service" of market dealers. For the first time we heard names of many foreign and "dis-

liked” Russian writers from chief because an official school program in those days was thoroughly cleaned by officials of education.

Knowledge of three foreign languages: English, German and French gave Yakov Mikhailovich an opportunity to know scientific news immediately after their appearance in foreign journals and to correct his plans in accordance.

In those days both libraries situated at the old and the only area at UPhTI were reach on scientific literature and belles-lettres. Director of the Institute K. D. Sinel’nikov and a scientific community took care about the regular subscription on most of the scientific journals and on getting belles-lettres novelities. Taking into account that at that time there was neither computers nor Internet, a timely knowledge of new scientific developments through the journals was vital for successful work.

At that time the Institute had a good custom which allowed senior scientists using the library keys outside working hours. Very often after we switched off the vacuum pumps Yakov Mikhailovich was coming down from the second floor where the library of the main building was situated and in the laboratory was telling us about the latest publications relevant to our studies or about sensational news in science. Frequently these get-togethers changed to the discussion of novelties in literature or in cinema and rested to the mid-night. It is natural that such a guide with an infinite passion to the science and great knowledge in wide fields of a common culture helped us who just started an adult life to determine the further way and defined the landmarks of life principles.

The scientists who remained after the devastation of M. I. Korsunsky’s laboratory were joined to the laboratory of Alexander Yakovlevich Taranov. He was a calm and self-possessed person, who was aiming for loyalty to the group of Ya. M. Fogel’ and to his scientific ideas. Academician Anton Karlovich Valter who was a Department leader and a head of the nuclear physics in those days at UPhTI supported a subject of atomic collisions proposed by a chief. Later on, till his last days he was always helping and supporting Yakov Mikhailovich. And we had to meet and to obey chief’s working style. He was strict, almost severe, was planning down to little details and aimed for result.

We had to start the new subject by creating experimental setups. That meant close contacts to designers, process engineers and most important to workmen.

At his time M. I. Korsunsky brought from Germany according to indemnity the unique park of working machines and created a great workshop. This workshop was saved and such a excellent masters of their trade Mitya Bron-

nikov and Zhora Peshkov started creation of an installation for studying of charge exchange processes and ionisation under collisions of accelerated ions with atoms and molecules of atomic particles. These masters were working with no technical drawings, using only our sketches. They understood though the task of the installation very well.

One fine day at the beginning of my appearance at the Institute we were sitting in the room adjacent to the workshop and were drawing the sketches. At some moment a discussion was heard and curious glances were seen through the slit in the door. This lasted for some time. Finally I could not stand it any longer, come to the door, abruptly opened it and asked what it's all about. After some time it became clear that the chief who treated workmen always valid at some intense moments of non-fulfilment of the tasks or even worth by making mess of a part was starting speaking with us on a well-understood traditional "Russian dialect". He captured it when working in coal mines of Donbas where he came from.

And now the workmen were quite interested which female frump was admitted by Yakov Mikhailovich to the laboratory who is not scared by working dialect corresponding to the situation. At that moment I understood chief's notation that my presence should become a red traffic light for using this jargon. And this really happened.

Seriously, all the workers of the technical services from designers down to workman of the workshop had a high opinion about respectful relations to the chief. He was always ready to explain the task and the purpose of the ordered goods. He understood well the technical capabilities. He was also helping in solving many everyday problems.

Time was creeping. Our diploma projects were defended. B. G. Safronov was given under the order of K. D. Sinelnikov to setup a mass-spectrometry laboratory. And on the chief's wish I was left in the group of Ya. M. Fogel' as a junior scientist. Investigations of elementary atomic collisions had success. They were continued and expanded. A group was getting new staff and new diploma students. Yakov Mikhailovich established close relationship to Lenin-grad Laboratory of V. M. Dukel'sky. We have started a fruitful exchange of ideas, research results, scientific plans, and visits.

As far back as I was doing my diploma project Yakov Mikhailovich noticed a new creation process of negative hydrogen and helium ions under capture of two electrons by one positive ion. This observation was on the level of scientific discovery since double capture process was never observed before. At that time

it was out of rule to claim the new scientific discoveries officially. New results were published immediately and this established the scientific priority.

I have to mention also some helpful technical novelties which were proposed by chief. They still have their originality nowadays and therefore are successfully used in modern experimental technique. For example a supersonic steam flow which was proposed as a charge exchange target for experiments on atomic collisions. This device remains the best development used for transformation of accelerated atomic beams into beams of particles with different charge states.

But his scientific foresight was completely unique. In the beginning of 60s it caused formation of a new scientific area namely of a physics of secondary ion emission. In 50s a friend and classmate of Yakov Mikhailovich from Dnepropetrovsk was often visiting our lab. I unfortunately have forgotten his name. Maybe other colleagues can recover it. He was doing experimental physics at Dnepropetrovsk University and rated well chief's tips and suggestions.

One day he brought results of his experiments on interaction of accelerated ion beams with metallic targets where ions were often observed in the flows reflected from the surface. Up to now an idea existed that the ions colliding with metallic target are neutralized there and are reflected in the neutral state. There were also experiments which supported this fact. Yakov Mikhailovich took the observations of the resident of Dnepropetrovsk with a great interest. He stimulated their further development. He was seriously carried away by this problem and started studies of processes of interaction of accelerated atomic beams with solid surface.

To that time chief was imparting science to a group of students at Kharkov State University. The group soon became a big laboratory with a scientific staff. They were targeted by chief on studies of physics of beam-surface interactions. was extremely invited by these investigations. He was always telling us that this scientific area has a great future. And these experiments were successful and brought results. Of course equipment at that time did not allow getting wanted results. Absence of necessary efficient oil-free pumps and quite low base vacuum available with an oil pumps promoted build up of films on a metal surface and prevented carrying out of clean experiments. But the phenomena of secondary ion emission under interaction of atomic beams with solid surface existed and its properties were successfully investigated.

Development of investigations on elementary processes in the physics of atomic collisions and on interaction of accelerated atomic beams with targets stimulated establishment of scientific contacts.

Research worker of Kiev Institute of Physics of Metals V. T. Cherepin was an often guest at our laboratory at the end of 60s. A area of secondary emission was his main interest. There were long discussions with a chief. Later on closer connections appeared. Those successful diploma students of Yakov Mikhailovich who finished Kharkov University were sent to Kiev. Cherepin's Laboratory started investigations of a secondary ion emission on a wide scale. Thereafter his monograph devoted to this physical phenomenon appeared. And now unfortunately most of the modern physicists do not connect an ascertainment of this phenomenon, its study and a foresight of importance of its application with a name of Ya. M. Fogel'.

In 1961 Yakov Mikhailovich gave me blessing on an independent scientific activity. These years UPhTI established a new research area which was in every possible way stimulated by our Ministry and was supported by I. V. Kurchatov. This was an area of controlled fusion. At the Institute five laboratories were created in one department led by K. D. Sinel'nikov. I got involved to these tasks as an expert with experience in the field of atomic collisions, and this field was quite active in controlled fusion physics. I was now formally in another eparchy but there was no parting with a chief. It can not simply happen. Yakov Mikhailovich was always for us with B. G. Safronov a family friend. For me he was the main adviser in all my scientific initiatives.

The same happened to my first independent project. Based on my previous experience I started investigation of dense plasma flows by probing them with accelerated beams of neutrals and ions. It was proposed to measure such plasma parameters as a density, temperature and in some cases a composition by measuring reaction products from collision of probing beam with plasma particles at known reaction cross sections. This method of plasma investigation has found its application and development in other laboratories dealing with controlled fusion. It is called active corpuscular plasma diagnostics. This diagnostics is still widely used in modern machines for controlled fusion research. Yakov Mikhailovich approved this initiation immediately and also supported it in all possible ways. And this support was needed since K. D. Sinelnikov disliked the idea and was trying to refocus me on other tasks. Nevertheless the work was started though avoided publicity. The first results were probed in Leningrad Institute of Physics and Technique named after A. F. Ioffe. The work became understanding and appreciation from the site of N. V. Fedorenko and later on was used in setup "Alfa" by A. I. Kislyakov. Reports on national and international conferences on physics of atomic collisions at the beginning of 60s were my first information

on development of this diagnostics. Of course the results of this work became known to K. D. Sinelnikov. Not being a diehard in science he recognised the timeliness and multifunctionality of active corpuscular plasma diagnostics for controlled fusion and further supported and promoted its application. So timeliness was the first support of my chief on my independent way. Though, it was for the last time.

Breaking the chronological order I want to highlight another example of scientific foresight of Yakov Mikhailovich and of fruitful development and application of the new research method. I mentioned earlier that at the beginning of 50s in first publications on studies of cross sections of atomic collisions an effect of formation of negative ions of hydrogen and helium was reported. Negative ions were not really an attractive target for research. But Yakov Mikhailovich when he as usually was coming down from the library in the evening fascinated us with his next idea. In 1948 American physicist O. Alvarez published an assumption about the possibility to double (in principle to multiply) the energy of accelerated ions. Main idea consisted of a charge exchange of negative ions accelerated by a certain voltage to positive ions on a high voltage end of the accelerator with their further acceleration to the grounded end. Kharkov UPhTI from its beginning carried out a development and manufacturing of electrostatic generators (accelerators) of Van-de-Graaf. In 30s the inventor Van-de-Graaf himself took part in setting-up and start of air generator with energy up to 1.5–2 MeV which was first in Kharkov. Direct increase of energy for these machines represented at that time a very complicated task. Therefore use of Alvarez's principle was very attractive and timely. Nevertheless an existing at that time sources of negative ions created beams of negligible intensity which had no means for use in accelerators. At Yakov Mikhailovich insistence our group started very intense work. We began development of negative ion sources based on transformation of positive ions into negative ions by passing through the target. Gaseous and foil targets were used. Here also a supersonic steam-jet target mentioned earlier was born.

Consequently a source of negative ions of hydrogen was born. It possessed a record for that time intensity of 70-100 microamperes which attracted also overseas guests particularly from the high voltage laboratory founded by Van-de-Graaf. Immediately after the desired intensities of negative ions were obtained a new project for the first charge exchange electrostatic generator was started at Kharkov UPhTI. Later on similar development under the leadership of residents of Kharkov was started also in Moscow Institute of Atomic Energy named after

I. V. Kurchatov. Charge exchange electrostatic generator was started in Kharkov at the end of 60s and is still in working conditions.

By the 70s Ya. M. Fogel' was surrounded by a school of young researches and last year students. By the same time already about two tens of diploma projects were done and more than ten Ph.D. theses were defended under the direction of the chief. Articles in such a soviet scientific journals as JTP, JETP, Instrumentation and technique of the experiment were published continuously.

Publications in foreign journals were at that time forbidden for our scientists.

In the USSR the National conferences and schools on physics of atomic collisions and on interaction of beams with a solid surface were regularly hold. There Yakov Mikhailovich with his colleagues was an organizer and active participant. Participation in regular international conferences was basically not possible for the group. Nevertheless visits of the foreign scientists to the institute, common discussions and visits to the labs were allowed under the watchful eye of the observers. Thereby we held a meeting with a leading English scientist, a big expert in the area of atomic collisions, and an author of the monograph translated on Russian J. B. Hasted; with a leading American physicist and also an author of the large manuscript D. Fight; Yugoslavians B. Perovich, B. Chopich and others.

Yakov Mikhailovich played central role in these meetings. He was very active in discussions and of course was out of allowed schedule what caused a considerable anger from the observing official and additional complaints during subsequent meeting analysis. But this was later and the discussions were so interesting and useful that thereafter we had a sensation of participating in the world science in our field of knowledge. This gave an opportunity of further correction of our plans and extension of research program.

I delay in all possible ways the moment of transfer in my memories to the events which were not possible to understand and moreover to explain. Yakov Mikhailovich was deprived his allowance to work at UPhTI. As a reason a laughable fact of sending of a copy of own article printed in soviet scientific journals without a sanction of corresponding control services was taken. At that, the material sent to the article always had permission for the open publication. Therefore it could not contain a priori any official secret. Wonderingly and even with indignation I have to say that the pupils of the chief who reached certain high position made themselves out of business and did not break this absurd situation. And Yakov Mikhailovich remained an employee of the State Univer-

sity. A lab which he organized there by that time he transferred to his pupil A. Koval'. Later on he became just a pensioner.

I want to dissolve a feeling of resentment remained from these events in the memories about another I would say nearly genius scientific foresight of the chief and about another support which I got from him many times. At the beginning of 60s many laboratory studies of objects with dense and hot plasma appeared. They preceded experiments on large devices for controlled fusion. Huge number of theoretical and calculation works was devoted to the issues of plasma handling and heating in these devices. A great number of instabilities and parasitic effects preventing reaching the thermonuclear parameters were predicted. It seemed perspective to me at that time to start the experiments on interactions of dense plasma with a solid surface. Part of a scientific community though had an opinion that it is not worth dealing with it. Theoreticians on the one side asserted that all the processes which happen on a surface of discharge chamber can be decomposed on the processes of interaction of single plasma components: electrons, ions and electromagnetic radiation. Experimentalists at all were simplifying the situation by claiming that one has to learn how to hold the plasma by magnetic fields and prevent it from reaching the chamber walls.

In spite of all this statements I started the investigations of interaction of dense plasma flows with metal surface and immediately observed something new and interesting. Yakov Mikhailovich of course was informed first about the results and listen with interest. But the beginning of all the new investigations at the Institute had to be always negotiated with an existing scientific plans and had to be approved by a scientific council. And here there happened a problem with my propositions submitted for a discussion at scientific council. I foresaw this and asked therefore a chief to come to the council. A heated discussion had started which result was not to start this work. Yakov Mikhailovich was very much disappointed by such a decision. He sharply expressed his opinion about a short sight of council members. He said that in the very near future a great number of serious institutes and research laboratories will start these investigation and they will be very urgent and much requested. How right he was!! More than thirty years passed by since that time but the flow of scientific publications devoted to this problem and reached a number hundreds is not weakening up to now.

The last year of Yakov Mikhailovich's life was darken by heavy incurable disease which developed of course against the background of a forced tear-off from his brainchild, a laboratory at UPHTI, and connected limitations in scien-

tific contacts with colleagues and pupils. Yakov Mikhailovich Fogel' died on in 1977 September, 27.

Be a memory about you my teacher blessed!

L. I. Krupnik,

Candidate of Physico-Mathematical Sciences.

TEACHER, TUTOR, GOD – YA. M. FOGEL'

I came to Ya. M. Fogel' in 1958 being a 2nd year student of nuclear department of KhSU (Kharkov State University). This happened absolutely accidentally. My friend and landsman V. A. Stratienko told me that there is a docent at KhSU who takes enthusiastic students to his projects and set them up. It was just that I excellently knew the mathematics and theoretical disciplines but had no idea about practical physics.

Therefore for a time of summer holidays I suggested myself to the laboratory of molecular physics of KhSU and started, on teachers' instruction, manufacturing of different radio electronic devices: amplifiers, discriminators etc. To be honest I had zero level in this field at that time. Owing to the teachers I grasped the basics of the tube electronics and later of the semiconductors. So I appeared before Yakov Mikhailovich as I was. I asked him to take me to any work connected with physics.

Ya. M. Fogel' had several rooms at on the second floor of the physics building of KhSU where several installations were developed and mounted.

In one room a device for investigation of fluorescence of different gases under electron beam bombardment (to clarify the nature of polar glow) was set up. Galina Polyakova was the main character there. Afterward Viktor Ribalko got involved.

In another room mounting of the installation was to the end. There a supersonic flow of mercury was interacting with a beam of particles. I remember that first A. Koval' and later on Anatoliy Abramenko were working there.

In the third room an installation for investigation of secondary ion emission and of Berhoer effect was already working. Larisa Reкова and Vladimir Kolot were working on this setup.

Right there Yakov Mikhailovich planed to build a high voltage installation for production of different sorts of ions and for studies of their interaction with different materials. There he defined the main task for me: to build the setup.

I got very remarkable person as a chief – Viktor Fedorovich Kozlov. He was postgraduate student by Ya. M. Fogel' and studied on his installations at UPhTI the charge exchange processes of ions.

I can say that this four years within which I worked by Yakov Mikhailovich were a time of continuous learning and getting the practice in a team-work.

After the first installation the second one was manufactured for my diploma work on measurement of very-small flows of charged particles.

Here is a short list of skills and specialities which I got at Yakov Mikhailovich's school: design of installations and elements, vacuum technique, electro technique, radio technique, electronics, particle detectors, optics, Van-de-Graaf accelerators, blowpipe technologies and many others.

Seminars which Yakov Mikhailovich hold were the bright memories for me. After finishing the KhSU I was working in department of I. A. Grishaev. Being a seminar curator I invited Yakov Mikhailovich several times to read lectures on research area of his laboratory. I remember how one day the results of his last investigations helped us to extend the life time of powerful glass triodes and how emission of halogens can significantly influence the resource of powerful vacuum devices.

Turning back to the past 50 years I can say that the school created by Yakov Mikhailovich is a vivid page in development of KhPhTI and KhSU.

P. S.: As a humour. When Yakov Mikhailovich was angry or dissatisfied he asked women to leave the room for a minute. Afterwards he expressed his dissatisfaction in a sharp form with use of "national folklore". I learned this very well and do so already 50 years.

A. N. Dovbnya,
*Corresponding Member of Academy
of Sciences of the Ukraine,
the Deputy Director of NScC KhPhTI.*

WORKING WITH YA. M. FOGEL'

My first acquaintance is connected with a lecture course on accelerators which Yakov Mikhailovich Fogel' was giving. The lectures were given dynamically, fascinating and on a high level. The lecturer was acting without embarrassment and democratically. At the same time we've got information that Yakov Mikhailovich is a big scientist and that his co-workers make fast Ph.D.'s

and that he is tending to obscene words in communication. He informed us about his laboratory at the university and invited several students to work at this laboratory in our spare time. At the university laboratory of Yakov Mikhailovich processes of atomic charge exchange (atomic collisions) were investigated. Students were involved in research process. They learned quite complex experimental technique – vacuum, high voltage equipment, ion beams; and also got first experience with design of research installations. It is hard to overestimate an importance of this learning process under the direct continuous order of Yakov Mikhailovich. In this connection one has to mention that the direct control of investigation process was performed by the outstanding scientist and personality A. Timofeev. Fairly rapidly I and my student friends V. F. Ribalko and O. I. Ehichev mastered the installation and learned how to make measurements and process the experimental results without assistance. But the main thing came later. One had to defend these results in a hard discussion with Yakov Mikhailovich. He could not bear any uncertainty. He was extremely exacting to the credibility of the results. Craftiness (and moreover falsification) was prosecuted in a hard form. He taught us to right documentation of results and their processing, and also required it. We got also our first experience in writing scientific summaries and later on scientific articles. I could estimate this constant hard training to a considerable extent only after some time.

When I got used to the idea that my diploma work will be concerned with atomic collisions and probably will be devote to double charge exchange, Yakov Mikhailovich proposed me completely different subject: “Mass-spectrometric investigations of secondary ion emission.” This was due to the Yakov Mikhailovich interest to this area which became one of the main subjects in the laboratory for a long time. We had to start from the development and manufacturing of the installation and its main part, mass-spectrometer. Of course a lot of equipment was taken form another installations. Nevertheless an electrostatic focusing device for the magnetic analyzer had to be calculated, manufactured from sketch and set in operation. Quite soon the installation was ready and first experiments were done. This was due to the good conditions at KhPhTI and especially because of outstanding input of the technician A. G. Shevchenko. Because the installation possessed the vacuum conditions which were not good enough to study the laws of secondary ion emission, the studies targeted on clarifying of the mechanism of catalytic reactions in particular on Platinum were carried out. When creating an installation for investigation

of mass spectrometric composition of secondary ion emission Yakov Mikhailovich initially assumed an applied direction of these experiments. My diploma work was done and successfully defended. And I was sent to work at KhPhTI in the lab of Yakov Mikhailovich.

Routine investigations began and the diploma students appeared. I've got wonderful relations with Yakov Mikhailovich.

In two years of work these relations started to crack due to the character incompatibility as in a family life. In some of the small incidents Yakov Mikhailovich understood that I do not really "tremble with fear" during his regular incursions. And he started the process of my reforging completely deliberately. But I can't morbidly stand doing violence over me. After the next brainwashing I said to Yakov Mikhailovich that I leave him if it goes like that. The investigations though did not suffer from this. But the process was started! It was finished after two common visits to Anton Karlovich Valter. I have to mention that by that time A. Ya. Taranov and Anton Karlovich had probably some plans concerning my person. Turning back to that process I understood that without their help I probably would not be able to leave Yakov Mikhailovich because it was definitely connected with slowing down of my investigations and of my carrier. Today I see that my position in science is due to the time being a pupil of Yakov Mikhailovich who taught me the tactics and strategy of scientific investigations and who hardened my character for overcoming the difficulties.

Nevertheless my relations with Yakov Mikhailovich were not finished with this 4-year interaction. Starting from 1961 I was doing practically independent research on the source of polarized protons (deuterons), on acceleration of polarized particles and experiments with polarized particles in the lab of A. Ya. Taranov. Several times per day I was passing the office of Yakov Mikhailovich and of course was meeting him. I kept telling "how do you do" as I met him but he never answered and turned away demonstratively. Since I recognized being guilty on significant part I was not feeling offended and continued the relations like that. In 1965 I finished my Ph.D. work. Even though it was not made very much public Yakov Mikhailovich has answered on my "how do you do" for the first time as I next time met him. He said: "Vanya, I heard you finished your Ph.D. work. Give it to me. I read it." Yakov Mikhailovich was an unbeaten expert in writing and editing of the scientific publications. Quite soon, in less than a month, he called and familiarized me with his corrections and remarks.

After this a new phase of our relations started. He was an opponent on internal and official defense of my dissertation. Later on I always had an opportunity to have his consultation and support from him. I want to point out that Yakov Mikhailovich was an excellent expert in obtaining of polarized atomic beams. This is because in the laboratory № 1 under the directions of M. I. Korsunsky he was dealing with development of the method of uranium enrichment using its separation on magnetic moments in non-uniform magnetic field.

I was totally surprised by the news that Yakov Mikhailovich was discharged from the institute. I understood that for such an extraordinary active person who devoted himself to science it will be a terrible blow with catastrophic consequences. And the administration of the institute did nothing to avoid this outrage.

So it happened. Even though Yakov Mikhailovich actively developed his investigations at Kharkov University for some time he could not stand this super-violation and soon departed this life.

After many years when analyzing the role of Ya. M. Fogel' in development of scientific investigations in KhPhTI I would like to point out the huge influence of such a solid and colorful person on all directions of investigations in the institute and his extraordinary honesty, unbeaten rigidity in truth assertion, and of course his true educational talent.

I. M Karnaukhov,
Corresponding Member of Academy
of Sciences of the Ukraine,
the Deputy Director of NScC KhPhTI.

MOST FAITHFUL SERVANT OF SCIENCE

Yakov Mikhailovich Fogel' was the most faithful servant of science. He was working for more than 30 years at Kharkov Institute of Physics and Technology. During the last 20 years of his activity he managed to create for the first time in Kharkov or even in Ukraine a new research direction – investigation of atomic processes. He created also a scientific school of young researchers who made an appreciable input into development of world science. Research direction which he created and a school of his pupils brought world acknowledgment to Ya. M. Fogel'.

All the new branches of science and technologies: plasma physics, accelerators of charged particles and gas discharges, astrophysics and physics of upper atmospheric layers, radiation chemistry, investigation of surface of metals and alloys and others which were progressing fast after the Second World War required a detailed study of atomic processes. Ya. M. Fogel' was able to estimate the situation in time and started to collect and to teach the research staff, to create experimental installations and to conduct principally new research.

For studies of different atom-atom processes positive ions were necessary. And Ya. M. Fogel' together with diploma students V. T. Tolok, B. G. Safronov and L. I. Krupnik started studying of processes of ion creation in ion sources: high frequency, arc and thermionic ones. Many years passed by and V. T. Tolok becomes a corresponding member of Academy of Sciences of Ukrainian SSR and a leader of the largest in KhIPhT scientific direction on Plasma physics. For further investigations the negative ions are required. And Ya. M. Fogel' together with L. I. Krupnik begin setting up and investigation of supersonic jets of materials used for charge exchange of positive ions into negative ones. For detailed investigation of physics of double charge exchange process of singly positive ions in different gases Ya. M. Fogel' together with R. V. Mitin and V. A. Ankudinov build complex mass-spectrometric installations. With these setups he gets principally new information on physical laws of different atomic processes. New experimental results of Ya. M. Fogel' brought his works on the level of the world achievements. These investigations were later on continued in works of D. V. Pilipenko, A. D. Timofeev, A. G. Koval' and others.

For investigation of interaction of ions with a surface of different metals Ya. M. Fogel' together with R. P. Slabospitsky build an essentially new installation and carried out an investigation on mechanism of formation of different chemical compounds on a metal surface under different temperature conditions. These investigations were later on continued targeting the optimal catalysts for chemical processes. Together with L. P. Reкова, V.Ya. Kolot etc. he studied an influence of different gases on thermionic emission of nickel, platinum and tungsten.

With a time the works on double charge exchange developed into studies of emission bands of different dilute gases. This was especially interesting for geophysics and astrophysics. Ya. M. Fogel' together with G. N. Polyakova in collaboration with Crime Astrophysical Observatory of Academy of Science of USSR and Institute of Atmosphere Physics of Academy of Science of USSR completed large cycle of investigations and established very important laws on glow of dilute gases.

The investigations conducted in KhIPhT on interaction of accelerated particles with different gases and metal surfaces were continued and developed at Kharkov State University in the Laboratory of Ion Processes. In the same place investigations of new processes not studied at KhIPhT were started. Ya. M. Fogel' created also at KhSU his school of physicists who continued his investigations also after he died.

R. P. Slabospitsky,
Doktor of Physico-Mathematical Sciences,
the Deputy Director of NScC KhPhTI.

SEVERAL WORDS ABOUT YA. M. FOGEL'

In far 1957 when I began with investigations of collisions of ions with a solid surface, atoms and gas molecules this direction of research in physical electronics was headed by L. N. Dobretsov, V. M. Dukel'sky, N. V. Fedorenko, A. R. Shul'man, V. N. Lepeshinskaya, N. I. Ionov, E. Ya. Zandberg in Leningrad, S. A. Vekshinsky, G. V. Spivak in Moscow, N. D. Morgulis in Kiev, G. N. Shuppe in Tashkent. Ya. M. Fogel' in Kharkov belonged to that galaxy of physicists who combined investigation of physical phenomena with their application in electronics. The characteristic property of Yakov Mikhailovich's works was that he studied as emission phenomena on the surface as elementary processes of atomic collisions. At that time the first branch was called "cathode electronics" and the second one – "physics of gas discharge". Ya. M. Fogel' was one of those who recognized the generality of these processes and who make a great contribution to their combination in one science which included both physics of atomic collisions and plasma physics.

My personal contacts with Yakov Mikhailovich began when he draw my attention to one strange phenomenon which he discovered with one his follower. That was a non-linear dependence of logarithm of double charge exchange cross-section on inverse velocity of ion-atom collisions which deviated from well known law of H. S. W. Massey, outstanding English scientist and member of Royal Society. It was necessary to introduce a notion of real time of atomic collision to solve this task. This time did not coincide with a time of reciprocal flight of colliding particles. This explained not only an effect discovered by Yakov Mikhailovich but also appeared to be very fruitful in solving other problems

of atomic collisions. After many years this effect and its explanation discovered in Kharkov were observed at the anniversary celebration of this English scientist.

I was being impressed by the exceptional enthusiasm of Yakov Mikhailovich to science. Another distinct property was his ability to work with young people – he was always surrounded by followers. They still remember him. With a great pleasure I see all that what is done in Kharkov to keep the memories about this outstanding scientist and the person.

E. S. Parilis,

*Doktor Physico-Mathematical Sciences,
Prof., /Pasadena, California/.*

TEACHER

A portrait of Yakov Mikhailovich made on my demand by A. A. Kharlov, Chief photographer of KhIPhT who had been working there for a very long time, is on the wall above my table now, as many years before. That is quite a big portrait, about 60x35 cm, enlarged from the photo from the Ya. M. Fogel' personal file, a high quality one, no grains, perfect contrasty.

I've been carrying it with me for last 20 years or so. First it was hanging in my office at the KhIPhT, then, after I left the Institute – in my working room at the Technological Park "Institute for single crystals", and now it's here with me, in my office on the 7th floor of the historical Gosprom, where I'm working now at the Regional Center of Innovational Development. There's a sign beneath the portrait "Fogel' Yakov Mikhailovich". Almost all of new visitors coming to my office ask me who it is. Normally my answer is "It's my teacher". And usually I add a few words about him.

Yakov Mikhailovich is one of those people who have influenced my personal development and all my life in a most significant way. Of course, the person number one is my mother, we spent together 45 years, never parted (we always lived together). Then I had a rowing coach, Victor Nikolajevich Gavrilov, a very superior man who influenced a lot my physical and psychological development in my youth. And finally Yakov Mikhailovich – work and communication with him have in a great way formed my adult personality, my attitude to work and people.

Before telling this story, let me say a few words about what kind of person Yakov Mikhailovich was, as I understand it now. My mother told me some facts

about him before I met him personally. It appeared that a cousin of Yakov Mikhailovich (her name was Clara Matveevna) used to be an old friend of my mother's, and when I announced to my family that I would have my post-graduate practical training at Fogel laboratory (it was in 1963), my mother had a talk to Clara Matveevna and told me that my future academic adviser was a person well-known not only as a scientist, but also as a strict supervisor and workaholic who required the staff to have high discipline and commitment. And that working at his lab was a guarantee of gaining excellent skills in research activity and great chances for a scientific career. At that moment I understood that this was the end of a free, relaxed life of the last years of studies at the University and now it was the time to get to real work. That was the start up of 15 years that I spent living and working side by side with Ya. M. Fogel.

I believe that Yakov Mikhailovich used to be a very passionate person. He was very competitive both in science and in everyday life, he loved to be a winner and he knew how to win. And in this respect he was a real scientist since true science is extremely competitive, this is the arena for the competition of reputations. Yakov Mikhailovich valued a lot his scientific and personal reputation.

I believe that passion for life in general was that main factor that incited Fogel to work up to the collar, to enjoy outdoor activities, to master classic art, music and literature, to communicate with young people with genuine interest. When you look at him, at this man small in stature, small framed, almost graceful, you are amazed by his energy, as well as by incredible knowledge that he mastered. Was there really enough room for it all in one person?

Now I want to tell about his two main impacts.

The first one is books.

Up to now I've had a 50-year history of a focused book collecting and about 6 000 books in my library, its main part consists of illustrated editions and editions on graphics, first of all, book graphics. This kind of orientation on books has always been a feature of our family, there have always been book lovers among us, right after the War my mother started regularly buying fiction books cultivating love to systematical reading in me. So by the graduation from school I became quite an expert in that, and as I believed by that time, I knew what a book was. But soon it appeared that I didn't know much. The first person to demonstrate it to me was my university friend, Ilya Briskin, who showed me several bibliophilic (collection) editions of Russian poetry of the 20–30s at his place. I saw small elegant books of Gumilyov, Belyj, Mandelstam, the poets

almost unfamiliar to me then. And there were only 1000–5000 copies of each, which were absolutely insignificant as for Soviet standards of the postwar period when 10 000 or even 20 000 copies were considered to be a small number. This was the moment for me to understand that a book can be valued not only (and quite often not as much) by its contents, but it may also be considered as an item of material culture, incarnation of style. That was the moment I fell in love with elegantly made books and this “addiction” was dramatically aggravated after seeing the library of Yakov Mikhailovich and talking to him about books.

Yakov Mikhailovich was not exactly a bibliophile-collector, he was not a person actively looking for book rarities and blowing the dust off them. First of all, he was a reader, a very attentive and a very intense one. But he had lots of books! And not only the Russian ones. He read a lot in German, English and French. So he used to have lots of editions printed in Germany, France, England, some of them – even at the beginning and in the middle of the XIX century. I must say that at that time Europe made high quality books, printed on good paper, with original gravures as illustrations and quite often in embroidered bindings made of leather and with impression in gold. That was just the moment when I saw all that splendor for the first time, when I had a chance to hold such books in my hands. The addiction became my diagnosis. I started looking for and buying the books I saw in Yakov Mikhailovich’s library, little by little I learned more about graphic techniques, about the peculiarities of paper and bindings. That’s when I joined this world of bibliophiles that I entered for the first time also with the help of Ya. M. Fogel’. The matter is that every true bibliophile-collector always has assistants – book suppliers. These people earned some money on their services helping to find and deliver books. Yakov Mikhailovich also had such an assistant. A young man at that time, Volodya Starchenko, came to Yakov Mikhailovich’s place bringing rare books, books on film art (Yakov Mikhailovich knew it very well and loved it), as well as tickets for the film shows which at that time took place at the “clubs of culture” (“Club of builders”, for instance). Volodya was the son of a book dealer who was well-known from the pre-war period and who worked on this half-official market till the end of the 50s. Volodya inherited his “profession” and is still working in the same field, of course, not as young as I had got to know him. Now this same Volodya assists me in finding and buying specific books. At that time Yakov Mikhailovich gave me a chance to meet Volodya, who then introduced me to many other collectors. I am very grateful to him, as well as to many other people who once became addicted to books. Once again I would like to emphasize my

impression from the library of Yakov Mikhailovich: there were lots of books, in different languages, and he knew all of these books very well. It was not just the fact that Yakov Mikhailovich read a lot in several languages that amazed me (my uncle, Vladimir Nikiforovich Krivenko used to be a true polyglot and one of the best Kharkov translators of that times), but how profoundly he went into the books he read, how close he became with his favorite authors and characters. For example, he could be talking for hours about the “The Enchanted Soul” and “Jean Christophe” of R. Rolland, about the great “Faust” and the novels of Dickens. Within the last half of the century I had a chance to meet almost all major book collectors of the city, and I should say that Yakov Mikhailovich is definitely one of the best among them by mastering the contents of the classical literature.

Today there are several beautifully published French books from Ya. M. Fogel’s library that were recently presented to me by his daughter Nina Fogel.

And his second impact is adherence to principles and independence.

Dignity and ability to defend it, ability to stay independent was one of the key features of Yakov Mikhailovich’s personality. He had that ability to stay independent from the authorities, the administration, the external influences. To this extent he was far from an ordinary person, this feature of his was recognized very quickly and was known to everyone surrounding him. Every attentive person who met Fogel’ understood almost at once that the only guideline Yakov Mikhailovich had in his life and in science, in his attitude to people and everything that was going on was his personal opinion and not any external one. His attitudes were formed only according to his own vision and principles. And the latter were very tough. I think he never imposed his principles on anyone, but also never hesitated to express them. I’d say, he never ate out of anyone’s hands.

One principle he strictly defended was his right to establish in his scientific environment, in his laboratory the forms of work and the communication standards which he believed to be the most efficient. He always strongly objected if for some reasons any alien or unhealthy elements were introduced into the research process. And it was not easy to do. We should remember that we are talking here about the end of the 60s and the 70s when the life of the country and of science as well was becoming more and more regulated, when the Party, the Komsomol, the labor union bodies were actively interfering into it, when the councils of labor collectives were formed, different forms of competition were introduced all over, etc. The security requirements and control from the health and safety and fire safety services were dramatically intensified. Surely Yakov

Mikhailovich understood where this new regime came from and who was standing behind it. That was the state mobilizing policy. But as a Head of department he not only refused to assist it (what he was required to do), but also did his best not to let the most odious of the imposed forms of activity into his laboratory. For example, for quite a long time in our laboratory we had no socialistic competition, undertook no socialistic obligations and held no long meetings on its results. And the same happened with the other similar initiatives undertaken at that time. I know that then there was an opinion at the Institute that we (the staff of his laboratory) were living behind Yakov Mikhailovich's back as safely as behind a stone wall. Once Yakov Mikhailovich just saved me from a furious attack of one active at that time head of safety department at the Institute, when he found in my room certain violations during the work of an experimental plant and threatened to cut off the power at that very moment. As for me, I also got nervous and we have almost had a hand-to-hand fight. The noise made Yakov Mikhailovich come out of the next room. He gave his harsh comments for both parties of the conflict, settled the matter, and then "passed his word for me" assuring that he personally would control studying of the safety basics by his employee. Yakov Mikhailovich had high reputation and his character was well-known to everyone. The conflict was over.

There was another case clearly demonstrating the personality of Ya. M. Fogel' and his citizenship. In 1969 in Kharkov several people were arrested and convicted of anti-Soviet activities (actually – for human rights activities), among them was Henry Altunyan, later a well-known people's deputy of Ukraine, and Volodya Ponomaryov. The wife of the latter, Irina Rapp, then had been working at the chair of optics at A. M. Gorky Kharkov State University, and right after her husband had been arrested, she was suspended from work at the University upon the pretext of possible "malign influence" on students and postgraduates. Obviously, it was extremely difficult for the wife of an "anti-Soviet" to find job in specialization. So Yakov Mikhailovich who knew well all the details of the story invited her to work at the fundamental research laboratory that he headed at Kharkov State University, where she had been successfully working for years.

Everybody knew very well adherence to principles and uncompromising attitude of Yakov Mikhailovich and nobody wanted any conflict with him. These features of his character brought him respect of many people. But there were some other ones who could not stand him too long. This time came when in 1972 a claim against Yakov Mikhailovich was raised by the custodial service

of the KhIPhT. As far as we could judge (there were many rumors spread around this matter), the pretext was not that serious – the violation of the recently adopted order for posting of the foreign scientific correspondence. The fault was found with the fact the Yakov Mikhailovich kept on following the previously existing practice of postal communication with the foreign scientists from his home postal address instead of sending it through the Institute's special department; the access to secret work was blocked for him, which automatically lead to dismissal from the Institute. But he was not just an ordinary research scientist, but a scientist of European recognition, and for the Director of the Institute it was not that easy to make a decision and dismiss him. Moreover, for years they had been living in the same house, their wives used to be good friends, and once the Director was an engineer in the group of Ya. M. Fogel'. That was a paradoxical situation. Doctor of Science, the Head of laboratory had no right to enter the territory of the Institute, but for a long time was still on its staff, he worked at home and received salary. We did all our best to reinstate Yakov Mikhailovich at the Institute! We've been to all local Party and Soviet bodies, delegated representatives to the administration, wrote open letters. Nothing changed. Finally the member of the Academy of Sciences B. I. Verkin, who took active part in the attempts to settle the existing conflict advised us to write a letter with a request for assistance to three authorities: the CPSU Central Committee to its Secretary M. A. Suslov, the CPU Central Committee to its first Secretar V. V. Scherbitsky and to the President of the Academy of Sciences of Ukraine B. E. Paton. Such letter was written and with the signatures of two employees of the laboratory was sent to the authorities. Some time later its authors were taken to the Regional Party Committee, were vaguely hinted on some activity of the foreign intelligence services and were generally intimidated. Also we asked assistance from the people who had influence in the scientific community in Kiev, Moscow and Leningrad, sent there solicitors. There we got no help as well, we were made understand that this matter was "dead", that again a campaign against "the world Zionism" was initiated in the country, that Yakov Mikhailovich had bad luck and suffered from its consequences. For a long time after that it was hard to get rid of this disgusting feeling.

Ya. M. Fogel's school was very useful for me, I learned a lot. And the main lesson was that I could understand the true value of the independent position and the ability to defend it.

V. A. Gusev,

*Director of the North-East Regional Center
for Innovational Development, Kharkov.*

**OF THE BLESSED MEMORY
OF THE UNFORGETTABLE TEACHER Ya. M. FOGEL'**

In May 1960 Yakov Mikhailovich made a report at the department of the Kharkov Polytechnic Institute (KhPI) on the upcoming laboratory method of the secondary ion-ionic emission and came out with the assumption of its application for the study of chemical reaction mechanism at the surface of metallic catalyst.

The Head of the Department, prof Atroschenko Vasiliï Ivanovich, who always sought after the new ideas, intended to support this research. Just at that time I entered the post-graduate course and he offered me this work.

Thus, I was lucky to work under the guidance of Yakov Mikhailovich.

At first the research was carried out at the PhTI of the Academy of Science of the Ukrainian SSR (UPhTI was called so at that time). I studied the experimental setup, mastered the experimental technique.

I remember the following episode.

Once we discussed the results of the experiment and in response to my assumption Yakov Mikhailovich said:

“Well, Irina, you are debating like a chemist!”

“Yakov Mikhaloivich, and what am I?”

“Well, you are a physicist!”

I was so pleased: I was accepted.

The discussion of the results was always interesting and instructive, although I always fluttered. We learnt to obtain further insight into phenomena, analyze, compare the facts and make conclusions.

Once Yakov Mikhailovich charged me to write an article into the journal on the results of the experiments. Tormented myself over it for quite a long time, I brought him the article.

Yakov Mikhailovich said: “Well, I’ll read.”

A few days later he brought me the materials:

“Irina, I’ve read your article and worked at it a little bit.”

It turned out he had written the article according to these data anew. And I, having compared both variants, realized how to write articles. Yakov Mikhailovich taught me in this way.

After the experiments at the UPhTI the question arose to set up similar apparatus at the KhPI. This facility was produced on the basis of the serial isotope mass spectrometer MI-1305. Under the guidance of Yakov Mikhailovich it was designed by Rybalko Viktor Fedoseyevich and me. The main components of the apparatus were produced at the UPhTI. I express my thanks to the production

engineer Roman Bereza, the outstanding mechanical engineer Alexandr Grigorievich Shevchenko and many others. Glass-blowing works were made by the skilful fingers of the unforgettable Yegor Vasilievich Petushkov.

The apparatus has worked for many years. It helped to study the processes running at the surface of catalysts in a number of reactions. When Sakharov Alexei Alexeyevich, Ya. M. Fogel's follower, came to work to our group, it was crucially important, because we carried out investigations together.

On demands the copies of the workpiece blueprint were transmitted to Karpov Physicochemical Institute (Moscow) and the Catalysis Institute of the Academy of Science of the USSR (Novosibirsk).

When a component of the apparatus was out of fix and required to be delivered to the PhTI, Yakov Mikhailovich always helped us. He took a repaired part into his bulky briefcase and handed over to us outside the entrance checkpoint. He ran risks, but he was a courageous man and faithful to science.

It wouldn't be possible to produce this facility and guarantee its work without Yakov Mikhailovich and his colleagues' help.

I thank my lucky stars very much that I had an opportunity to work with Yakov Mikhailovich and learn from him. Let he be remembered forever in my heart as a faithful scientist and a great teacher. His procedure of workshops and students' training for diploma defense have been introduced at our department at the KhPI.

I. E. Korobchanskaya,

Candidate of Chemical Sciences,

Senior Researcher.

RECOLLECTION OF YA. M. FOGEL'

My scientific work went off under the influence and permanent attention of two well-known persons – Professor Yakov Mikhailovich Fogel' and the director of Kharkov Institute for Low Temperature Physics and Engineering (KhILTPhE) Academician Boris Ieremeevich Verkin. The first was my tutor in life; the second one was my “talisman” and employer of interesting scientific and technical projects in the time of my professional maturity. Fate brought us together in the beginning of ILTPhE formation, in the years when, after Gagarin's flight in cosmos, a new scientific branch – cosmic science of materials – began to develop. Just in this time “keeping abreast of the times” in ILTPhE there very actively worked out the creation of a simulator of cosmos factors (the deep vacuum, the ultra-violet (VUV) radiation of the Sun, the fluxes of charged parti-

cles of various kinds) which was intended for studying the action of these factors on the materials of space vehicles. At this stage B. I. Verkin got involved in the work Ya. M. Fogel' and his disciples for developing the 30-200-keV proton-electron injector and the simulator of the vacuum ultra-violet (VUV) radiation of the Sun. This radiation didn't reach surface because of absorption in atmosphere but actively influenced on the objects in space. Ya. M. Fogel' suggested a version of VUV simulator based on a new physical concept, namely, the excitation of a supersonic gas jet in vacuum with the help of a dense electron beam. As the executor of the VUV simulator creation he proposed my candidacy to B. I. Verkin. From the very beginning of the work I understood that the VUV simulator proposed by Ya. M. Fogel', was a multisided cross-disciplinary problem that involved gas dynamics, jet condensed state physics, physics of atomic and electron collisions, VUV spectroscopy, physics of clusters etc. So the solving of this problem seemed to me, the fledgling without proper mental outlook and work experience, unrealizable. But I was working under the leadership of Ya. M. Fogel', outstanding personality, erudite, broad-minded scientists, well knowing experimental technique and having work experience in various fields of physics. As it turned out he was very exacting (and tough sometimes) in work, simple in contact and modest in everyday life. At the same time Yakov Mikhailovich never was indifferent to life problems and needs of his collaborators and always supporting them.

Ya. M. Fogel' taught me many things, talking to the point, taught me designing from scratch new original experimental devices, thoroughly working out all its structural parts; carried to perfection experimental technique; got reliable data by repeated measurements; tactically and strategic conceived. It was absolutely impossible to publish not enough verified data (especially sensational ones) obtained in not quite clean experimental conditions. These precepts I followed all my creative work. But Yakov Mikhailovich taught me not only this. Proposed by him new method of electromagnetic emission generation, i. g. a supersonic gas jet in vacuum excited by an electron beam appeared the endless source of knowledge. Method uniqueness appeared in the possibilities to obtain the spectra of various substances in the jet that can be in different aggregate states belonging to the atom-cluster-microcrystal sequence and to remodel the spectrum by changing medium size of clusters in jet. Owing to the wide method possibilities we could simulate spectral distribution of energy of the VUV Sun's radiation in the laboratory.

Later on, the gas-jet method was defended by three inventor's certificates and the first prototype model of the VUV simulator, which was demonstrated in

“Cosmos” exhibition hall of EANE (“VDNH”) in Moscow, was awarded one gold, two silver and one bronze medals.

All the work from testing the new idea through fundamental studies of its potentiality to the device for cosmic science of materials was done in ILTPhE Department SCTB at the B. I. Verkin’s permanent attention and support. Just in SCTB B. I. Verkin had realized his scientific-technical ideas turning it into the powerful applied subdivision of ILTPhE. After one of the regular debate consultation Boris Ieremeevich charged me (at the head of a sector, reformed later into a department) with the work on the creation of the simulator of the infra-red (IR) radiation of the Earth upper atmosphere for the development of cooling optoelectronic devices working in IR part of spectra.

Gas jet method advanced by Ya. M. Fogel’s disciples for assigned task demonstrated here also its unique feature: the capacity to simulate IR radiation in natural processes of the Earth upper atmosphere. At the same time the spectral region of the gas jet simulator of the Sun’s short-wave radiation was extended in the ultrasoft x-ray (USX) spectral region.

Then, owing to the wide potentiality of gas jet technique, Ya. M. Fogel’s disciples managed to solve a number of fundamental physical problems. In particular, it was established the structural, electron, and emission properties of inert gas clusters in a wide dimension of average sizes and to trace the evolutions of the energy spectrum and the relaxation processes on the quasicontinuous transition of atoms to a solid. An outstanding result was got in the physics of atomic and electron collisions. At the electron scattering by inert-gas atoms a new type of bremsstrahlung emission was discovered. It was so cold polarization bremsstrahlung (PB) which emerged due to the dynamic polarization of an atom in the field of an incident electron. For PB discovery and researches, the Presidium of the NASU awarded E. T. Verkhovtseva and E. V. Gnatchenko the I. Pulyui Prize in 2003.

Today, various structural versions of the UVU and USX Sun’s radiation simulators are used in Russia, Germany and China. In addition, the scientists of the Department “Condensed Molecular Systems Spectroscopy” of KhILTPhE of the NASU use them to study the structure and emission properties of mixed van der Waals clusters.

Thus gas jet technique of electromagnetic radiation generation, proposed by Ya. M. Fogel’ and at most used by B. I. Verkin for dimensioned scientific and technical projects, was and is the base of new researches directions in the various branches of physics.

Now Yakov Mikhailovich is not with us more. There is not Boris Ieremeevich too. They went away left their mark and memory behind on the Earth.

E. T. Verkhovtseva,

Candidate of Science in Physics and Mathematics,

Senior Scientific Researcher.

YA. M. FOGEL' in KHARKOV STATE UNIVERSITY

In 1960s, on Yakov Mikhailovich Fogel's initiative and under his direct leadership (in spite that this time he was the Head of laboratory of atomic collisions at the KhIPhT) at the Kharkov State University started researches in two directions: the interaction of fast electrons with molecules and damages in thin films induced by ion irradiation. After a short period, the researches were extended by including the study of the interaction between medium-energy ions and solids: these were secondary ion emission (SIE) and ion-photon emission (IPhE). In 1968, the pioneer research group at the University served as a basis to create a task-oriented research laboratory for studying ion processes, and Ya. M. Fogel' became its first head.

My meeting with Ya. M. Fogel' was in December, 1963, when Yakov Mikhailovich offered me a postgraduate course after my graduating from the University. That time I new only a few the KhIPhT scientists so I accepted this proposal rather calmly. Seeing such my behavior my degree work supervisor R. P. Slabospysky told me that I was very lucky because I had the unique chance to work with such person. I didn't know then that Ya. M. Fogel' would have so great influence on all my life in spite of the rather short time of our joint work.

Yakov Mikhailovich was the Great Scientist and the Great Teacher. I never met more in my life any person why combined these two qualities, was so infinitely devoted to science and saw the purport of life not only be the researcher himself but also cultivated the same devotion in young scientists.

The best qualities of Yakov Mikhailovich manifested themselves most brightly at scientific seminars. The seminars headed by Ya. M. Fogel' were a school of scientific skill which worked like a clock-work. His "a few words" at the end of seminars were their invariable feature: after any report or discussion, Ya. M. Fogel' precisely and shortly generalized all major things from that report. He also – and this is a cornerstone issue – determined the place of this work in a series of similar researches, told about the authors of those researches

and about their other works. It is clear that only a scientist, who possesses the encyclopedic knowledge in a good many fields of science, can do it. Everybody liked these seminars very much. To my great regret, seminars of such level I never met more.

So, I was proposed to begin researches of processes of fast electrons interaction with atmospheric gas molecules which I began with the young enthusiasm.

One of Yakov Mikhailovich's features was full rejection of the work "for a work". Therefore the studies were persistently broadened and extended. So, began from the simple studies of molecular spectra in the visible range at the excitation by fast electrons I went over to the studies in infrared spectra (up to 11500 Å) using one- and three-stage electron-optical transducer; these measurements were rather exotic in that time. After the measurements in the wide range of electron energies from 20 up to 100 eV I went to the measurements of cross-sections and excitation function of the same molecules (N₂, O₂, CO, CO₂, NO, N₂O), solving out at the same time several complicated technical problems such as: super-pure gas production (even 0,01 % of extraneous gas – N₂ or O₂ – admixtures were seen in the emission spectra); the measurements of absolute gas pressures; the development of the sensory system of emission intensity measurements.

Thus, I had to develop and made McLeod gauge that had parameters exceeded (according to reference data) all such devices in the Soviet Union; by the way, it measured even the pressure of such condense gases as C₄H₁₀ or C₂H₅Cl.

The main results of these studies were the conclusions: the energy dependence of cross-sections of excitation in the wide range of the energy fitted the 1st Born's approximation $\sigma \sim \ln E/E$ for allowed optical transitions, $\sigma \sim 1/E$ for forbidden transitions and $\sigma \sim 1/E^n$, where $n \sim 3$, for processes involving electron exchange; in emission spectra of molecules, especially multiatomic ones, the emissions of dissociation fragments played a significant role and the studies of these emissions could gave the very important information about the redistribution of the energy, which was transferred by an electron to a molecule, within the molecule itself.

So, according to Ya. M. Fogel's proposition, the studies of processes of electron-molecule interactions were extended further to include the studies of dissociation fragment distributions over the degrees of freedom (executed by Fizgeer B. M.), as well as the processes of dissociative excitation of multiatomic molecules (executed by Danilevsky N. P.). The most important conclusion of these studies was the fact that, if there were 3 dissociation fragments, the energy, which was transferred by an electron to a molecule, distributed among

rotational and vibrational energy levels in accordance with statistics; i. e. 3 fragments that was enough for statistics. Also the conclusion was drawn that cross-sections of fragments forming depended on a minimal energy of processes of the fragments forming

Ya. M. Fogel' had amazing scientific intuition. In this connection I remember the very beginning of ion-photon emission studies, the involuntary eyewitness of which I was. So, it was 1965, University, the Laboratory in which I studied the interaction of fast electrons with rarefied gases. Yakov Mikhailovich suggested to V. V. Gritsyna, his new postgraduate, the theme of her Ph.D. thesis: the investigation of a glow that appeared at an irradiation of surfaces of solids, metals in particular, by an ion beam. Arguments "pro": it nobody had studied and even seen before; it was very interesting; it permitted to move far forward in understanding of processes of medium energy ions interaction with solids and so on. On V. V. Gritsyna's remark that, as nobody had seen this glow, probably, it was not exist or it was so weak, that it would be impossible to register it, Yakov Mikhailovich answered that, after his estimations, the glow intensity would be enough for registration by our devices. At that I cut in and confirmed that really the intensity was quite enough for registration. Yakov Mikhailovich asked me: how did I know? I answered that I saw this glow near every day and even used it in practice for the ion beam control relative to the tantalum aperture. Yakov Mikhailovich asked me: "why didn't you tell anything about the glow?" I said: I didn't know that nobody had seen it. It should be noted that we did then our first contract work on sputtering of metal films by the ion beam 200 μm in diameter and used the tantalum aperture for the beam collimation. So next day I had to show all this on the working installation. And the first V. V. Gritsyna's studies of IPE were done just on tantalum. This event made a very great impression on me. Yakov Mikhailovich didn't see IPHe emission; according reference data nobody had seen it; but Yakov Mikhailovich was absolutely convinced that it not only existed but had intensity enough for registration. And Yakov Mikhailovich was, as usual, right. It was a good lesson to me; at least I always tried in my work to assess the capabilities of devices and expected results.

On the data of studies of electron interactions with molecules 3 Ph.D theses were defended: V. T. Koppe (1973), B. M. Fizgeer (1976), N. P. Danilevsky (1979).

V. T. Koppe,

*Candidate of Science in Physics and Mathematics,
Senior Scientific Researcher*

RADIATION PHYSICS OF THIN METAL FILMS

Since 1960, in the Research Laboratory of Ion Processes (RLIP) of the Kharkov University a new direction of the investigations in radiation physics of solids – studies of radiation damages in thin metal films – put forward and headed by Ya. M. Fogel', has been carried out. The start of studies in this field was the great scientific intuition of the eminent scientist. At the beginning that were the applied researches at the Crimean observatory of AS UkrSSR workers' request. They wanted to clear up the influence of the irradiation by protons with the energy of "solar wind protons" on the optical constants of aluminum and silver films; that would permit to obtain the data about the change of coefficients of reflection of mirror coatings under the "solar wind" influence. The studies got on well, the cause of deterioration of thin metal film coatings reflectivity was found and eliminated.

Having the great scientific intuition Ya. M. Fogel' understood extremely well the urgency of researches dealing with radiation-induced defects emerged in thin metal films because these films were widely used not only in a number of space devices but in the other branches of science and technology. They were absolutely new objects for researches as in the result of size effects there could be peculiarities in forming and behavior of radiation-induced defects nobody had studied before. By that time a few papers of other authors included some fragmentary information about changing of physical properties of irradiated thin metal films had been published.

Correct approach to the problem solution and purposeful dynamism of researcher as Ya. M. Fogel' was, were astounded. At the beginning studies of the main regularities of accumulation and annealing of radiation defects including kinetics of annealing and activation energy of their migration were done on the simplest model. It was the thin silver film irradiated by protons in the wide temperature range – from the liquid nitrogen temperature up to the room one. The results of studies of radiation defects forming in thin films and in bulk silver samples were compared. In the sequel these studies were developed and extended.

Ya. M. Fogel' was the first who proposed the complex of methods for studying radiation defects in thin metal films that his disciples used than. It included the measurements of specific resistance; lattice spacing measurements by precision X-Ray diffractometry; thermal desorption of the implanted particles

during the irradiation and subsequent heating; electron microscopy studies of gas porosity and other structural defects. The combination of several physical methods for the studies of the same object was not practically used at that time; it was new and the most perspective to get data about the regularities of the ion-implanted particles arrangement in the lattice. It permitted to clear up the mechanisms of these particles diffusion to the surface and their desorption in vacuum and described the initial stages of gas porosity forming. X-Ray diffractometry studies of thin metal films without forming their pile also anybody done until then.

Realizing Ya. M. Fogel's ideas his disciples studied thin films modeling radiation damages in near-surface layers of complex metal alloys and compositions. Radiation defects' forming was studied in the model metal (Cu, Ag, Au) films as well as in the components of complex metal alloys and compositions (V, Ni, Nb, Cr, Fe). Nowadays composite structures with evaporated tungsten film coatings, used in devices of modern thermonuclear fusion installation, are studied.

Working for years under Ya. M. Fogel's leadership we, his female pupils, owe him a lot in our making. Such qualities of nature as purposefulness, industry and thirst for novelty passed from Yakov Mikhailovich and have continued in his disciples. We came once to Ya. M. Fogel' to execute yearly projects and graduation thesis and, met such scientist and person, could not part with him. The memory of joint work with Yakov Mikhailovich is retained in our heart forever. All his female pupils defended Ph.D theses: V. V. Chechetenko (1971), L. P. Tishchenko (1980), T. I. Peregon (1993); 3 inventor's certificates were got; more than 150 papers were published.

L. P. Tishchenko,

Candidate of Science in Physics and Mathematics,

Senior Scientific Researcher.

PHYSICIST, TUTOR, PERSON

In the early 1960's, Ya. M. Fogel' put forward a new direction in the investigations of the interaction between medium-energy ions and solids. It is based on the analysis of the radiation emission by excited particles that leave the solid surface due to its irradiation with medium-energy ions (1–100 keV). Later

on, this method was named “Ion Photon Emission” (IPE). It was an absolutely pioneering idea. Nevertheless, the researches of the IPE phenomenon have been extended considerably over the world already since the end of the 1960s (Ukrainian, Russia, Uzbekistan, Holland, USA, Canada, France, Australia). Till nowadays a considerable database has been collected but the unified IPE model still cannot be created on these data. This is because the problem is very complicated; within the frameworks of the unified conception it is necessary to take account of solid parameters (bond type, electronic structure), dynamics of interaction between particles of the primary beam and particles of the solid as well as the parameters that characterize the excitation state of a leaving particle. These researches still remain to be actual, because the IPE phenomenon is the basis for the development of methods for quantitative and qualitative studies of compositions of solids with different origins, in particular, biological objects. In this field of researches 3 Ph.D theses were defended: V. V. Gritsyna (1973), T. S. Kiyani (1980), S. P. Gokov (2004); 4 inventor’s certificates were got; more than 200 scientific papers were published.

Being generator of scientific ideas, Yakov Mikhailovich paid also a great attention to the young generation of scientists. Every week in the research group the obtained data were discussed in details and the further studies were planned with all the research workers including both students and candidates of science. Everyone could suggest one’s idea but it should be argued with the own data or with the reference. Yakov Mikhailovich himself devoted much attention to research papers, had the very extensive card-file in the different scientific branches which all his collaborators could use.

Yakov Mikhailovich was a widely erudite person. He loved music and knew it very well; especially he liked W. A. Mozart’s works, his symphonies. Ya. M. Fogel’ knew much about painting, admired Rembrandt’s portraits of old men. He liked and understood extremely well cinematography; knew three foreign languages (read in French, German and English both belletristic and science literature). Withal Yakov Mikhailovich was the modest, benevolent and extremely responsive man. For everyone who was lucky to work together with Ya. M. Fogel’ he will remain forever in their memory as the example of true character, the real Person

V. V. Gritsyna,

*Candidate of Science in Physics and Mathematics,
Senior Scientific Researcher.*

SEVERAL EVENTS OF PERSONAL CONTACTS WITH TEACHER

Students' rumor is always emotional and never misses "boners" of teachers. But the answers on my questions about Yakov Mikhailovich were only respectful and more often enthusiastic.

My first meeting with Yakov Mikhailovich was in the settlement Yuzhnyj near Kharkov, where I and my friend Alexej Sakharov went to see him. As always, Yakov Mikhailovich in August worked with science literature, wrote articles, selected reprints for young science growth. At this it was considered that he had an active rest.

We were offered postgraduate courses and our research supervisor had quite natural wish to have a talk with the potential research workers. Entering the Ya. M. Vogel's postgraduate course was very important for us. But all the same it was rather interesting to know about the possible research supervisor as much at once. And we arrived: I, unshaved after the month in Karelia and Alexej, all newly shaved (including his head), the second insolent fellow. Our conversation showed that Yakov Mikhailovich had quite good sense of humour but undue familiarities should be paid answering obviously complicated additional questions on university disciplines.

I was accepted to the postgraduate course but not at once, only after half-year of practically everyday evening work till 10 pm at the end of the normal work. It was not the simple period of probation but the excellent school from supervisor of forming the taste to experimental researches and analytical thinking.

The University of Life went on and after that. As a very meaningful example it was one of the research data discussions. Yakov Mikhailovich created such atmosphere of talks that there was no distinction between the incontestable authority and a "green" researcher. Our chief was rather patient at personal contacts with youth but in this case I, most probably, overcame borders of his patience and in the result was sent "in the right way" – he could do it sometimes just great. The completely unexpected for me result was in a day. According to his plan of meetings he should review the data with another science group. The door in the Laboratory was slowly opened; I turned round from the desk. In the door opening there appeared Yakov Mikhailovich's head: "Valentine, had you the time today to proceed with the unfinished talk?" You must admit that it was a lot for the postgraduate student. During this meeting he agreed with one of my suggestions about the obtained data interpretation but transformed my arguments into the more perfect hypothesis in which the contribution of my idea

appeared only a small component. After that he quickly stood up, quickly went up to the door and only there told me with a smile that as to the second question he didn't change his mind...

I think that certain individual episodes of personal contacts with the interesting person are determinative in the creation of relationships with him.

It was the norm of behaviour in the Laboratory that we went home not after the end of formal working hours but considerably later. In the result the fulfillment of domestic duties was sometimes on the verge of a failure. At this it was rather difficult to find time for reading belletristic literature and all the more looking for its novelty. Yakov Mikhailovich understood it well and so at the end of business talks he often told us in the unobtrusive form about the books he had read and about his attitude to them.

It is impossible for me to forget our last meeting in a hospital. We went out to the courtyard, sat down on a bench and I heard a lot of things significant for me. In the talk he told nothing negative about his level of health, about the situation existing that time in his life, when he was practically cut off from the most important thing in his life – from the Science. At the end of our talk he asked me to fulfill without objections his request. Of course I could not refuse. His request was, as appeared, that I, when later on come the time for me to defend the thesis, by no means would not refuse from the proposition of a new research supervisor.

Take care about a boy's destiny in such serious time of one's life – it is up to much and to a large extent characterizes a real man.

V. V. Bobkov,
*Assistance Professor,
the Head of Research Laboratory of Ion Processes,*

ION-ION EMISSION – A NEW TOOL FOR MASS-SPECTROMETRIC INVESTIGATIONS OF PROCESSES ON THE SURFACE AND IN THE BULK OF SOLIDS

Ya. M. Fogel'

[International Journal of Mass Spectrometry and Ion Physics. Elsevier Publishing Company, Amsterdam. Printed in the Netherlands. Ionic Processes Laboratory, Gorki State University, Kharkov (U.S.S.R) (First received December 21st, 1970; final version October 15th, 1971)]

ABSTRACT

A brief account of the properties of the ion-ion emission phenomenon is given. The possibilities of applying this phenomenon to the study of processes on the surface and in the bulk of solids are discussed. The foundations of the new method are considered.

INTRODUCTION

At present many methods of ion production are used in mass spectrometry. Owing to the variety of methods of producing ions mass spectrometry has acquired broad application in many branches of physics and physical chemistry. Until recently the production of ions with the help of the phenomenon of ion-ion emission (IIE) was very rarely used for mass-spectrometric investigations. Lately the situation in this field has begun to change and the IIE phenomenon is now often applied in mass-spectrometric studies.

The objective of this article is to show how the possibilities of mass spectrometry are increased if one uses the IIE phenomenon for mass-spectrometric studies of various processes on the surface and in the bulk of solids. The emphasis of this review, being on the study of surface *processes*, means that the review of earlier literature on the secondary ionization phenomenon has been somewhat limited. More detailed information on this phenomenon is contained in the monographs and review articles of refs. 1–5.

ION-ION EMISSION

In this section a very brief account of the properties of the IIE phenomenon is given.

There are two ways of producing secondary ions by impact of a primary ion on the surface of a solid. A primary ion can create a secondary ion by a process of binary collision with some particle on the surface of a solid. This

particle may be part of the crystal lattice of a solid, an adsorbed molecule of residual gas in the chamber containing the solid under study, or a molecule of some surface compound. The kinetic energy of secondary ions of this kind has the same order of magnitude as the kinetic energy of the primary ions [6, 7].

Secondary ions of relatively small kinetic energy are formed as a result of primary ion penetration into the solid*. On its path inside the solid a primary ion creates cascades of atomic collisions. When one of these cascades ends at the surface of the solid, some surface particles can acquire enough energy to fly off the solid into the vacuum. An elementary cathode sputtering event takes place if the ejected surface particle is in a neutral state. The same process of ejection of charged particles constitutes the IIE phenomenon†.

A particular application of this phenomenon (to surface processes) in the field of mass spectrometry is the subject of this article.

Mass-spectrometric studies‡ of IIE have shown that it depends on (i) the nature of the target, (ii) the nature, energy and current density of the primary ion beam, (iii) the temperature of the target, and (iv) the composition and pressure of the gas surrounding the target.

The studies cited above have shown that from the surface of a solid are ejected (i) ions of the target material itself; these can be sputtered from the lattice of the target itself, or from chemical compounds on its surface, (ii) ions of the same type as those in the primary beam, (iii) ions of a bulk impurity in the target material, (iv) ions of molecules of chemical compounds occurring on the surface of the target, or their fragments, (v) ions of molecules adsorbed on the surface of the target, or their fragments.

The quantity of secondary ions of a given kind is partly determined by the degree of ionization in the sputtering process. The degree of ionization can be

* The most probable energy of these slow secondary ions is of the order of 10 eV [8–12].

† The angular distribution of secondary ions of the second group ejected from a single crystal surface is anisotropic [13]. A similar effect is observed in the sputtering of single crystals by an ion beam (the formation of so-called Wehner's spots). At present a general opinion is that atoms ejected from the surface of a solid have their origin at the end of a collision cascade produced by a primary ion penetrating into the solid. It seems that some similarity of the angular distributions of sputtered atoms and secondary ions is due to an identity of ejection processes creating these particles. So the results of ref. 13 prove that secondary ions of small energy arise at the end of a collision cascade coming to the surface of a solid.

‡ Ref. 4 discusses mass-spectrometric studies of the composition of secondary ions. New investigations in this field have been carried out [10, 14].

defined as the ratio $f^+ = N^+/N^0$, where N^+ and N^0 are the numbers of particles ejected from the surface of a solid in the positive and neutral charge states. The f^+ value cannot be calculated with the help of the well-known Saha–Langmuir formula, in so far as the process of secondary ion ejection is a non-equilibrium one from the thermodynamic point of view [5]*. The f^+ value in the process of ejection of the secondary ions Ta^+ and Ni^+ by impact of Cs^+ ions proves [16] to be 10^7 to 10^9 times greater ($N^+/N^0 \sim 10^{-2}$) than that calculated from the Saha–Langmuir formula. The f^+ values for many metals are given in ref. 17.

THE POSSIBILITY OF APPLYING THE IIE PHENOMENON TO THE STUDY OF PROCESSES ON THE SURFACE AND IN THE BULK OF SOLIDS

What are the conditions which must be fulfilled in order to apply adequately the IIE phenomenon to the study of processes on the surface and in the bulk of solids? Anyone proposing a method of study of various processes based on the IIE phenomenon must answer such questions as:

1. How can the connexion between the particles on the surface or in the bulk of a solid and the ejected secondary ions be established?
2. What is the dependence between the current density of the secondary ions and the particle concentration on the surface or in the bulk of a solid?
3. What is the sensitivity of the method?
4. Does ion bombardment influence the course of the process under study?

Let us consider these questions separately.

1. Connexion between the particles on the surface or in the bulk of a solid and the ejected secondary ions

Practically all metals contain small bulk admixtures of the alkaline metals, mainly sodium and potassium. If a metal is heated, these impurities diffuse to its surface and their surface concentration increases. So the emission current of secondary sodium and potassium ions should rise as the metal temperature increases. Actually this is the case, as is seen in Fig. 1 (taken from ref. 18) where the dependence of the Na^+ secondary ion current on the platinum target tempera-

* The inapplicability of the Saha–Langmuir equation has been discussed [5, 15].

ture is given*. Admission of oxygen into the target chamber is accompanied by the appearance of secondary ions of sodium oxides. The emission current of sodium oxide secondary ions rises with the oxygen pressure up to some saturation value† (Fig. 2). From these data one can conclude that in an oxygen atmosphere the process of surface oxidation of sodium takes place. At temperatures higher than 600 °C the surface concentration of sodium oxides decreases with increasing target temperature, though at the same time the surface concentration of sodium atoms is increased (see Fig. 1). This means that at temperatures greater than 600 °C the surface decomposition reactions of sodium oxides have higher rates than the rate of increase of the surface concentration of sodium atoms. So by means of a study of the current-temperature relationships for secondary ions of sodium and sodium oxides one can follow the diffusion of bulk atom impurities to the target surface and their surface oxidation in an oxygen atmosphere.

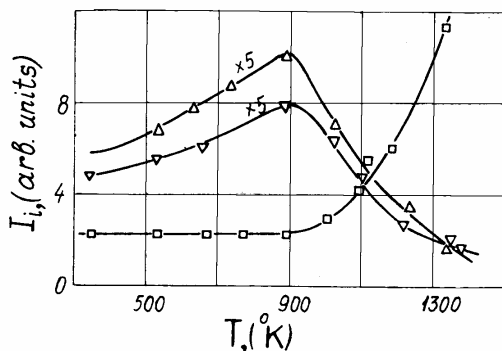


Fig. 1.

The I_i - T curves (in relative units) for the secondary ions Na^+ , Na_2O^+ and Na_2O_2^+ . ($\square = \text{Na}^+$, $\Delta = \text{Na}_2\text{O}^+$, $\nabla = \text{Na}_2\text{O}_2^+$)

* At a platinum temperature higher than 900 °K evaporation of Na^+ ions from the target surface is observed. At high target temperatures the current I_s of secondary Na^+ ions was calculated as the difference $I_t - I_{\text{therm}}$ (I_t = the total current of Na^+ ions, I_{therm} = the current of Na^+ ions evaporating from the target as a result of the surface ionization process).

† The curve $I = f(\text{Po}_2)$ (I = current of Na_2O^+ secondary ions, Po_2 = oxygen pressure in Fig. 2) corresponds to the Langmuir formula for an adsorption equilibrium between the oxygen atmosphere and the layer of sodium oxides on the surface of the target bombarded by a primary ion beam [12].

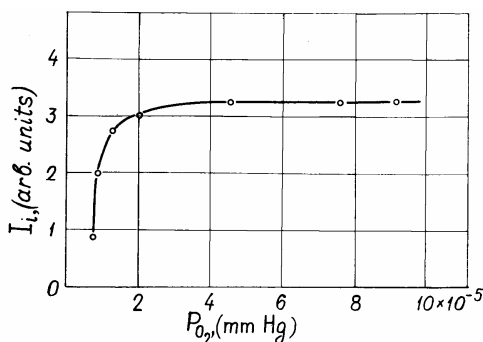


Fig. 2.

The h - P_{O_2} curve for secondary Na_2O^+ ions sputtered from a platinum target in an oxygen atmosphere

Another similar example is that of oxygen adsorption onto a tungsten surface [20]. At an oxygen pressure of about 10^{-7} mm Hg and a tungsten target temperature of $T \approx 2000$ °C the mass spectrum of secondary ions ejected from this target consists only of W^+ ions. This is evidence of an atomically clean state of the tungsten surface. An emission of positive atomic ions of oxygen appears, if the tungsten target is cooled to a temperature of 1500 °K. The O^+ ion beam current increases with time up to some saturation value (see curve 1 in Fig. 3 taken from ref. 20) which corresponds to the equilibrium state of the desorption-adsorption processes in which oxygen in the gas phase and oxygen adsorbed on the tungsten surface take part. It is clear that the O^+ secondary ions are ejected from a layer of oxygen adsorbed on the tungsten surface. It should be noted that an emission of O_2^+ ions from this layer is absent, therefore adsorption of oxygen molecules on to the tungsten surface is accompanied by their dissociation into atoms. This conclusion is in full agreement with the results of other authors [21–23] using a different technique.

At temperatures of tungsten lower than 1500 °K ejection of secondary ions of tungsten oxides is observed. The appearance of these ions in the mass spectrum of secondary ions ejected from the tungsten surface is a consequence of tungsten oxidation which follows after oxygen adsorption.

Fig. 3 (curves 2 and 3) shows that oxidation of tungsten begins after a lapse of time (the latent period) of about ten minutes after the beginning of oxygen adsorption. The latent period decreases with increasing oxygen pressure in the target chamber. The presence of oxides on the tungsten surface changes the

shape of the $I-t$ curve for the O^+ ions. This statement is based on a comparison of curves 1 and 2 in Fig. 3. The influence of tungsten oxides, existing on the tungsten surface, on the shape of the $I-t$ curve for the O^+ ions can be explained as follows. The O^+ ion beam consists of two beams: one originates from the layer of adsorbed atomic oxygen, the other from the layer of oxides on the tungsten surface.

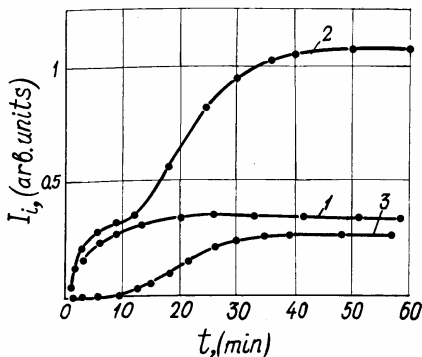


Fig. 3.

The I_{i-t} curves (in relative units) for the secondary O^+ and WO_2^+ ions.
The O^+ ions: (1) at 1500 °K, (2) at 900 °K; (3) the WO_2^+ ions at 900 °K

Thus in the case considered one can follow the processes of oxygen-tungsten interaction (adsorption, oxidation) by studying the dependence of the secondary ion currents of oxygen and tungsten oxides on time and also on the temperature of the tungsten and the pressure of the oxygen (see below). This possibility arises because of the existence of a correspondence between the coverage of the tungsten surface by the layers of adsorbed oxygen and tungsten oxides, and the emission current of secondary ions of oxygen and tungsten oxides ejected from these layers. Such a correspondence is the basis of the method of investigation of surface processes and in the bulk of solids using the IIE phenomenon.

To establish a correspondence between the parent particle on or in a solid and the secondary ion ejected from it is a very simple matter when the parent particle is an atom. In this case the mass of the ejected secondary ion determines the chemical identity of the parent particle. If a molecule is the parent particle, then one must take into account that not only can the secondary ion corresponding to the undissociated molecule be ejected from this molecule, but also ions arising by a process of dissociative ionization of a molecule by impact of the

primary ion. In this case the nature of the parent molecule is determined by the mass of the heaviest secondary ion. The ions of lighter mass may arise as ionized fragments of the parent molecule. If this is the case, the ratio of the currents of the fragment ion and of the undissociated molecule/ion must be independent of the factors (temperature of the target, pressure of gas around the target and time) which can influence the concentration of parent particles. These fragment ions, together with the undissociated molecule/ion form a group characterized by the same shape of dependence of ion current on some of the above-mentioned parameters*. As an example of such a group it is possible to cite the $I-t$ curves for the ions $\text{Fe}(\text{CO})_5^+$, $\text{Fe}(\text{CO})_4^+$, $\text{Fe}(\text{CO})_3^+$, $\text{Fe}(\text{CO})_2^+$ and $\text{Fe}(\text{CO})^+$ ejected from the $\text{Fe}(\text{CO})_5$ molecule which is formed on the surface of a carbon steel in the process of its interaction with oxygen [24]. But there are cases where the ratio of currents of some lighter ion and of an undissociated molecule/ion is dependent on the target temperature or some other parameter influencing the concentration of parent particles. This means that such an ion is ejected not only from the undissociated molecule, but also from some other particle which independently exists on the surface or in the bulk of the solid. One finds such circumstances in the process of ammonia synthesis on the surface of an iron catalyst [25]. In this case the $I_{\text{NH}^+}/I_{\text{NH}_3}$ ratio varies with change of catalyst temperature in the range 20–800 °C. Not only NH_3 molecules but also NH radicals are formed [25] on the surface of the iron catalyst. Thus an NH^+ ion can originate not only from an NH_3 molecule but also from an NH radical, so the $I_{\text{NH}^+}/I_{\text{NH}_3}$ ratio depends on the iron catalyst temperature.

There are many cases where several parent particles exist on the surface of a solid. In these cases, secondary ions ejected from the surface are distributed among several groups, each of which is characterized by a particular shape of $I-T$ curve. To deduce the nature of the parent particles from the $I-T$ curves for ejected secondary ions in these cases is a difficult matter, since the same ion may be ejected from several parent particles. Refs. 26 and 27 provide examples of such an analysis.

* In the case when the change of the target temperature may cause a redistribution of the populations of the vibrational levels of an adsorbed molecule, the shape $I-t$ curves depends not only on the concentration of parent particles but also on the target temperature. In this case it is desirable to carry out the analysis using the dependences of the secondary ion current on the gas pressure or on the time.

2. The relationship between the current density of secondary ions and parent particle concentration

An examination of the adsorption equilibrium between molecules in the gas phase and in the adsorbed state on the surface of a solid bombarded by a primary ion beam [19] leads to the equation

$$j = \frac{\alpha n_0 c p j_0}{c p + v + \sigma n_0 j_0} \quad (1)$$

where j and j_0 are the current densities of the beams of secondary and primary ions respectively, p is the gas pressure, v is the number of gas molecules evaporating per second from one cm^2 of surface with a monomolecular coverage, n_0 is the number of adsorbed molecules on one cm^2 of solid surface at monomolecular coverage, α is the ejection probability of secondary ions of the given kind, σ is the full ejection probability of molecules in a neutral and charged state, $c = x\bar{v}/4kT$ (x , $\bar{v}$ and T are the condensation coefficient, mean molecular velocity, temperature of the solid in $^\circ\text{K}$ and k is the Boltzmann constant respectively).

At small values of j_0 the inequality $\sigma n_0 j_0 \ll c p + v$ holds. On the other hand the coverage θ of the solid surface by molecules from which the secondary ions under study are ejected can be expressed by the Langmuir formula

$$\theta = \frac{c p}{c p + v}. \quad (2)$$

Neglecting the value $\sigma n_0 j_0$ in the denominator of eqn. (1) and taking into account the Langmuir formula, we obtain the following relationship between the current density of secondary ions of the given kind and the surface concentration of the parent particles

$$\frac{j}{j_0} = \alpha n \quad (3)$$

where n is the surface concentration of the parent particles.

In order to verify experimentally that eqn. (3) holds, it is necessary to study the function $j = f(j_0)$ and to ascertain that there exists a linear dependence between the quantities j and j_0 in the range of small values of j_0 .

In the course of a surface process variations in the surface concentrations of certain particles may occur. To obtain information on its mechanism one must know how the surface concentrations of these particles depend on the temperature which influence the course of the process under study. This knowledge may be obtained by a study of the dependences of the current densities of appropriate secondary ions on the above cited parameters. But only when α is constant, as follows from eqn. (3), does the variation of the quantity j truly reflect the change of the surface concentration of the parent particles under study.

The value of α depends on the nature of the secondary ion, the nature and energy of the primary ion (see curves in Fig. 2 of ref. 4) and on the angle of incidence of the primary ion beam on the target surface. Generally this quantity may also depend on the values of T and n .

Recently it was shown [28] that the ejection probability of the secondary ions of tungsten oxides formed in the process of surface oxidation of tungsten does not depend either on T or on n . Evidence that α is constant was obtained by means of a comparison of the curves $j-t$ and $j-T$ with the corresponding curves $n-t$ and $n-T$. The functions $n-t$ and $n-T$ were investigated by the authors of papers [21, 23, 29–31] by the flash filament method with mass-spectrometric analysis of the evaporating particles.

In Fig. 4 the curve $j-t$ for the WO_2^+ secondary ions and the curve $n-t$ for the evaporating WO_2 molecules are given*. These curves were normalized in the saturation region.

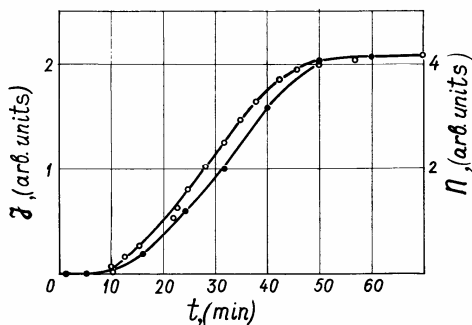


Fig. 4.

The curves $j-t$ and $n-t$ for the secondary WO_2^+ ions and the WO_2 molecules (in arbitrary units). (● = WO_2^+ ions, ○ = WO_2 molecules)

* The curves $j-t$ and $n-t$ were taken from refs. 20 and 30.

As is seen from Fig. 4 the curves $j-t$ and $n-t$ almost fully coincide and therefore the ratio j/n which is equal to αj_0 is constant. The same result is obtained by the comparison of the curves $j-t$ and $n-t$ for WO_3^- ions and WO_3 molecules (Fig. 5).

It should be noted that the work function of tungsten increases as the concentration of oxides on its surface rises. For instance the work function of tungsten (ref. 30) is increased from 4.54 eV to 5.74 eV by the transition from an atomically clean state of its surface (the initial part of the curve $n-t$ in Fig. 4) to the state when the equilibrated layer of tungsten oxides is formed (saturation region of the $n-t$ curve).

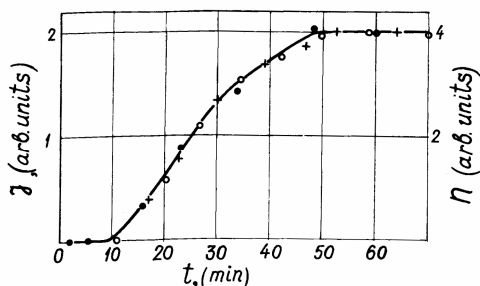


Fig 5.

The curves $j-t$ and $n-t$ for the secondary WO_3^- ions and the WO_3 molecules (in arbitrary units). (● = WO_3^- ions (continuous operation), ○ = WO_3 molecules, + = WO_3^- ions (primary beam bombardment with short duration pulses))

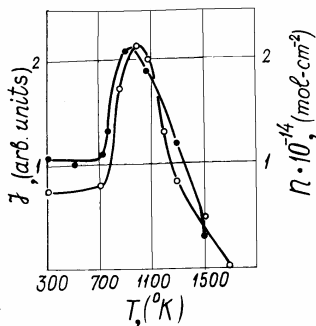


Fig. 6.

The curves $j-T$ and $n-T$ for the secondary WO_2^+ ions (in arbitrary units) and the WO_2 molecules. (● = WO_2^+ ions, ○ = WO_2 molecules)

In the same manner it can be shown that the ejection probability of the secondary ions of tungsten oxides does not depend on the temperature of tungsten. This conclusion follows from comparison of the curves $j-T$ and $n-T$ (Fig. 6) which were taken from refs. 28 and 31*. There is good coincidence of all parts of the curves $j-T$ and $n-T$ and hence the conclusion follows that α is a constant. It is necessary to emphasize that the composition of the oxide layer on the surface of tungsten varies with the temperature [27] but this variation does not influence the ejection probability of the secondary ions of tungsten oxides.

So, the variation of the concentration and composition of oxides on the surface of tungsten and the change of the work function of tungsten, which is due to a modification of the tungsten oxides layer, do not influence the ejection probabilities of secondary ions of the tungsten oxides. As a consequence the proportionality between the quantities j and n holds and as a result of this the course of the tungsten oxidation process can be followed by means of a study of the relationships $j-t$, $j-T$ and $j-p$. It is reasonable to apply this statement also to other surface processes which are similar to the process of tungsten oxidation.

Now let us consider the dependence of the current density of secondary ions of bulk origin on the bulk concentration of parent particles. In this case it is necessary to take into account that, besides secondary ions of bulk origin, secondary ions having the same mass-to-charge ratio but of surface origin can also be ejected from a solid. So one has need of a rigorous method of separation of secondary ions of bulk and surface origins. Such a method, based on different dependences of the current densities of secondary ions of bulk and of surface origin on the current density of the primary ion beam, is described below.

In general the current density of secondary ions i is the sum of the current densities j_1 and j_2 of the beams of secondary ions of surface and of bulk origin, that is:

$$j = j_1 + j_2. \quad (4)$$

The current density j_2 is defined by the formula

$$j_2 = \beta N \gamma(\theta) j_0. \quad (5)$$

where N is the bulk concentration of parent particles, β is the ejection probability of secondary ions of bulk origin, $\gamma(\theta)$ is a screening coefficient which is connected with the presence of adsorbed particles on the surface of a solid†.

* These curves were normalized in the region of their maxima.

† At large values of the current density j_0 of a primary beam the value $\gamma(\theta) \rightarrow 1$.

Substituting the current densities j_1 and j_2 in eqn. (4) by their values from eqns. (1) and (5), we obtain:

$$j = \frac{\alpha n_0 c p j_0}{c p + v + \sigma n_0 j_0} + \beta N \gamma(\theta) j_0 \quad (6)$$

At sufficiently large values of j_0 the first member of eqn. (6) attains the constant value $\alpha c p / \sigma$ and the coefficient $\gamma(\theta)$ becomes equal to unity. If in this range of values of j_0 the ejection probability β does not depend on j_0 , there is a proportionality between the quantities j and j_0 . In this case the slope K of the linear portion of the function $J = f(j_0)$ will be proportional to the bulk concentration of parent particles N . Thus if, as a result of a certain bulk process, the concentration of parent particles varies, one can follow its course by measuring the value K at various stages of this process. Naturally such a possibility is real only if the function $j = f(j_0)$ has a linear portion in the region of large values of j_0 .

An experimental verification of eqn. (6) was made [32] for various secondary ions of bulk origin. In Fig. 7 the graph of $j = f(j_0)$ for the Fe^+ secondary ions ejected from a strip of carbon steel is given*. As is seen from this figure $j = f(j_0)$ becomes linear in the region of values of N_0 greater than 10^{15} particles per second (current density of the primary beam 1.5 mA cm^{-2}). The curves $j = f(j_0)$ had the same shape for the secondary ions of iron carbides ejected from steel and also for secondary ions of bulk origin ejected from other metals. So, in the cases under study, eqn. (6) holds and consequently certain bulk processes may be investigated by measuring the K -value of the linear part of the $j = f(j_0)$ curve at various stages of the bulk process†.

* On the coordinate axes in Fig. 7 the numbers N and N_0 of secondary and primary ions are plotted.

† Any factor which changes the interaction force between an ejected particle and the lattice of a solid must also change the β -value. Thus the possibility arises of studying phase transitions by observing the jump of the β -value at a phase transformation in a solid.

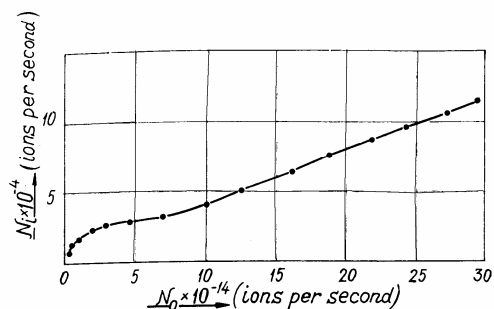


Fig. 7.

The curve $N - f(N_0)$ for the Fe^+ secondary ions

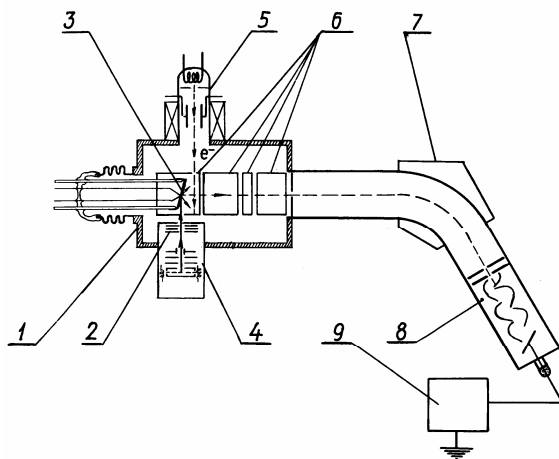


Fig. 8.

A mass-spectrometric set-up for the study of surface processes by the IIE method

3. The sensitivity of the method based on the IIE phenomenon

In the early sixties the author of this article and his colleagues began to apply the IIE phenomenon to the study of various processes on the surface and in the bulk of solids [33]. A schematic drawing of the experimental set-up which was used for this purpose is given in Fig. 8.

This set-up consists of three main parts: (a) a target chamber (1), (b) a magnetic mass analyzer (7), and (c) an ion detector.

In most cases the target (3) is a metallic strip. The strip is heated by an electric current flowing through it. The strip temperature is measured by the thermocouple attached to its rear side.

The primary ions which bombard the target are accelerated and focused by an ion gun (4). The ions in this gun are produced by electron impact with the molecules of the gas admitted to it. In order to decrease the gas flow from the ion gun into the target chamber they are separated by the slit system (2).

In the study of surface processes it is very often important to know the composition of the gas phase which interacts with the surface of the solid. Therefore in this case it is desirable to add to the mass-spectrometric analysis of the secondary ions, ejected from the solid surface by primary ion impact, a study of the ions formed as a result of ionization of the gas phase by electron impact. For this purpose the target chamber was supplied with an electron gun (5). The electron beam of this gun ionizes the gas near the surface of the target.

The secondary ions ejected from the target surface are focused by the four-electrode electrostatic lens (6) on the entrance slit of the mass analyzer (7).

The ion detector consists of an electron multiplier (8) and a valve electrometer (9). The sensitivity of the ion detector is equal to 10^{-17} A/div.

A very important characteristic of any mass-spectrometric method is its threshold sensitivity. The threshold sensitivity of the method based on the IIE phenomenon is defined as the least surface or bulk concentration of parent particles which can be measured by an appropriate mass-spectrometric equipment (for instance by such a one as is represented in Fig. 8). In the first instance this sensitivity depends on the ejection probability of secondary ions. Of further significance are such quantities as the focusing power of the ion lens, loss of secondary ions in passing through the magnetic analyzer and the sensitivity of the ion detector.

The results of experimental investigations show that in some cases the sensitivity of the IIE method is very great. For instance it is possible to refer to the results of investigations of the chemical reaction on the surface of platinum and tungsten strips [18, 34]. The reagents were sodium and potassium atoms* and O_2 and CCl_4 molecules adsorbed on the surface of these strips. The coverage of the platinum and tungsten strips [35] by sodium and potassium atoms was of the order of 10^{-3} to 10^{-4} of a monolayer. Using the IIE method it was possible to study at such small coverages the formation of oxides [18] and chlorides [34]

* The sodium and potassium were small natural admixtures in the platinum and tungsten strips.

of sodium and potassium in the surface chemical reactions between Na and K atoms and O_2 and CCl_4 molecules.

Another example illustrating the great sensitivity of the IIE method is the study of the adsorption of oxygen on a tungsten surface. Curve 1 of Fig. 3 reflects an accumulation of atomic oxygen on a tungsten surface in the course of time. The beginning of the saturation region of curve 1 corresponds to the formation of a monatomic layer of atomic oxygen. An easily measurable current of O^+ secondary ions is obtained at coverages of tungsten by atomic oxygen much smaller than a monatomic layer*.

A little data exists on the threshold sensitivity of the IIE method as a means of studying bulk processes in solids. The authors of papers [36, 37] estimated the threshold sensitivity of this method, in the case of an analysis of small admixtures in very pure substances, as high as 10^{-5} to 10^{-7} %.

4. On the influence of ion bombardment on the course of surface and bulk processes in solids

In principle, ion bombardment can affect the course of surface and bulk processes in solids. This influence can be diminished if the following experimental conditions are chosen properly: (a) the nature of the primary beam particles, (b) the energy of the bombarding ions, (c) the time of action of the bombarding ions on the target, and (d) the current density of the primary beam.

It is clear that the best bombarding particles are the rare-gas ions. They are chemically inert and weakly adsorb on the solid surface, so He^+ or Ar^+ ions are usually used in investigations by the IIE method.

There is experimental evidence that the course of some heterogeneous chemical reactions does not change if the energy of the bombarding particles is varied in the range 2 to 20 keV. Thus it is reasonable to choose the energy of the bombarding ions from the point of view of maximum yield of secondary ions and therefore a primary ion energy of 2 to 4 keV is usually used†.

It is possible to diminish considerably the time of action of the ions impinging on the target if measurements are made by bombarding it by short

* At the first point of the curve 1 (Fig. 3) the value of current is much greater than the background current.

† The optimum energy mentioned above relates to the case when the angle of incidence of primary ion beam on the target is equal to 45° . For other angles of incidence this energy must have another value.

pulses of the primary beam. One may use this possibility if continuous ion bombardment affects the course of the process under study.

The choice of current density of the primary beam is the most important. At first let us discuss this problem for the process of gas adsorption on the target surface.

As was previously mentioned (Section 2), eqn. (1) describes the adsorption equilibrium on the surface of a solid bombarded by a primary beam. At small values of the current density j_0 of the primary beam, when $\sigma n_0 j_0 \ll cp + v$, eqn. (1) is modified as follows:

$$j = \frac{cn_0 p \alpha}{cp + v} j_0 = K' j_0 \quad (7)$$

where

$$K' = \frac{cn_0 p \alpha}{cp + v} \quad (8)$$

As is seen from eqn. (7) a linear portion of the $j = f(j_0)$ dependence will exist if the condition that $K' = \text{constant}$ is valid.

Ion bombardment produces defects (Frenkel point defects, implanted particles of the primary beam) in the surface layer of a solid and therefore may change its structure and composition. This change may affect the values x , v and α , entering into eqn. (8), so that the condition $K' = \text{constant}$ will not take place and the $j = f(j_0)$ dependence will have no linear part. On the contrary the existence of a linear part of the $j = f(j_0)$ dependence in the region of small values of j_0 indicates that ion bombardment does not influence the surface properties of a solid and therefore does not affect the course of surface processes. It is possible to extend this conclusion to some other surface processes (heterogeneous catalysis, the initial stage of gaseous corrosion). One must only bear in mind that for processes differing from the adsorption described by eqn. (7) some other coefficients, which characterize these processes, will enter.

Thus, as follows from the discussion above, anyone wanting to apply properly the IIE method to the study of surface processes must work with such current densities of the primary beam which do not come outside the limits of the linear portion of the $j = f(j_0)$ dependence in the range of *small values of j_0* .

Ion bombardment of a target can affect the ejection probability of secondary ions of bulk origin (the value of β in eqn. (5)) and thus influence the

course of bulk processes in solids. If this is the case, the $j = f(j_0)$ dependence will have no linear portion in the region of large values of j_0 (see Fig. 7). On the contrary if this linear portion exists, $\beta = \text{constant}$, and ion bombardment has no influence on the course of the bulk processes under study. Thus in the case of bulk processes it is necessary to work with current densities of the primary beam which are within the limits of the linear part of the $j = f(j_0)$ dependence in the region of large values of j_0^* .

One of many examples where, by proper choice of the current density of the primary beam, it is possible to eliminate the influence of ion bombardment on the course of a surface process is illustrated by Fig. 5. The curve $I-t$ (full circles) in this figure, which reflects the kinetics of formation of the WO_3 oxide on a tungsten surface, was obtained with continuous bombardment of the target by the primary beam. In this figure the values of the WO_3^- secondary ion currents obtained by short (several second) pulses of bombardment by the primary beam are marked by crosses. As is seen from Fig. 5 the curves $I-t$ obtained with continuous and short pulse bombardments coincide. This means that the action of the primary beam on the target does not influence the process of tungsten oxidation.

CONCLUSION

Summing up all that has been said in this article it is possible to state that the new mass-spectrometric method, which is based on using the phenomenon of ion-ion emission, permits one:

1. Under stationary conditions to define the chemical identity of particles taking part in processes on the surface and in the bulk of solids.
2. To investigate the course of processes on the surface and in the bulk of solids by means of a study of the dependence of the secondary ion current on various parameters (the time, the temperature of the solid, the pressure and the composition of the gas atmosphere surrounding the solid).

The great threshold sensitivity of the IIE method permits one to analyze the composition of very thin surface films on solids. The thickness of these films can be as thin as one monomolecular layer. In favourable cases, processes

* As follows from eqn. (6) it is possible to displace the beginning of this linear part in the region of smaller values of j_0 if to decrease the partial pressure of that gas which adsorbs onto the surface of a solid and thus generates the same mass-to-charge ions as the ions of bulk origin under study.

connected with coverages of the solid surface by the particles under study as low as a small part of a monomolecular layer can be studied.

Finally the experimental criteria have been worked out, which permit one to state that ion bombardment does not influence the course of the surface and bulk processes in solids.

The new possibilities of the IIE method have been used already in the study of such processes as, (a) adsorption of gas on the metal surface [20, 34, 38, 39], (b) heterogeneous catalytic chemical reactions [25, 26, 33, 40–44], (c) gaseous corrosion of metals [24, 28, 45–52], (d) electrochemical corrosion of metals [53, 54], (e) adhesion of cold welded metals [55], (f) surface and bulk diffusion in solids [56–59], (g) initial stage of thin film deposition on substrate [60], (h) purifying metals from admixtures [61], (i) ion implantation in solids [62, 63], and (k) phase transitions in alloys [64].

It is seen from the references cited above that the IIE method has already found certain applications in some branches of science and technology. But it is possible to indicate many other fields of investigation where the IIE method may be used. It is probable that this method can give results of great practical value for corrosion science and corrosion prevention. This hope is based on the possibility of studying by the IIE method the early stages of the corrosion process and therefore to define the nature and the composition of the protective layer on the metal surface. New and valuable information may be obtained using the IIE method in such branches of pure and applied science as volume and surface diffusion in metals, phase transitions in metals, cold welding of metals, sorption pumping of gases, plating of the metal surface by protective layers, implantation of ions into semiconductors. It is beyond doubt that the next years will be a time of fast development of the IIE method and a great extension of its use in various fields of investigation.

REFERENCES

- 1 H. S. W. Massey and E. H. S. Burhop, *Electronic and Ionic Impact Phenomena*, Clarendon Press, Oxford, 1952.
- 2 M. Kaminsky, *Atomic and Ionic Impact Phenomena on Metal Surfaces*, Springer-Verlag, Berlin, 1965.
- 3 G. Carter and J. S. Colligon, *Ion Bombardment of Solids*, Heineman, London, 1968.
- 4 Ya. M. Fogel', *Sov. Phys. Usp.*, 10 (1967) 17.
- 5 A. Benninghoven, *Z. Phys.*, 220 (1969) 159.

- 6 B. V. Panin, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, 42 (1962) 313.
- 7 P. Dahl and J. Magyar, *Phys. Rev.*, A 140 (1965) 1420.
- 8 R. C. Bradley, *J. Appl. Phys.*, 30 (1959) 1; R. C. Bradley and E. Ruedl, *J. Appl. Phys.*, 33 (1962) 88a.
- 9 A. Benninghoven, *Ann. Phys. (Leipzig)*, 15 (1965) 113.
- 10 A. Benninghoven, *Z. Phys.*, 199 (1967) 141.
- 11 J. F. Kirchner and H. J. Klein, *Z. Naturforsch.*, 23A (1967) 577.
- 12 J. F. Hennequin, *J. Phys. (Paris)*, 29 (1968) 655.
- 13 V. E. Yurassova, V. M. Bukhanov and M. Golo, *Phys. Status Solidi*, 17 (1966) 187.
- 14 Z. Yuzela and B. Perovic, *Can. J. Phys.*, 46 (1968) 773.
- 15 C. A. Andersen, *Int. J. Mass Spectrom. Ion Phys.*, 3 (1970) 413.
- 16 V. I. Veksler and M. B. Ben'jaminovich, *Sov. Phys. Tech. Phys.*, 1 (1956) 1626.
- 17 G. Blaise and G. Slodzian, *C R. Acad. Sci.*, B266 (1968) 1525.
- 18 L. P. Rekova, A. D. Abramnikov and Ya. M. Fogel', *Zh. Tekh. Fiz.*, 38 (1968) 331.
- 19 V. F. Rybalko, Ya. M. Fogel' and V. Ya. Kolot, *Zh. Fiz. Khim.*, 43 (1969) 255.
- 20 V. F. Rybalko, V. Ya. Kolot and Ya. M. Fogel', *Zh. Tekh. Fiz.*, 39 (1969) 1717.
- 21 Yu. G. Ptushinskii, *Thesis*, Kiev, 1970.
- 22 V. N. Ageev and N. I. Ionov, *Zh. Tekh. Fiz.*, 39 (1969) 1523.
- 23 B. McCarroll, *J. Chem. Phys.*, 46 (1967) 863.
- 24 V. I. Shvachko, B. T. Nadykto, Ya. M. Fogel' and K. S. Garger, *Dokl. Acad. Nauk, SSSR, Ser. Khim.*, 161 (1965) 886.
- 25 V. I. Shvachko, Ya. M. Fogel' and V. Ya. Kolot, *Kinet. Ratal*, 7 (1966) 847.
- 26 Ya. M. Fogel', B. T. Nadykto, V. F. Rybalko, V. I. Shvachko and I. E. Korobchanskaja, *Kinet. Ratal*, 5 (1964) 496.
- 27 V. F. Rybalko, V. Ya. Kolot and Ya. M. Fogel', *Izv. Acad. Nauk, SSSR, Ser. Fiz.*, 33 (1969) 836.
- 28 V. F. Rybalko, V. Ya. Kolot and Ya. M. Fogel', *Ukr. Fiz. Zh. (Russ. Ed.)*, 14 (1969) 913.
- 29 Yu. G. Ptushinskii and B. A. Chuikov, *Surface Sci.*, 6 (1967) 42.
- 30 Yu. G. Ptushinskii and B. A. Chuikov, *Surface Sci.*, 1 (1967) 507.
- 31 Yu. G. Ptushinskii and B. A. Chuikov, *Fiz. Tverd. Tela*, 10 (1968) 622.
- 32 V. F. Kozlov, V. M. Pistryak, Ya. M. Fogel', *Fiz. Tverd. Tela*, 10 (1968) 622.
- 33 Ya. M. Fogel', B. T. Nadykto, V. F. Rybalko, R. P. Slabospitskii and I. E. Korobchanskaja, *Dokl. Acad. Nauk, SSSR*, 147 (1962) 414.

- 34 L. P. Rekova, A. D. Abramenzkov and Ya. M. Fogel', *Zh. Tekh. Fiz.*, 38 (1968) 1570.
- 35 L. P. Rekova, Ya. M. Fogel' and A. P. Alexandrov, *Zh. Tekh. Fiz.*, 34 (1965) 1642.
- 36 A. E. Barrington, R. F. Herzog and W. P. Poschenrieder, *J. Vac. Sci. Technol.*, 3 (1966) 239.
- 37 H. E. Beske, *Z. Naturforsch.*, 22A (1967) 459.
- 38 Ya. M. Fogel', B. T. Nadykto, V. I. Shvachko and V. F. Rybalko, *Zh. Fiz. Khim.*, 38 (1964) 2397.
- 39 V. Ya. Kolot, V. I. Tatus', V. F. Rybalko and Ya. M. Fogel', *Zh. Tekh. Fiz.*, 40 (1970) 2469.
- 40 Ya. M. Fogel', B. T. Nadykto, V. F. Rybalko, R. P. Slabospitskii, I. E. Korobchanskaja and V. I. Shvachko, *Rinet. Ratal*, 5 (1964) 154.
- 41 Ya. M. Fogel', B. T. Nadykto, V. F. Rybalko, R. P. Slabospitskii, I. E. Korobchanskaja and V. I. Shvachko, *J. Catal.*, 4 (1965) 153.
- 42 V. I. Shvachko and Ya. M. Fogel', *Rinet. Ratal*, 7 (1966) 722.
- 43 Ya. M. Fogel', B. T. Nadykto, V. I. Shvachko, V. F. Rybalko and I. E. Korobchanskaja, *Rinet. Ratal*, 5 (1964) 942.
- 44 V. L. Kuchaev, A. A. Vasilevich, L. O. Apelbaum, M. I. Temkin and Ya. M. Fogel', *Rinet. Ratal*, 10 (1969) 678.
- 45 V. F. Rybalko, V. Ya. Kolot and Ya. M. Fogel', *Fiz. Tverd. Tela*, 10 (1968) 3176.
- 46 V. F. Rybalko, V. Ya. Kolot and Ya. M. Fogel', *Fiz. Tverd. Tela*, 11 (1969) 1304.
- 47 V. I. Shvachko, B. T. Nadykto, Ya. M. Fogel', B. M. Vasyutinskii and G. N. Kartmazov, *Fiz. Tverd. Tela*, 1 (1965) 1944.
- 48 V. Ya. Kolot, V. F. Rybalko, Ya. M. Fogel' and G. F. Tikhinskii, *Zashch. Metal*, 3 (1967) 623.
- 49 A. Benninghoven, *Chem. Phys. Lett.*, 6 (1970) 626.
- 50 V. F. Rybalko, V. Y. Kolot and Ya. M. Fogel', *Proc. Int. Conf. Mass Spectroscopy, Kyoto*, 1970, p. 1109.
- 51 V. Ya. Kolot, V. I. Tatus', V. F. Rybalko and Ya. M. Fogel', *Izv. Acad. Nauk, SSSR*, 35 (1971) 255.
- 52 V. Ya. Kolot, V. I. Tatus', V. F. Rybalko, Ya. M. Fogel', V. V. Vodolazhchenko and V. M. Evseev, *Fiz. Tverd. Tela*, 13 (1971) 1521.
- 53 V. Ya. Kolot, V. F. Rybalko, L. S. Palatnik, Ya. M. Fogel' and L. E. Chernjakova, *Zashch. Metal*, 5 (1969) 440.
- 54 A. Benninghoven, *Z. Phys.*, 230 (1970) 403.
- 55 A. D. Abramenzkov, A. S. Tron', Ya. M. Fogel' and V. I. Shvachko, *Fiz. Rhim. Obrab. Mater.*, No. 2 (1968) 111.

-
- 56 P. Contamin and G. Slodzian, *C R. Acad. Sci.*, C267 (1968) 1968.
- 57 D. Quataert and F. Coen-Porisini, *J. Nucl. Mater.*, 36 (1970) 20.
- 58 A. D. Abramenzkov, Ya. M. Fogel', V. V. Slezov, L. V. Tanatarov and O. P. Ledenev, *Fiz. Metal Metalloved.*, 30 (1970) 1310.
- 59 A. D. Abramenzkov, V. V. Slezov, L. V. Tanatarov and Ya. M. Fogel', *Fiz. Tverd. Tela*, 10 (1970) 2929.
- 60 A. D. Abramenzkov, V. M. Azhazha, Ya. M. Fogel' and V. I. Shvachko, *Fiz. Metall Metal-loved.*, 29 (1970) 519.
- 61 V. Ya. Kolot, V. I. Tatus', V. F. Rybalko and Ya. M. Fogel', *Ukr. Fiz. Zh. (Ukr. Ed.)*, 15 (1970) 278.
- 62 V. M. Pistrjak, A. K. Gnap, V. F. Kozlov, R. I. Garber, A. I. Fedorenko and Ya. M. Fogel', *Fiz. Tverd. Tela*, 12 (1970) 1281.
- 63 K. Gamo, M. Iwaki, K. Masuda and S. Namba, *Jap. J. Appl Phys.*, 10 (1971) 523.
- 64 M. V. Vasil'ev, Yu. N. Ivatchenko and V. T. Cherepin, *Metallofizina*, Inst. Phys. Ukr. Acad. Sci., Kiev, 32 (1970) 143.

Составители книги надеются, что воспоминания дочери, учеников и соратников хотя бы частично воссоздали многогранный облик, жизненный путь и научную деятельность Якова Михайловича Фогеля – видного ученого-физика, преданнейшего науке человека и Учителя, воспитавшего целое поколение исследователей. Многие из его воспитанников и по настоящее время продолжают успешно развивать начатые им исследования в области физики взаимодействий атомов и ионов с твердым телом. Кроме большого чисто научного значения, результаты этих исследований имели и имеют широкое практическое применение.

Я. М. Фогель первым начал исследования явлений вторичной ионной и ионно-фотонной эмиссий и увидел перспективы практического применения этих явлений для изучения различных свойств поверхностных слоев и объема твердых тел.

Он был необычайно широко эрудированным человеком, как в физике, так и в литературе, живописи, музыке, кино.

Он всегда был готов поделиться научным опытом, знаниями, активно общался с коллегами и в нашей стране, и за рубежом, участвовал в конференциях и семинарах. Я. М. Фогель был вдохновителем и первым организатором конференций «Взаимодействие атомных частиц с твердым телом», ставших затем международными и проходящими и поныне (под названием «Взаимодействие ионов с поверхностью, ISI»). На последней, XIX конференции в 2009 г., проходившей в год 100-летия со дня рождения Якова Михайловича, был отмечен его огромный вклад в развитие этой области физики.

Авторы надеются, что для молодого поколения нынешних физиков Яков Михайлович будет образцом творческого и самоотверженного служения своему делу.

Conclusions

Authors of the book hope, that the memories of the daughter, disciples and colleagues at least in part reconstructed many-sided personality, course of life and scientific activity of Yakov Mikhailovich Fogel' – the eminent physicist, very-devoted to science person and Teacher who trained generations of researchers. Many his disciples are successfully developing now the investigations in physics of atom and ion interactions with solids he started. Besides great scientific importance results of these studies had and have now wide practical applications.

Ya.M. Fogel' was the first who began the studies of secondary ion and ion-photon emissions phenomena and saw perspectives of their practical applications for investigations of different properties of surface layers and bulks of solids.

He was the extraordinary wide-erudite person in physics as well as in literature, music, painting and the cinema.

He was always ready to share his scientific experience, knowledge with everybody; actively communicated with colleagues both in our country and abroad, took part in many conferences and workshops. Ya.M. Fogel' was the inspirer and the first organizer of the conferences "Interaction of atomic particles with solids" that became later international and are held to the present time (called "Ion-Solid Interaction" now). On the last XIX Conference in 2009, in the year of Yakov Mikhailovich Fogel's centenary, his great contribution to the development of this field of physics was mentioned.

Authors hope that Yakov Mikhailovich Fogel' becomes for the younger generation of physicists an example of creative selfless service to one's work.

СОДЕРЖАНИЕ

Памяти Я. М. Фогеля	3
Ya. M. Fogel' (to the centenary of his birthday)	9
Воспоминания дочери Я. М. Фогеля	
<i>Н. Я. Фогель. Лучших отцов, чем мой папа, не бывает</i>	<i>16</i>
Воспоминания учеников и коллег Я. М. Фогеля	
<i>В. Т. Толок. Мой первый учитель. Отрывки из книги «Жизнь моя... 2006»</i>	<i>28</i>
<i>Л. И. Крупник. Я. М. Фогель. Учитель и наставник</i>	<i>29</i>
<i>А. Н. Довбня. Учитель, наставник, бог – Я. М. Фогель</i>	<i>43</i>
<i>И. М. Карнаухов. Работа с Я. М. Фогелем</i>	<i>44</i>
<i>Р. П. Слабостицкий. Преданнейший слуга науки</i>	<i>47</i>
<i>Э. С. Парилис. Несколько слов о Я. М. Фогеле</i>	<i>49</i>
<i>В. А. Гусев. Учитель</i>	<i>50</i>
<i>И. Е. Коробчанская. Памяти незабываемого учителя Я. М. Фогеля</i>	<i>56</i>
<i>Э. Т. Верховцева. Воспоминания о Я. М. Фогеле</i>	<i>58</i>
<i>В. Т. Конпе. Я. М. Фогель в Харьковском государственном университете</i>	<i>61</i>
<i>Л. П. Тищенко. Радиационная физика тонких металлических пленок</i>	<i>64</i>
<i>В. В. Грицына. Физик, учитель, человек</i>	<i>66</i>
<i>В. В. Бобков. Несколько эпизодов из общения с учителем</i>	<i>68</i>
Основополагающие научные работы Я. М. Фогеля	
<i>Я. М. Фогель. Образование отрицательных ионов при атомных столкновениях</i>	<i>70</i>
<i>Я. М. Фогель. Вторичная ионная эмиссия</i>	<i>140</i>
Список научных трудов Я. М. Фогеля	197
Диссертации, защищенные учениками Я. М. Фогеля (перечень)	231
Memoirs of Ya. M. Fogel's daughter	
<i>N. Ya. Fogel'. There is no better father than mine</i>	<i>234</i>

Memoirs of Ya. M. Fogel's discriples and colleagues

<i>V. T. Tolok.</i> My first Tutor. Passage from the book "My life... 2006"	245
<i>L. I. Krupnik.</i> Ya. M. Fogel'. Teacher and Tutor	246
<i>A. N. Dovbnya.</i> Teacher, Tutor, God – Ya. M. Fogel'	258
<i>I. M. Karnaukhov.</i> Working with Ya. M. Fogel'	259
<i>R. P. Clabospitsky.</i> Most faithful servant of science	262
<i>E. S. Parilis.</i> Several words about Ya. M. Fogel'	264
<i>V. A. Gusev.</i> Teacher	265
<i>I. E. Korobchanskaya.</i> Of the blessed memory of the unforgettable Teacher Ya. M. Fogel'	271
<i>E. T. Verkhovtseva.</i> Recollection of Ya. M. Fogel'	272
<i>V. T. Koppe.</i> Ya. M. Fogel' in Kharkov State University	275
<i>L. P. Tishchenko.</i> Radiation physics of thin metal films	278
<i>V. V. Gritsyna.</i> Physicist, Tutor, Person	279
<i>V. V. Bobkov.</i> Several events of contacts with Teacher	281

The fundamental Ya. M. Fogel's science paper

<i>Ya. M. Fogel'.</i> Ion-ion emission – a new tool for mass-spectrometric investigations of processes on the surface and in the bulk of solids	283
--	-----

Заклучение	304
-------------------------	-----

Conclusion	305
-------------------------	-----

Довідкове видання

Я. М. ФОГЕЛЬ

Фізик. Вчитель. Людина.

Бібліографічний покажчик

Укладачі:

АЗАРЕНКОВ Микола Олексійович

БОБКОВ Валентин Васильович

ГРИЦИНА Валентина Валентинівна

СЛАБОСПИЦЬКИЙ Ростислав Павлович

Російською та англійською мовами

В авторській редакції

Підп. до друку 19.07.2010. Формат 60х84 1/16. Папір офісний.

Друк – офсет. Гарнітура Times. Ум. друк. арк. 17,9.

Наклад 300 прим. Зам. № 6. Ціна договірна.

Видавець та виготовлювач ТОВ «Видавництво «Підручник НТУ «ХП».

Свідectво про державну реєстрацію ДК № 3656 від 24.12.2009 р.

61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.