

УДК 534.6.08

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ МЕДЛЕННЫХ ПОТОКОВ ЖИДКОСТИ

Е.А. Баранник, В.А. Волохов*, С.А. Гирнык, А.И. Марусенко*, В.В. Товстяк

Харьковский национальный университет, физико-технический факультет, 61108, г. Харьков, пр. Курчатова, 31
*ОАО Научно-исследовательский институт радиотехнических измерений, 61115, г. Харьков, пр. Ак. Павлова, 117

E-mail: girnyk@pht.univer.kharkov.ua

Поступила в редакцию 14 Августа 2000 г.

Разработан ультразвуковой доплеровский метод измерения скорости потока жидкости, использующий автокорреляционную обработку выборок последовательно принятых эхосигналов из заданного измерительного объема. Определены скорости потоков с объемным расходом 100-500 мл/мин в прямой тонкостенной трубке диаметром 12 мм с точностью не хуже 2%. Предельная чувствительность разработанного метода измерения скорости потока не более 0.2 мм/сек.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ультразвук, скорость потока, автокорреляционная функция.

Прецизионное определение скорости потока крови в кровеносных сосудах позволяет делать клинические заключения о кровоснабжении интересующих областей тканей [1-2]. Оценка характеристик традиционно проводится с использованием доплеровских ультразвуковых методов. Импульсные доплеровские приборы медицинской диагностики, обладающие разрешением по глубине, применяются в устройствах визуализации, которые позволяют формировать изображения потоков крови в сосудах. Они используются не только для селекции сосудов, но и для построения профиля скоростей, распределения скорости потоков крови в поперечном сечении сосудов. Для получения характеристик потоков в сосудах малого диаметра и, особенно, тканях необходима разработка методов, обеспечивающих высокую точность измерения медленных потоков.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Используемый в данной работе экспериментальный стенд для калибровки экспериментальной установки, предназначенной для измерения скоростей потоков жидкости, был подробно описан в предыдущей статье [3]. Функциональная схема экспериментальной установки для измерения скорости потоков жидкости содержит все блоки характерные для ультразвукового исследования среды доплеровскими методами. Разработанная ультразвуковая экспериментальная установка позволяет проводить зондирование исследуемой среды импульсными ультразвуковыми (УЗ) сигналами с несущими частотами 3.5, 5.0, 7.5 МГц. Принятые эхосигналы используются для формирования изображения исследуемой среды в реальном времени в общепринятых «В» - и «М» - режимах и дополнительно проводятся вычисления спектра доплеровских частот и средней доплеровской частоты эхосигнала в общепринятом «D» - режиме. Кроме того, введена дополнительная функция вычисления скорости движения среды в специальном режиме с программной обработкой эхосигнала и использованием алгоритма обработки, чувствительного к фазе принятого сигнала.

Системная тактовая частота $F_t = 30$ МГц формируется блоком аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и предназначена для синхронизации работы других блоков. Зондирование среды осуществляется в импульсном режиме излучением последовательности коротких импульсов с частотой F_{pf} (частота зондирования) с помощью ультразвукового механического секторного датчика, который формирует фокусированный УЗ зондирующий импульс на одной из основных частот. Выборка отраженного эхосигнала из интересующей области осуществляется стробированием сигнала на выходе приемника с помощью коротких импульсов, задержанных на время распространения сигнала до точки среды и обратно. Период зондирования T_{pf} в случае одномерных «М» - или «D» - режимов формируется блоком управления (СУ) путем деления частоты F_t . Принятый эхосигнал поступает на вход блока приемо-передающего устройства (ППУ), где происходит аналоговая фильтрация с полосой пропускания 1 - 12 МГц и усиление эхосигнала. Усиление эхосигнала изменяется с глубиной для компенсации затухания ультразвука в исследуемой среде. Сигнал, управляющий усилением, поступает на ППУ с блока АРУ (автоматической регулировки усиления). С выхода ППУ усиленный эхо сигнал поступает на вход блока АЦП. Блок АЦП осуществляет аналого-цифровое преобразование поступающего эхосигнала с тактовой частотой F_t . Разрядность выходной шины определяется разрядностью примененного АЦП AD9042 фирмы Analog Devices.

Цифровой 12-разрядный эхосигнал в сопровождении тактовой частоты F_t поступает в блок цифрового приемного устройства (ЦПРУ), который осуществляет преобразование частоты и низкочастотную фильтрацию цифрового сигнала. В квадратурном смесителе осуществляется умножение входного сигнала на комплексный сигнал цифрового гетеродина. Частота гетеродина выбирается приблизительно равной центральной частоте принятого эхосигнала. Квадратурные составляющие сигнала с выхода квадратурного смесителя поступают на принятые эхосигнала. Квадратурные составляющие сигнала с выхода квадратурного смесителя поступают на принятые эхосигнала. Цифровые фильтры нижних частот с частотами среза по уровню -6дБ: 1.0, 1.4, 2.0 МГц (для частот УЗП 3.5, 5.0,

7.5 МГц соответственно), которые выделяют комплексную огибающую эхосигнала. С выходов фильтров значения комплексной огибающей эхосигнала по 16 - разрядной шине данных поступают в блок ВАРУ и блок цифрового конвертора «М» - и «Д» - изображения (ЦКИ-МЦД) для считывания и регистрации.

В блоке ЦПРУ выборки комплексных значений огибающей эхосигнала проходят дополнительную обработку. Эти сигналы поступают на вход преобразователя, где квадратурные составляющие преобразуются по формуле: $I_g (Re + Im)$, где «Re» и «Im» – значения реальной и мнимой частей комплексной огибающей. Полученные значения амплитуды огибающей эхосигнала суммируются с кодом усиления и подаются на запоминающее устройство (ПЗУ) контраста и гамма коррекции, осуществляющее преобразование динамического диапазона 72дБ в следующий ряд: 60, 55, 50, 45, 40, 35, 30 и 25дБ с различными формами кривых гамма коррекции. Полученные данные используются для формирования изображения в «В» - и «М» - режимах соответственно.

В режиме измерения смещений среды в блоке ЦКИ-МЦД производится суммирование измеренных значений комплексной огибающей эхосигнала, попадающих в строб измерительного объема и запись суммарного комплексного отсчета в буферное ОЗУ. При накоплении в ОЗУ массива значений одного комбинационного периода, центральный процессор производит считывание этого массива и обработку его по специальным алгоритмам. При этом вычисленные значения смещений отражателей среды отображаются на экране монитора, в то время как в ОЗУ записываются значения выборок сигнала нового массива и т.д.

В «В» - режиме в ОЗУ 1,2 блока ЦКИ-МЦД осуществляется регистрация значений комплексной огибающей эхосигнала в объеме одного кадра (128 лучей по 512 точек). В режиме FREEZE (стоп - кадр) последний из записанных в ЦКИ-МЦД кадров считывается центральным процессором в память для программной обработки и визуализации и сравнения его с изображением «В» – кадра, сформированного стандартной аппаратной обработкой в блоке ЦПРУ. Значения амплитуды комплексной огибающей эхосигнала поступают в блок ЦКИ МЦД по 16-разрядной шине.

Блок цифрового конвертора изображения «В» - режима (ЦКИВ) осуществляет прием значений амплитуды огибающей эхосигнала. Эти данные интерполируются и после преобразования координат записываются (в объеме одного кадра) в буферные ОЗУ, которые читаются центральным процессором через интерфейсный блок IOS/PCI с помощью управляющих сигналов.

Управление блоками во всех режимах осуществляется через блок IOS/PCI по последовательному каналу и по двухпроводному каналу микроконтроллера с помощью программного обеспечения или с пульта управления.

Измерения скорости потоков жидкости проводились в следующей последовательности. В «В» - режиме получали изображение модели сосуда диаметром 12 мм с протекающей жидкостью. С помощью прецизионного механического поворотного узла ультразвукового стенда устанавливали угол θ между осью пучка волн ультразвукового преобразователя и осью модели сосуда. Точность установления угла между осью пучка и сосуда составляла 0.1 градуса. Для получения значений проекции скорости потока на ось ультразвукового преобразователя порядка нескольких миллиметров в секунду, значение угла θ выбирали в пределах 0 – 2 градуса. Далее, по изображению на экране монитора, программно выбирали расположение измерительного объема на оси сосуда и его протяженность. Значение величины расхода жидкости определялись независимо путем измерения объема жидкости, протекающей по сосуду за определенное время. По полученному значению величины расхода рассчитывалась скорость потока жидкости на оси сосуда для ламинарного потока и ее проекция на ось ультразвукового преобразователя. Точность измерения средней скорости стационарного потока была не хуже 2% [3].

Измерение скорости потока жидкости проводили с помощью специальных алгоритмов обработки доплеровских эхосигналов полученных из измерительного объема и сравнивали ее со значением скорости потока жидкости на оси сосуда, рассчитанной по измерению расхода жидкости.

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ЭХОСИГНАЛА

Интересующей нас характеристикой сигнала является скорость отражателей в измерительном объеме протекающей жидкости. Программное обеспечение установки позволяет делать выбор между несколькими способами анализа сигнала. Первый использует алгоритм быстрого преобразования Фурье, и обеспечивает построение спектра частот в диапазоне $-F/2$ до $+F/2$. При спектральном анализе в спектре выделяются постоянная составляющая и две гармонические составляющие с частотами $W_{\text{н}}$ - $W_{\text{п}}$. Для дальнейшей обработки используются составляющие 0, $W_{\text{н}}$ - $W_{\text{п}}$, но так как сетка опорных частот определена частотой F формирования выборок сигнала, (кратного степени числа 2), то вместо этих составляющих можно использовать ближайшие из сетки опорных частот. Другой способ заключается в дискретном преобразовании Фурье только для трех заданных частот – 0, $W_{\text{н}}$ - $W_{\text{п}}$. Он является лучшим по помехоустойчивости, кроме того, позволяет формировать оценку еще одного информационного параметра – фазового сдвига движения среды. В автокорреляционном способе обработки на выходе цифрового приемника имеется последовательность выборок комплексного сигнала $U(i)=U(t_i)$ с известным периодом оцениваемого параметра сигнала – доплеровского сдвига частоты $F_d(t)$. Период функции $F_d(t)$ равен $T_{\text{п}}=NT_{\text{рф}}$, что обусловлено соотношением периода выборок сигнала и периода

набора данных в ОЗУ. На каждом периоде обработки T_n вычисляется $R \times N$ первичных оценок комплексного коэффициента автокорреляции для временного сдвига, равного T_{prf} :

$$K(0) = \sum_{i=b}^{b+d+1} U(i) \cdot U(i-1)$$

$$K(r) = \sum_{i=b+r \cdot d}^{b+(r+1) \cdot d-1} U(i) \cdot U(i-1) \quad (1)$$

$$K(R-1) = \sum_{i=b+(R-1) \cdot d}^{b+N-1} U(i) \cdot U(i-1),$$

где b – произвольный номер начального отсчета, $d = 1$ при $R = N$ и $d = 1$ при $R < N$.

Для снижения влияния шумовых флуктуаций результатов проводится фильтрация первичных оценок коэффициента корреляции по многим периодам T_n . Эти вычисления осуществляются сигнальным процессором в режиме реального времени – со скоростью поступления входных данных. Сигнальный процессор далее вычисляет аргументы комплексного коэффициента автокорреляции. Найденные оценки передаются в центральный процессор, вычисляющий доплеровские сдвиги частоты. Аналогичным образом установка позволяет проводить вычисление фазового сдвига сигнала по последовательным выборкам, и по его оценке проводить вычисление значений смещений отражателей в измерительном объеме и, следовательно, скорость движения среды. В данной работе использовали алгоритм вычисления фазового сдвига сигнала по элементам массива входных данных.

Программное обеспечение установки позволяет изменять величину выборки сигнала, передаваемого для последующей обработки. Кроме того, для повышения точности измерений, позволяет проводить усреднение полученных значений смещения отражателей вплоть до 999 реализаций. На экран монитора выводятся текущие значения квадратурной и синфазной составляющих сигнала, а также текущие и усредненные значения смещений отражателей в координатах смещение (микрометры) – время (микросекунды). Значение скорости определяется численно по углу наклона полученной зависимости.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения наилучших режимов обработки сигнала варьировали значение N элементов выборки, количество усреднений, скорость движения жидкости. Полученные результаты для разных значений этих параметров представлены на рис.1-4. Для контроля шумового фона установки проводились контрольные измерения в отсутствии потоков в сосуде. Полученные значения погрешности имели значение менее 0.09 мм/сек для выборки из 16 точек и менее 0.04 мм/сек для выборки из 128 точек. На рис.1 приведен фрагмент копии экрана рабочей программы полученный во время измерения шумового фона, усредненного по 31 выборке из массива 128 точек. По оси Y – смещение (микрометры), по оси X – время (миллисекунды).

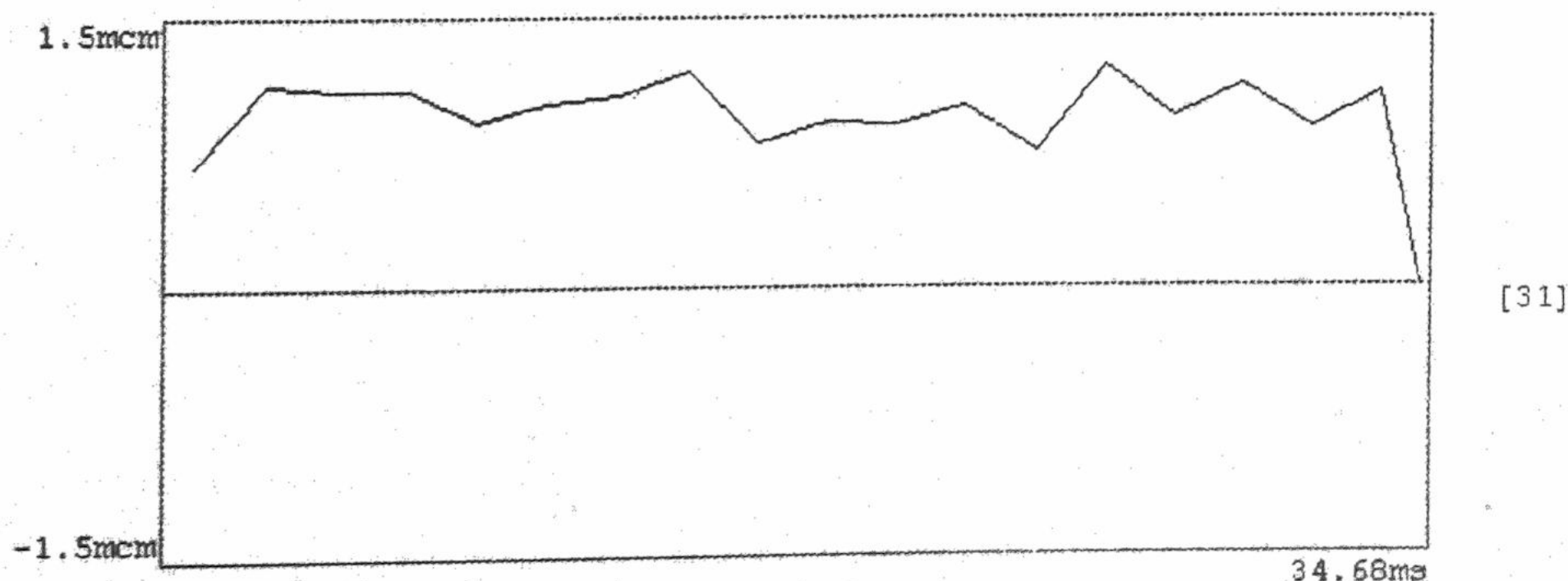


Рис.1. Уровень шумового фона измерительного канала в отсутствии потока жидкости в трубке.

На рис.2. приведен график величины смещений от времени для массива $N = 71$, усредненного по 99 измерениям. Среднее значение скорости 0.807 мм/сек , истинное значение скорости потока в трубке, по контрольным измерениям – 0.8 мм/сек . На рис.3. для массива $N = 71$, усредненного по 99 измерениям. Измеренное значение скорости на оси сосуда 2.24 мм/сек , значение, полученное по результатам контрольных измерений – 2.22 мм/сек .

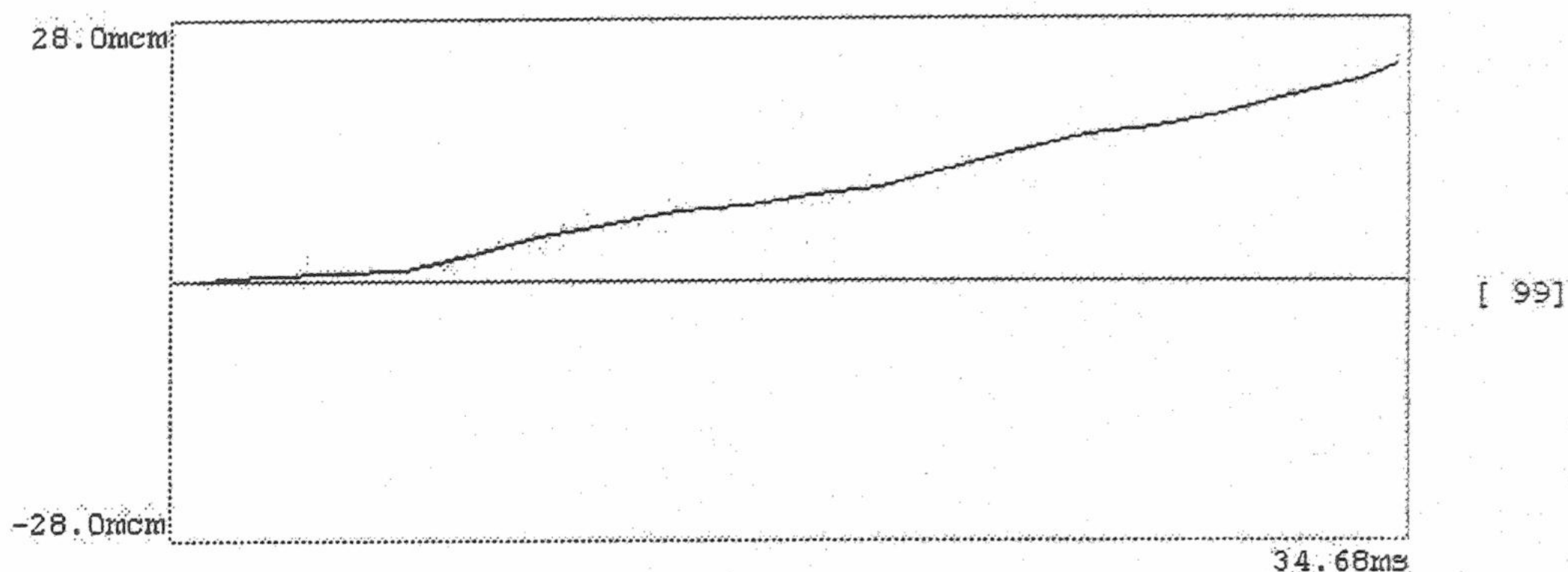


Рис.2. Зависимость смещений отражателей в потоке от времени для выборки $N = 71$, число усреднений – 99.

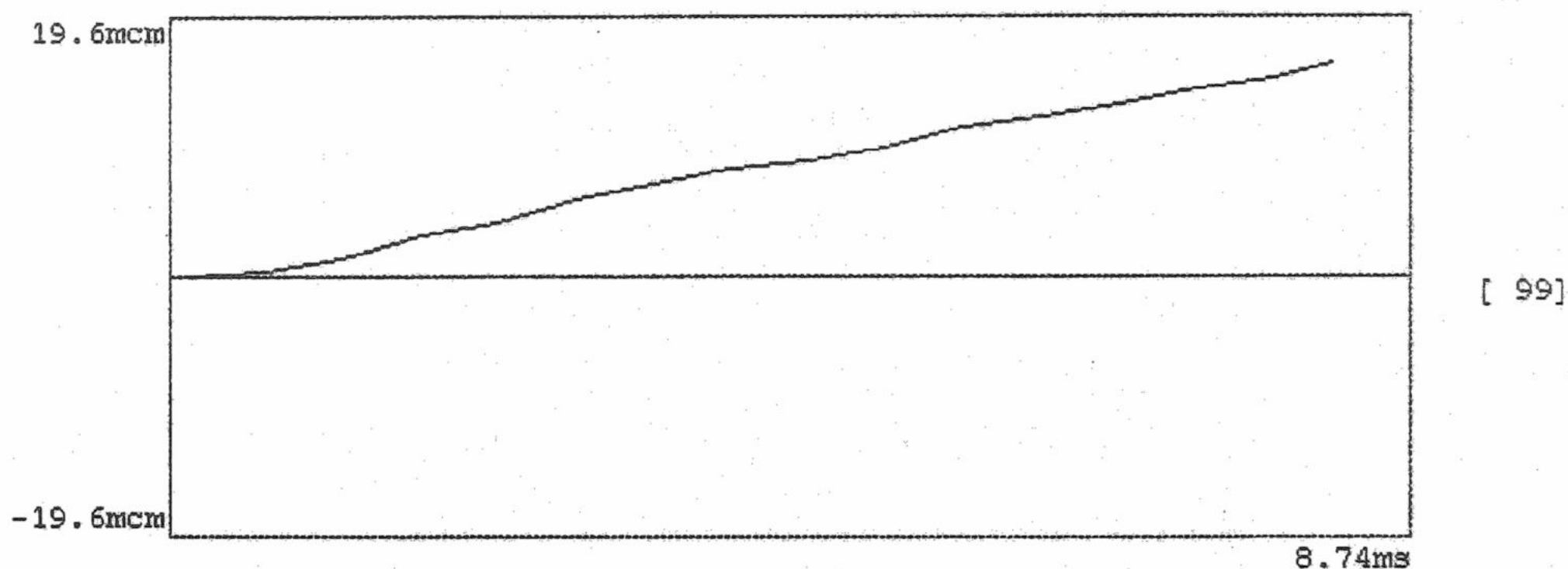


Рис.3. Зависимость смещений отражателей в потоке во времени для выборки $N = 32$, число усреднений – 99.

Для всех проведенных серий экспериментов частота выборок сигнала составляла $T_{\text{pf}} = 3.66 \text{ КГц}$. Следует отметить, что для относительно быстрых ламинарных потоков со скоростью движения более 5 мм/сек , наилучшие по точности значения скорости потоков были получены для относительно небольших по количеству значений выборок сигнала $N=8, 16, 32$ значений. Для относительно медленных потоков, со скоростью менее 1 мм/сек , наилучшие по точности значения скорости при небольшом количестве усреднений сигнала получали при значении $N = 64, 128$ и более. Такая зависимость точности измерений от величины выборки сигнала связана с алгоритмом обработки сигналов, чувствительным к фазе полученных доплеровских сигналов. Для большого объема выборки сигнала в случае относительно быстрых потоков из-за малой величины измерительного объема отражатели, находящиеся в измерительном объеме, успевают за время измерения пересечь весь измерительный объем и смениться другими. По этой причине сигнал от новой группы отражателей имеет другие фазовые характеристики, в принципе, сильно отличающиеся от характеристик предыдущей группы. В этом случае эффективность применяемой процедуры усреднения оказывается ниже, чем для случая медленных потоков, для которых группа отражателей за время выборки не успевает выйти за пределы измерительного объема и, соответственно изменение фазовых характеристик сигнала для разных выборок имеет плавный характер.

Все приведенные значения скорости соответствуют проекции вектора скорости движения частиц среды на направление оси ультразвукового пучка, от которого получен доплеровский сигнал.

Приведенные данные показывают, что данная методика дает существенно лучшие значения по пороговой чувствительности по сравнению с традиционными доплеровскими методами измерения скорости движения потоков.

Данная работа выполнена при поддержке УНТЦ (проект # 865).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Paul M. Embree, William D. O'Brien. Volumetric Blood Flow via Time-Domain Correlation. /IEEE Trans.Ultrason. Ferroelec.and Freq. Contr. 1990, V.57, №3, p. 176-189.
2. R.W.Gill. Measurement of blood flow by ultrasound; accuracy and source of error. /Ultrasound in Med. and Biology, 1985, V. 11, p. 625-641.
3. Е.А. Баранник, С.А. Гирнык, Н.Г. Стервиедов, В.В. Товстяк. Акустическая установка для калибровки измерений скорости потоков жидкости доплеровскими методами. Вісник Харківського університету. Серія «Ядра частинки поля». 1999, вип.4. № 463. с.74-78.

METHOD OF MEASUREMENT OF SLOW FLOW SPEED OF A LIQUID

E.A. Barannik, V.A. Volokhov*, S.A. Girnyk, A.I. Marusenko*, V.V. Tovstiak

The Kharkiv National University, physical-technical department, 61108, Kharkiv, Kurchatov av., 31

**JSC Research and development institute of radio engineering measurements, 61115, Kharkiv, Academic Pavlov av., 117*

E-mail: girnyk@pht.univer.kharkov.ua

The ultrasonic Doppler method of measurement of slow flow speed of a liquid using auto correlation processing sampling consistently accepted echo signal from given measuring volume was developed. The speeds of flows with the volumetric charge 100-500 ml/min in a straight-line thin-walled pipe by a diameter of 12 mm were determined with accuracy not worse than 2 %. Limiting sensitivity of definition of speed of a stationary flow of a liquid are less than 0.2 mm/s.

KEY WORDS: ultrasound, flow velocity, autocorrelation function.

УДК 621.039 + 532.528

АКУСТИЧЕСКИЕ ШУМЫ ОТ РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННОЙ КАВИТАЦИИ

С.И.Иванов

Харьковский национальный университет, пл. Свободы, 4, Харьков, 61077, Украина
Поступила в редакцию 12 июня 2000г.

При образовании в облучаемых жидкостях газовых микрополостей от локального энерговыделения отдельных ионизирующих частиц, либо от быстрых сопутствующих термоупругих напряжений, понижается их энергетический порог кавитации. Выявить это изменение возможно создавая в жидкости растягивающие усилия, например в цилиндрическом концентраторе ультразвуковых волн, работающем на радиальной моде колебаний. Используя этот метод, были измерены, в указанной геометрии опыта, частотные зависимости порога кавитации для трех видов воды: дистиллированной, артезианской и воды с растворенными радионуклидами. Исследован спектр кавитационных шумов в этих случаях. Показано существенное понижение порога кавитации в воде с растворами солей Sr-90 и Cs-137, активностью 10 Бк/л и 62 Бк/л, соответственно. Оценен порог чувствительности радиационно-кавитационного метода для определения концентрации солей растворенных делящихся радионуклидов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: радиационная акустика, ионизирующее излучение, ультразвуковые волны, кавитация.

Облучение конденсированных сред ионизирующим излучением приводит к возникновению двух типов термоупругих напряжений: быстрых (БН), от термических пиков в треках частиц, и медленных (МН), от всей облучаемой зоны. Возбуждаемые от БН ультразвуковые волны гиперзвуковых частот не могут вынести информацию из зоны облучения, вследствие больших интерференционных и релаксационных поглощений, т.е. являются короткопробежными. Что же касается волн МН, то они, хоть и имеют гораздо меньшую начальную амплитуду, могут быть легко зарегистрированы вдали от нагретой зоны. Поэтому экспериментально изучались, как более доступные, ультразвуковые волны от МН, несущие информацию об усредненных термодинамических постоянных материала мишени, коллективных параметрах излучения и геометрических размерах зоны облучения [1].

Высокочастотные термоупругие напряжения БН и первичный радиационный удар создают в мишени особые условия, которые в некоторых случаях приводят к высвобождению части ее внутренней упругой энергии, например, акустическое сверхизлучение из облучаемых сегнетоэлектриков в деполяризующем электрическом поле [2], и радиационно-стимулированная акустическая эмиссия из механически напряженных металлов [3].

Подобный эффект – возникновение синхронных радиационно инициированных акустических шумов – возможно наблюдать и в жидкостях, от образования в зоне радиационного облучения газовых микрополостей. Как показали наши оценки [4], для этого хватит энергии радиационного распада большинства радионуклидов. Так что достаточно небольших дополнительных растягивающих усилий, чтобы в облучаемой жидкости выявить порог кавитации и наблюдать возникающий от нее шумовой спектр.

Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению относительного порога кавитации воды из скважины промплощадки ЧАЭС, содержащей растворенные радионуклиды Cs-137 и Sr-90, наблюдению спектра шумов радиационно-стимулированной кавитации, и теоретической оценке концентрации растворенных делящихся радионуклидов, поддающейся определению радиационно-кавитационным методом.

1. В экспериментах использовались следующие блоки аппаратуры: кавитатор, представляющий собой кювету-концентратор ультразвуковых волн с пьезоизлучателем. Генератор синусоидальных электрических колебаний с выходной разностью потенциалов U , возбуждающий пьезоизлучатель. Широкополосный гидрофон ($\Delta f \sim 10^6$ Гц), стандартно расположенный в объеме кавитатора. Приемный тракт, обрабатывающий сигналы с гидрофона и состоящий из предусилителя, осциллографа, либо анализатора частотного спектра. В опытах использовались три типа жидкостей: вода из артезианской скважины, дистиллированная вода и вода из скважины Чернобыльской зоны отчуждения, содержащая радионуклиды Cs-137 и Sr-90 с удельными активностями 62 Бк/л и 10 Бк/л, соответственно. Предварительно все пробы воды тщательно фильтровались от взвешенных частиц через керамические фильтрующие перегородки. В измерениях контролировался порог возникновения кавитации, определяемый по изменению линейности электрического сигнала с гидрофона от величины U , либо по возникновению шумов кавитации, регистрируемых с гидрофона анализатором спектра. При этом собственные частоты генератора, и кратные им, из частотного спектра удалялись. Погрешность измерений не превышала 10%.

На рис.1. приведен типичный частотный спектр регистрируемых шумов кавитации. Этот спектр практически не изменялся для различных типов жидкостей и занимал весь рабочий частотный диапазон

гидрофона. Это указывает на подобие ансамбля микроизлучателей, возбуждаемых кавитацией, для всех измеряемых проб. Наблюдаемые в экспериментах незначительные изменения амплитуды гармоник спектра характеризуют изменение количества возникающих микроизлучателей. На рис.2. приведены частотные зависимости напряжения генератора $U(f)$, соответствующего порогу кавитации исследуемых водных проб. Как видно, все кривые имеют минимум, определяющий уровень наибольшего облегчения кавитации, что позволяет по этому параметру проводить как сравнительный анализ результатов, так и абсолютные измерения. Частоты минимальных значений всех трех кривых приблизительно совпадают, а пороги кавитации –

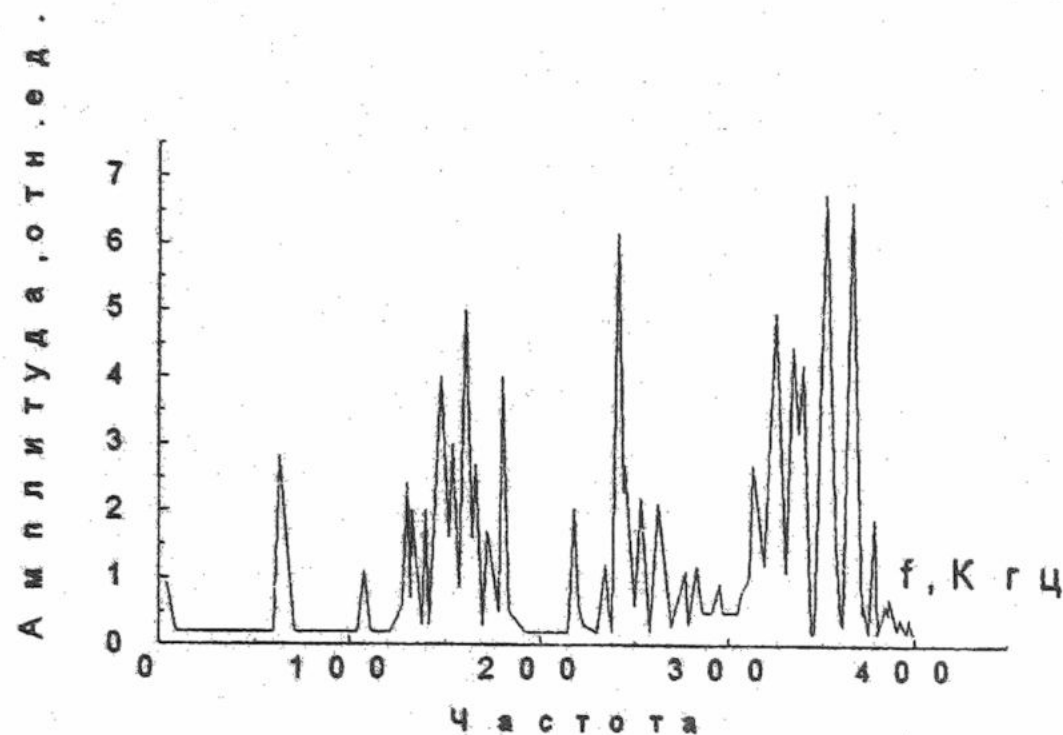


Рис.1. Спектр кавитационных шумов в диапазоне частот 0 – 400 КГц.

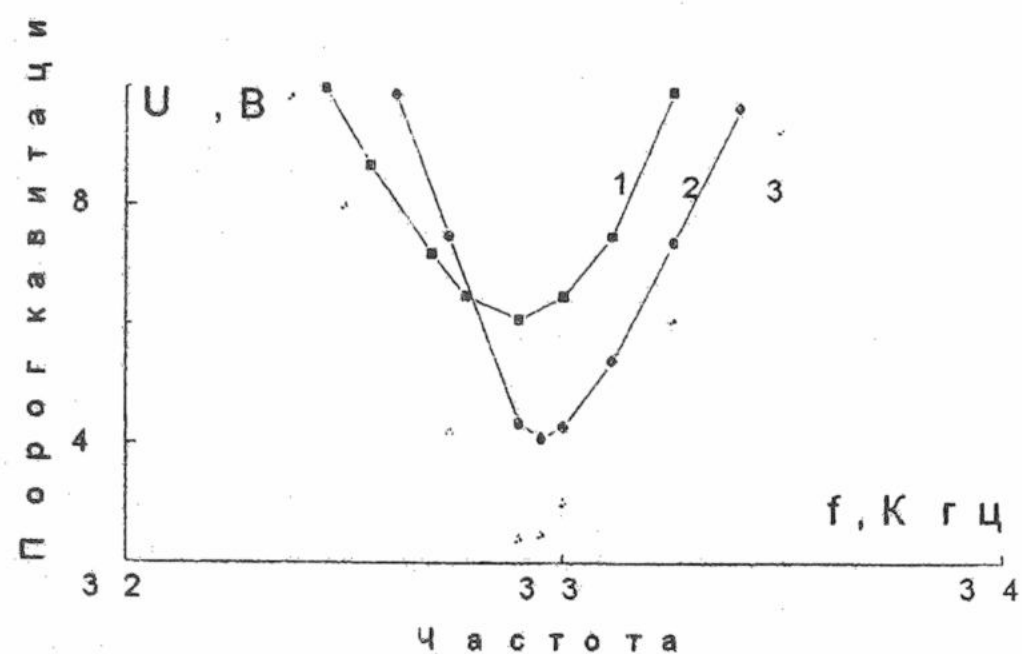
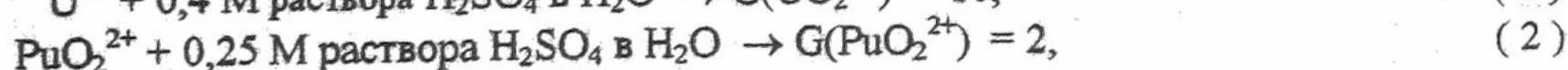
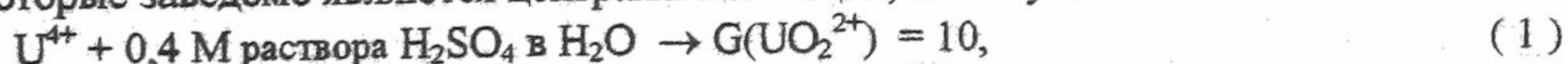


Рис.2. Частотная зависимость порога кавитации для трех типов проб: 1 - дистиллированная вода, 2 - артезианская вода, 3 - вода с растворенными радионуклидами ^{137}Cs и ^{90}Sr .

существенно различны. Причем минимальное значение U характерно для проб с растворенными радионуклидами, а максимальное – с дистиллированной водой. Это согласуется с приведенным выше представлением, что облегчение кавитации – радиационно-индуцированный эффект, проявляющийся ультразвуковым полем пьезоизлучателя, практически, без термического воздействия. Стационарный характер облучения и значительное ослабление порога кавитации в минимуме кривой 3 указывает на влияние либо БН, либо порождающих их радиационных треков ионизирующих частиц на радиационно – кавитационный эффект. Малое значение U в минимуме кривой 2 возможно связано с эффектом “памяти” артезианской воды на радиационное воздействие. Следует заметить, что измерения предварительно, в течение 10 часов, облученных, проб дистиллированной воды рентгеновским излучением от рентгеновского аппарата Мира-2Д (максимальная энергия в спектре рентгеновского излучения 180 КэВ), не внесло существенных отличий в ход кривой 1. Т.е. эффекта памяти на облучение при таких условиях мы не наблюдали, видно, энергии рентгеновских фотонов не достаточно, чтобы образовать и накопить долгоживущие деструктурированные зоны в объеме жидкости – центры кавитации.

2. Ионизирующее излучение, в особенности осколки деления, вызывают химические процессы, связанные с выпадением в жидкости взвешенных микрочастиц [5]. Эти частицы могут играть роль центров кавитации и, в зависимости от концентрации этих частиц, т.е. концентрации делящихся радионуклидов, будет меняться кавитационный спектр шумов, а минимальный уровень порога кавитации будет характеризовать минимальную концентрацию делящихся радионуклидов, определяемую в жидкости радиационно-кавитационным методом. Используя результаты радиационно-химического анализа [5] по определению выхода индуцированных химических выпадений, которые заведомо являются центрами кавитации, из облучаемых систем:



получаем радиационно-химический выход G , численно равный числу центров кавитации, образующихся на единицу энергии (100 эВ) ионизации, поглощенной в облучаемом растворе. Зададим чувствительность Ψ , как кратность превышения образующихся в единице объема центров кавитации N , за счет радиационно-химического выхода G продуктов реакции, над кавитационными центрами N_m , дающих минимально значимое изменение уровня сигнала над ультразвуковым фоном, регистрируемым электронной аппаратурой:

$$\Psi = N/N_m = kGN_m^{-1}D(t)f(t). \quad (3)$$

При этом пороговое значение мощности поглощенной дозы $D(t) = D_{\min}(t)$, соответствующее $\Psi(1) = 1$:

$$D_{\min}(t) = N_m \Psi(1) [k G f(t)]^{-1}. \quad (4)$$

Здесь k – коэффициент качества излучения, $f(t)$ – функция времени облучения, определяющая изменение $G(t)$. Принимая для случая не цепной реакции $G = 6 \cdot 10^{17}$ Дж⁻¹ [5], время облучения $t = 1$ с, для которого, в общем случае, функцию $f(t)$ можно считать равной t , задавая N_m для керамического пьезоприемника $\sim 10^7$ м⁻³ и считая $k = 10^{-2}$, получим $D_{\min} = 1,6 \cdot 10^{-9}$ Дж·м⁻³·с⁻¹. Т.е., начиная с величин поглощенной в единице объема исследуемого раствора энергии ионизирующего излучения 10^4 эВ за 1с, возможно проведение контроля и измерений концентрации растворенного радиоактивного делящегося вещества.

Определим уровень минимальной концентрации урана в растворе по системе (1), энергия ионизации от индуцированного деления которого дает значимое изменение порога кавитации, определяемого в (4). За время облучения 1с в единице объема облучаемого раствора произойдет n актов деления:

$$n = \sigma_f(E) \phi_0 N_U = \sigma_f(E) c N_A \phi_0 A^{-1}, \quad (5)$$

где $\sigma_f(E)$ – микроскопическое сечение деления, c – концентрация урана в растворе, N_A – число Авогадро, A – массовое число ядра, ϕ_0 – плотность потока нейтронного источника. Учитывая, что основное радиационное воздействие на облучаемый раствор оказывают образующиеся при расщеплении ядра осколки деления, считаем поглощенное энергосодержание ΔE , идущее на ионизацию единицы объема раствора за 1с и производящее радиационно-химические превращения:

$$\Delta E = n \varepsilon \xi = \phi_0 \varepsilon \xi \sigma_f(E) c N_A A^{-1}, \quad (6)$$

где: ε – энергия, выделяемая в акте деления, ξ – доля энергии, уносимая осколками деления. Полагая $\Delta E = D_{\min}$ (приравнявая (5) и (7)), получим минимальное значение концентрации урана $C_{\min}$, определяемое радиационно-кавитационным методом при индуцированном делении ядер растворенного урана с образованием зародышей кавитации на центрах выпадения UO_2^{2+} в реакции по системе (1):

$$C_{\min} \approx A [N_A^{-1} \phi_0 \varepsilon \xi \sigma_f(E)]^{-1} D_{\min} = A N_m \Psi(1) [k N_A \phi_0 \varepsilon \xi G \sigma_f(E) f(t)]^{-1}. \quad (7)$$

Используя ранее приведенные значения и считая $\varepsilon \xi = 167$ МэВ, $\sigma_f(E=0,025 \text{ эВ}) = 580$ барн, принимая $\phi_0 = 10^3$ н.см⁻²·с⁻¹, получаем величину $C_{\min} \approx 4 \cdot 10^{-5}$ кг·м⁻³. Аналогичная величина, оцененная для плутония при рассмотрении системы (2), $C_{\min} \approx 1,53 \cdot 10^{-4}$ кг·м⁻³.

Таким образом, радиационно-кавитационным методом возможно контролировать содержание радионуклидов в жидких растворах, а дальнейшее изучение особенностей метода, в зависимости от характера протекающих ядерных реакций и химических выпадений, позволит использовать радиационно-кавитационный метод в технологическом радиационном контроле атомных станций и других радиационных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Залюбовский И.И., Калиниченко И.И., Лазурик В.Т. Введение в радиационную акустику. – Харьков: «Вища школа», 1986, с.168.
2. Воловик В.Д., Иванов С.И. Письма ЖТФ, т.1, вып.22, 1975, С.1037.
3. Воловик В.Д., Иванов С.И., Стервеедов Н.Г. Акустическая эмиссия из закаленных металлов при электронном облучении. Тезисы докладов конференции по акустической эмиссии, Кишинев, 1987, с.42.
4. Иванов С.И., Каминский А.Т., Шостак В.Б. Радиационно стимулированная кавитация в контроле радиационного заражения жидкостей. Тезисы докладов научной конференции «9 лет после Чернобыльской аварии». Киев, 1995, с.13.
5. Краткий курс радиохимии. Под ред. Николаева А.В. – М: «Высшая школа», 1989, с.335.

THE ACOUSTIC NOISES FROM RADIATION-INDUCED CAVITATION

S.I.Ivanov

Kharkiv National University, Svoboda sq., 4, Kharkiv, 61077, Ukraine

The energetic threshold of cavitation falls down by gas microcavities, or fast thermoelastic stresses. This change is revealed with tension in ultrasonic waves of cylinder ferroelectric concentrator. The frequency dependences of the threshold of cavitation was measured in distilat, artesian water and water with radionuclides Sr-90 and Cs-137, activity 10 Bq/l and 62 Bq/l. Threshold of sensibility for fission radionuclides was calculated for radiation-induced cavitation method.

KEY WORDS: radiation acoustic, ionizing radiation, ultrasonic waves, cavitation

УДК 537.611:620.179.16:631.38

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

С.Н.Стервоедов

Харьковский национальный университет, 310077, Харьков, пл. Свободы, 4.

E-mail: sterv@pht.univer.kharkov.ua

Поступила в редакцию 5 июня 2000 г.

В данной статье представлены результаты разработки экспериментального оборудования для исследования акустической эмиссии при ионной имплантации в неполупроводниковые материалы. Установлена зависимость интенсивности и амплитудного распределения сигналов акустической эмиссии от дозы имплантации и показана возможность создания новых устройств контроля ионного облучения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: акустическая эмиссия, ионная имплантация, радиационные дефекты, доза имплантации, амплитудное распределение сигналов, суммарная акустическая эмиссия, интенсивность акустической эмиссии

Характерным отличием ионной имплантации является большое количество радиационных дефектов в зоне имплантации, как правило, на 2-3 порядка превосходящее число имплантированных атомов [1,2]. Для изменения поверхностных свойств металлов и сплавов, концентрация введенной примеси может составлять от нескольких единиц до нескольких десятков атомных процентов, что соответствует дозам имплантации порядка $1 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{18}$ ион/см². Дефекты при этом накапливаются, образуя сложные комплексы, а в имплантируемом слое возникают механические напряжения и происходят локальные динамические перестройки внутренней структуры материала, сопровождающиеся акустической эмиссией (АЭ) [3,4]. Естественно предположить, что такие параметры, как интенсивность АЭ, суммарная АЭ и амплитудно – частотное распределение сигналов АЭ, при ионной обработке полупроводниковых материалов, могут нести информацию о кинетике образования и накопления радиационных дефектов, о вероятных изменениях свойств поверхности и ее структуры, а также, возможно, о дозе имплантации. Задача настоящей работы – создание экспериментального оборудования для изучения АЭ при имплантации ионов в диапазоне энергий 10 – 100 кэВ и плотности тока ≤ 100 мкА/см² с целью разработки новых методов контроля процесса облучения и динамики направленной модификации поверхности твердого тела.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Структурная схема экспериментальной установки приведена на рис.1.

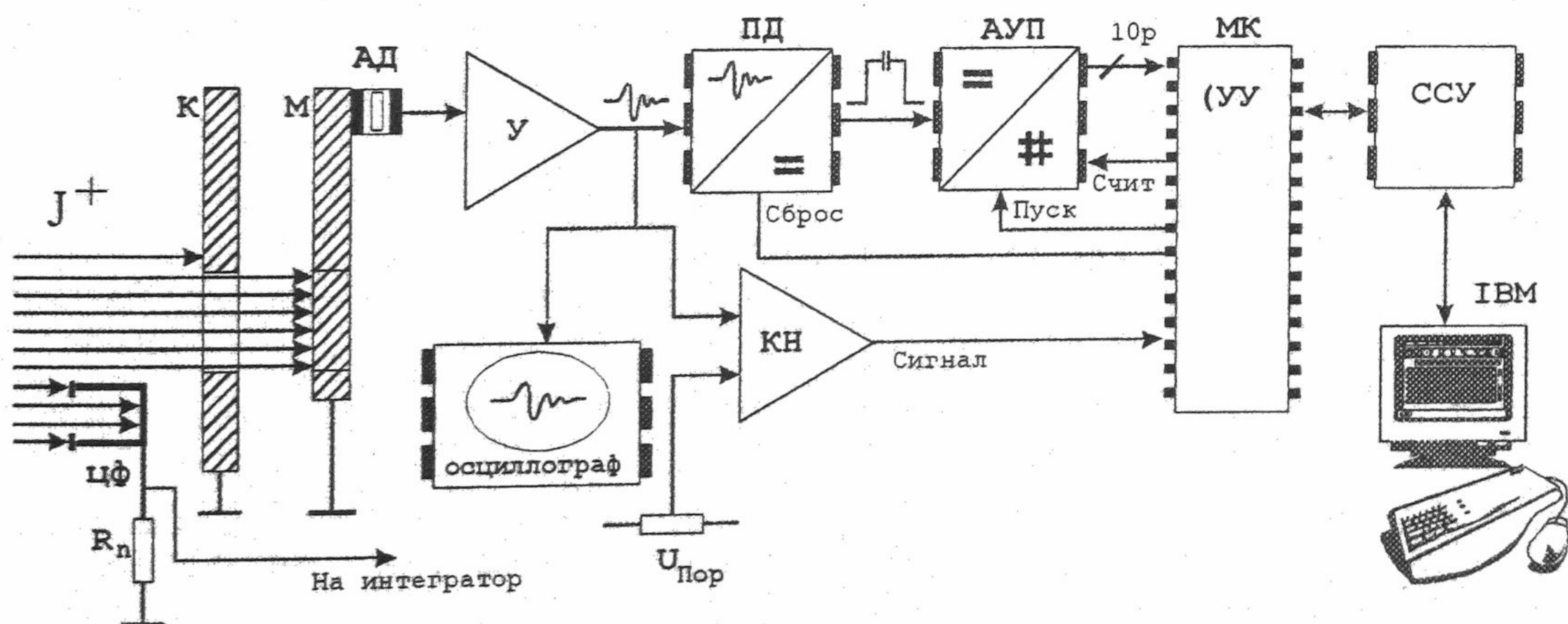


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

Исследуемый образец – мишень (М), изготовленной вместе с волноводом и закреплённым на нем пьезокерамическим преобразователем (АД) на основе пьезокерамики ЦТС – 19, помещается в

вакуумную камеру ускорителя-имплантера [6]. Регистрируемые сигналы АЭ усиливались усилителем (У) и подавались на регистрирующую часть схемы. Параллельно сигналы для наблюдения подавались на осциллограф. Регистрирующая часть схемы представляет собой аналого-цифровой процессор сигналов АЭ и состоит из пикового детектора (ПД), аналого-цифрового преобразователя (АЦП), компаратора превышения сигналом заданного опорного уровня (КН), управляющего микроконтроллера (МК), схемы согласования уровней (ССУ) и IBM – компьютера (IBM) с общим и специальным программным обеспечением. Программное обеспечение микропроцессора и компьютера совместно с электронной частью позволяют организовать аппаратно-программный амплитудный анализатор, интенсиметр и счетчик суммарной эмиссии. Размеры площади ионной обработки ограничивались коллиматором (К). Плотность тока измерялась цилиндром Фарадея (ЦФ) монитора ионного пучка [5].

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА АНАЛОГОВОГО ПРОЦЕССОРА

Для измерений в реальном масштабе времени был разработан аналого-цифровой процессор, являющийся ядром аппаратной части измерительной установки. Его принципиальная схема приведена на рис.2.

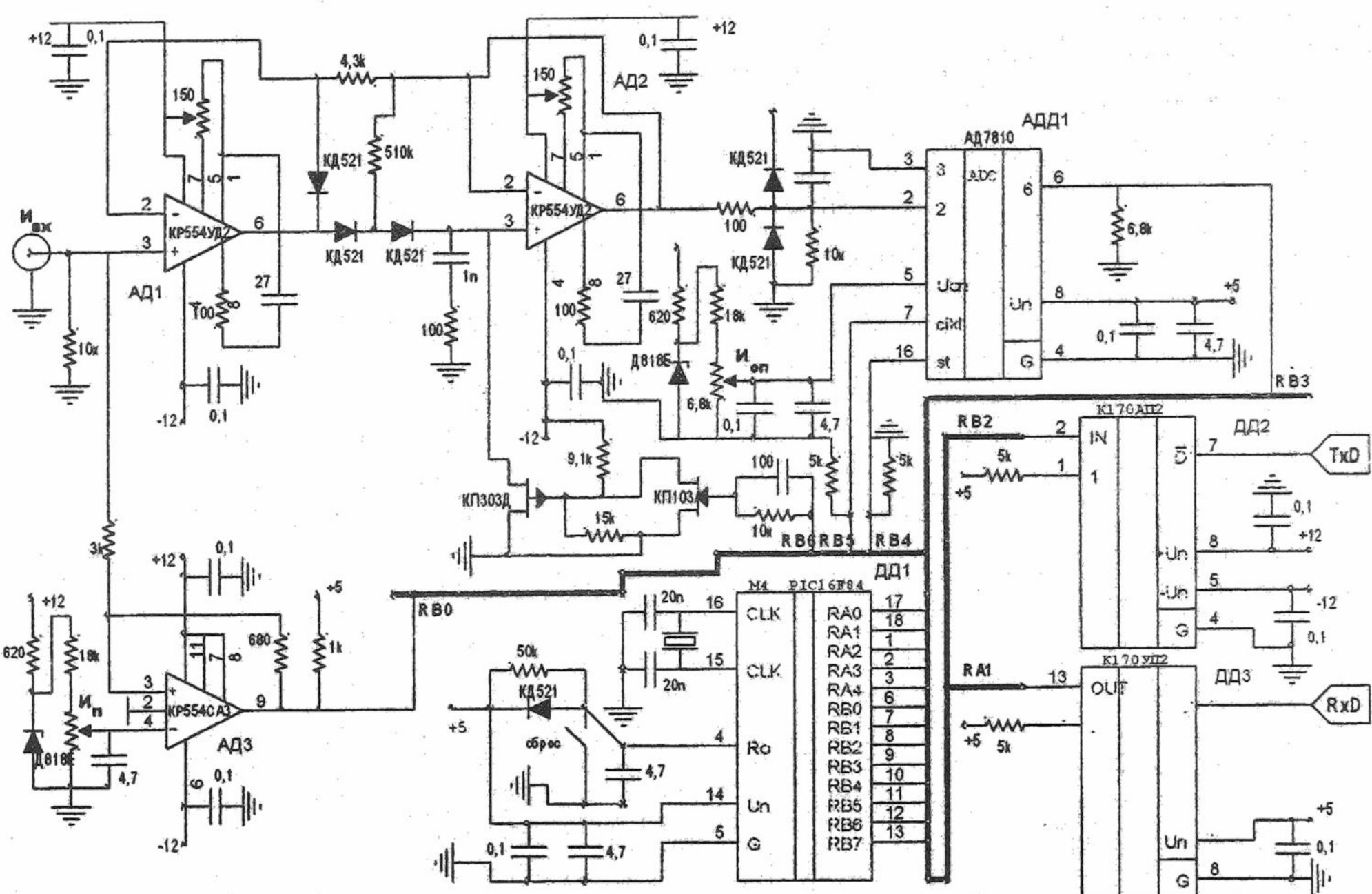


Рис.2. Принципиальная схема аналого-цифрового процессора сигналов акустической эмиссии.

Она состоит из следующих узлов:

- схемы пикового детектора на быстрых операционных усилителях АД1 и АД2 типа КР544УД2. Пиковый детектор служит для запоминания на время оцифровки амплитудного значения сигнала $U_{вх}$, поступающего с усилителя;
- 10 – разрядного аналого-цифрового преобразователя с последовательным интерфейсом АДД1 типа АД7810 фирмы Analog Device. Аналого-цифровой преобразователь необходим для быстрой оцифровки амплитудного значения входного сигнала;
- RISC – микропроцессора ДД1 PIC16F84 фирмы Microchip. Достаточно мощный и удобный микропроцессор PIC16F84 задает последовательность и логику работы устройства в целом, им также осуществляется считывание последовательных данных аналого-цифрового преобразователя и обмен информацией с компьютером в стандарте RS-232C;
- схемы синхронизации запуска преобразователя с измеряемым сигналом на компараторе напряжения АД3 типа КР554СА3. Компаратор срабатывает при превышении входным сигналом заданного уровня дискриминации;
- схемы согласования уровней TTL и RS-232C на микросхемах передатчика ДД2 К170АП2 и приёмника ДД3 К170УП2;
- Схемы ключа разряда запоминающей ёмкости C_3 и подготовки пикового детектора к приёму следующего сигнала на полевых транзисторах Т1 и Т2.

Основные характеристики аналого-цифрового процессора: диапазон входных напряжений - 25 мВ ±

2,5 В; входное сопротивление - 10 кОм; максимальная скорость нарастания входного сигнала - 0,5 мкс; число разрядов преобразования - 10; время преобразования 4 мкс; дифференциальная нелинейность $\leq 0,1\%$; порог дискриминации $20\text{ мВ} \div 0,5\text{ В}$; скорость обмена с компьютером 115200 бит/с.

Программное обеспечение всего устройства состоит из ассемблерной программы микропроцессора, вырабатывающей временные последовательности управляющих импульсов на узлы блока и осуществляющей стандартный обмен данными с компьютером и программного обеспечения (ПО) компьютера.

ПО компьютера обеспечивает приём данных от процессора, подсчет числа импульсов для определения интенсивности и суммарной АЭ, сглаживание амплитудного спектра, вычисление площадей пиков, графическое представление зависимостей.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для исследования был взят образец из карбида вольфрама, цементированного кобальтом WC-6Co. Объект выбран из тех соображений, что этот материал перспективен, достаточно много исследовался и имеется большое количество литературных данных по влиянию ионной имплантации на его поверхностные свойства. В частности известна [6] зависимость микротвёрдости от дозы имплантации, которая имеет максимум при дозах $(2 \div 3) \cdot 10^{17}$ ион/см². При увеличении дозы более $4 \cdot 10^{17}$ ион/см² наблюдается резкий спад микротвёрдости. Механизм, объясняющий такой достаточно узкий диапазон оптимальных доз, не совсем ясен, и исследование АЭ могло бы дать дополнительную информацию, как для его определения так и, возможно, для контроля процесса имплантации, альтернативного измерению плотности ионного тока.

Исследования интенсивности АЭ, суммарной АЭ, амплитудного распределения сигналов АЭ в различных диапазонах доз показали следующее (рис. 3 - 6): интенсивность АЭ монотонно увеличивается в диапазоне доз $1 \cdot 10^{15} \div 2 \cdot 10^{17}$ ион/см². При дозах более $5 \cdot 10^{16}$ ион/см² наблюдается увеличение интенсивности с одновременным изменением амплитудного распределения сигналов АЭ смещением максимума распределения в сторону меньших амплитуд. При дозах более $3 \cdot 10^{17}$ ион/см² интенсивность АЭ уменьшается, но максимум амплитудного распределения резко смещается в сторону больших амплитуд. Такое поведение АЭ возможно согласуется с обнаруженными ранее мартенситными превращениями в кобальте, приводящими к увеличению локальных микронапряжений и повышению микротвёрдости материала в целом. Дальнейший ход АЭ с увеличением доли импульсов большой амплитуды при дозах больших $(3 \div 4) \cdot 10^{17}$ ион/см² - свидетельство блистерообразования на облучаемой поверхности с соответствующим уменьшением микротвёрдости. Одновременно наблюдаемое увеличение плотности дислокаций, усиление радиоционно-стимулированной диффузии имплантированных ионов, дрейф в глубину материала комплексов дефектов структуры также может приводить к увеличению доли высокоинтенсивных импульсов АЭ. Поэтому уменьшение интенсивности АЭ с одновременным изменением амплитудного спектра АЭ в сторону больших амплитуд может быть информацией, соответствующей оптимальной дозе имплантации.

Аппаратно-программный амплитудный анализатор спектра сигналов, интенсиметр и счетчик суммарной эмиссии позволяют под управлением разработанной программы, включающей блок обработки акустоэмиссионных данных, осуществить альтернативный электрическому контроль дозы имплантации и режимов облучения серийных объектов.

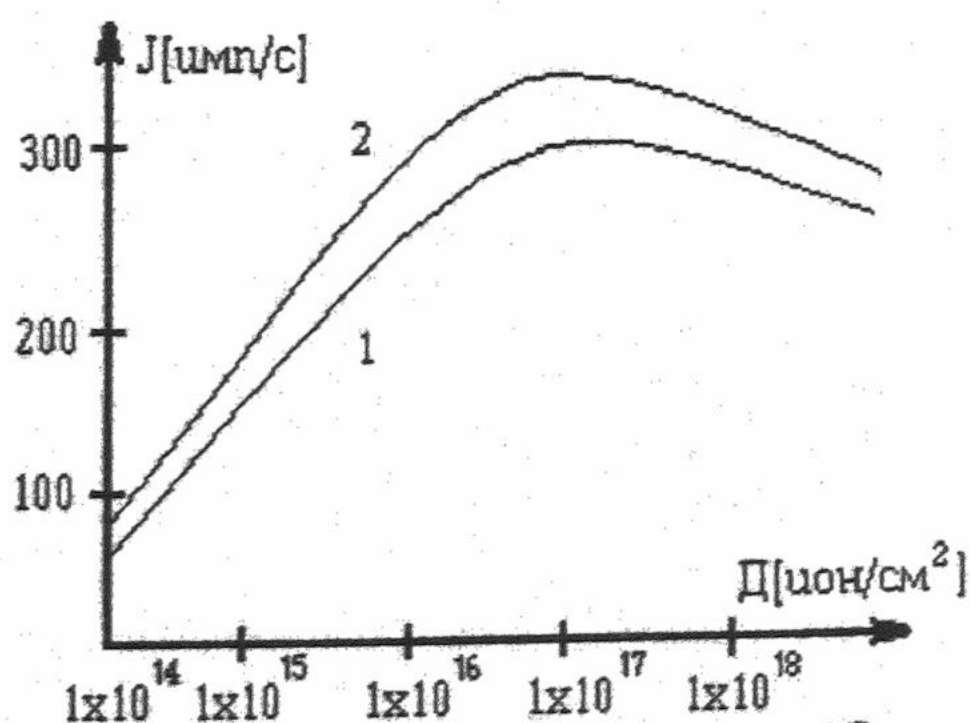


Рис.3. Зависимость интенсивности АЭ от дозы имплантации N^+ в WC-6Co. 1 - плотность тока ионов $j = 10 \text{ мкА/см}^2$, 2 - плотность тока ионов $j = 15 \text{ мкА/см}^2$.

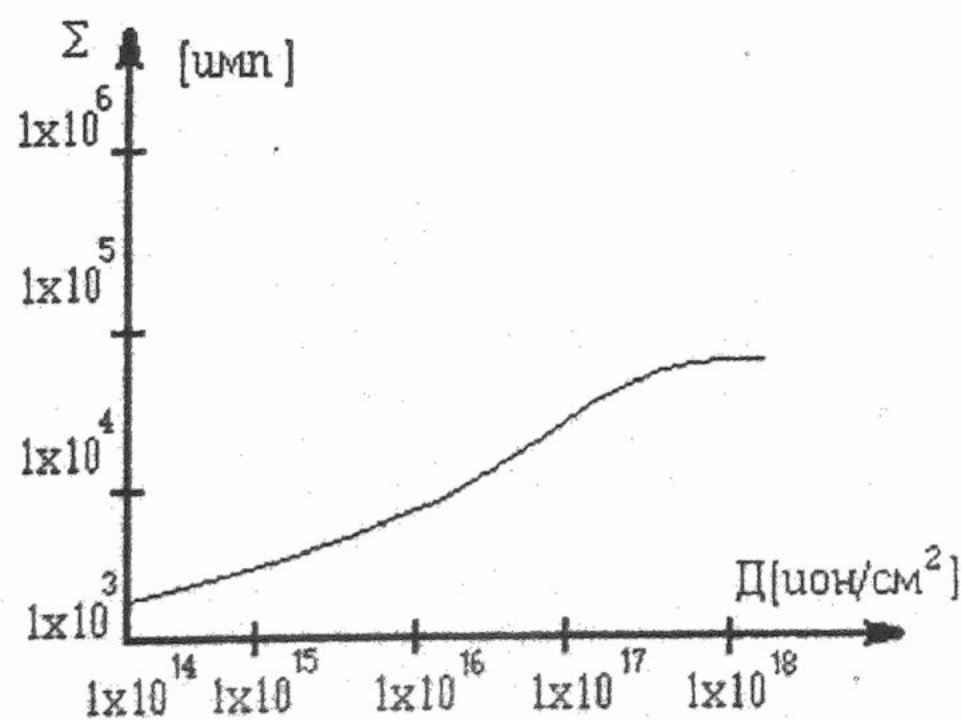


Рис.4. Зависимость суммарной АЭ от дозы имплантации N^+ в WC-6Co при плотности тока $j = 5 \text{ мкА/см}^2$.

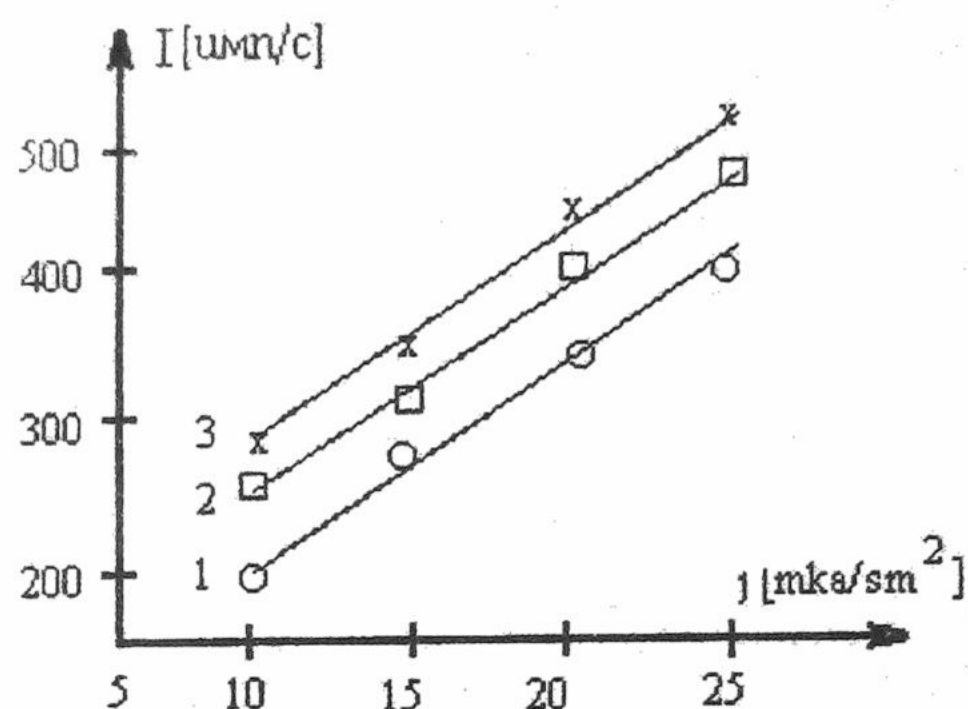


Рис.5. Зависимость интенсивности АЭ от плотности тока ионов N^+ . 1 – $D = 5 \cdot 10^{16}$ ион/см², 2 – $D = 1 \cdot 10^{17}$ ион/см², 3 – $D = 4 \cdot 10^{17}$ ион/см².

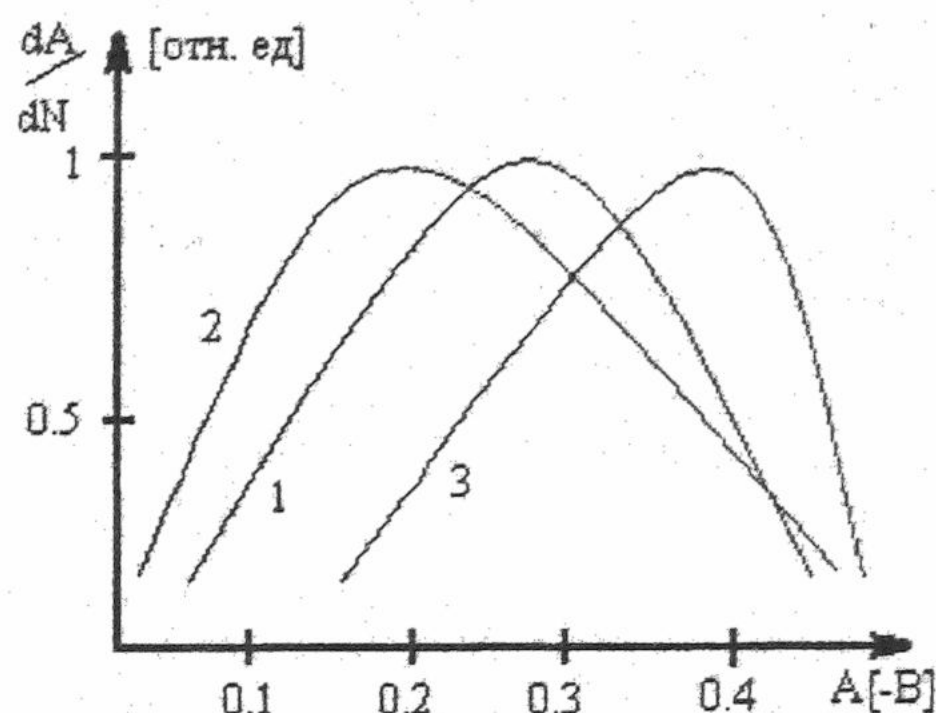


Рис.6. Амплитудное распределение импульсов АЭ. 1 – $D = 1 \cdot 10^{16}$ ион/см², 2 – $D = 1 \cdot 10^{17}$ ион/см², 3 – $D = 5 \cdot 10^{17}$ ион/см².

ВЫВОДЫ

В результате выполнения работы было создано экспериментальное оборудование для изучения АЭ при ионной имплантации включающее в себя аналого-цифровой процессор сигналов АЭ и программно-технической комплекс многоканального амплитудного анализатора на базе IBM-компьютера.

Установлена зависимость интенсивности и амплитудного распределения сигналов АЭ от дозы имплантации, а также корреляция амплитудного спектра сигналов АЭ и микротвёрдости WC-6Co при наборе дозы в диапазоне $1 \cdot 10^{16}$ – $5 \cdot 10^{17}$ ион/см².

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плешивцев Н.В., Бажин А.И. Физика воздействия ионных пучков на материалы. – М.: Вузовская книга, 1998. – 392 с.
2. Быковский Ю.А., Неволлин В.Н., Фоминский В.Ю. Ионная и лазерная имплантация металлических материалов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.
3. Бинялене Д.-Ю., Адлене Д. Экспериментальное исследование акустической эмиссии твердых тел при ионном облучении. – Научные труды вузов ЛитССР. Ультразвук, 1984, №16, с.61-65.
4. Исследование упругих колебаний в твердом теле в процессе ионной имплантации / Пожела И.П., Пранявичюс Л.И., Рагаускас А.В., Урбонас Д.-Т.А. – Поверхность. Физика, химия, механика. – 1985, №2, с.38-42.
5. Стервоядов С.Н. Система измерения дозы имплантации. Вестник ХГУ. Серия физическая «Ядра, частицы, поля», № 443, вып 2/6/, 1999, с. 97-99.
6. Гусева М.И. Ионная имплантация в неполупроводниковые материалы. Итоги науки и техники. Серия: Пучки заряженных частиц и твердое тело. Том 5. Физические основы лазерной и пучковой технологии. – М.: ВИНТИ, 1984. – С.5-54.

EXPERIMENTAL EQUIPMENT FOR INVESTIGATIONS OF SOLID STATES ACOUSTIC EMISSION UNDER IONS IRRADIATION

S.N. Styervoyedov

Kharkov National University, 61077, Kharkov, Svobody sq., 4.

E-mail: sterv@pht.univer.kharkov.ua

Results of experimental equipment elaboration for investigations of acoustic emission under ions implantation into non-semiconducting materials are described in the present paper. Intensity and amplitude distribution of acoustic emission signals dependence from implantaion dose are determined and possibility of new controlling devices for ions irradiation creation is shown.

KEY WORDS: acoustic emission, ion implantation, radiational defects, implantation dose, amplitude distribution of signals, total acoustic emission, intensity of acoustic emission.

УДК 539.1

УСТОЙЧИВОСТЬ ДИНАМИЧЕСКОГО ХАОСА ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ ОТОБРАЖЕНИИ

В. П. Демуцкий

Харьковский национальный университет им В.Н. Каразина.
Физико-технический факультет, 61108, Харьков, пр.Курчатова 31.
Поступила в редакцию 10 августа 2000г.

Теоретически исследовано влияние периодичности отображения на устойчивость при стандартном отображении. Найденны области устойчивости при двухэтапном периодическом отображении.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: хаос, стандартные отображения, устойчивость.

В последнее время общепризнанным стало утверждение, что хаотическое поведение характерно не только для систем с большим числом степеней свободы, - хаос является даже более правилом, чем исключением и для систем с малым (двумя и даже одним) числом степеней свободы [1,2]. Поскольку уравнения, описывающие хаотическое поведение, достаточно сложны (чаще всего нелинейные), а при исследовании систем с большим числом степеней свободы это еще и система многих нелинейных уравнений, хаос теоретически в основном исследовался численными методами (с помощью ЭВМ), тогда как работ с аналитическим исследованием хаоса крайне мало [3,4]. Однако именно аналитические исследования хаоса позволяют получить принципиальные выводы о закономерностях поведения хаотических систем, (например о поведении таких систем на достаточно больших промежутках времени, скорости затухания корреляций [3,4]). Но знание именно таких закономерностей важно при проектировании различных устройств. Мы исследуем вопросы устойчивости динамических систем при условии периодичности отображения.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для исследования динамики систем со многими степенями свободы используют так наз. сечение Пуанкаре, и исследуют распределение точек пересечения траекториями этого сечения через дискретные промежутки времени $1, 2, 3, \dots, t, \dots$. При этом распределение точек пересечения сечения Пуанкаре задается системой d -уравнений (в общем случае нелинейных)

$$\vec{x}^{t+1} = T\vec{x}^t \quad (1)$$

иначе

$$x_i^{t+1} = \{\alpha_{ij} x_j^t\} \quad (2)$$

($i, j = 1, 2, \dots, d$; d -разность системы, т.е. число степеней свободы). Здесь скобки $\{\dots\}$ означают дробную часть, матрицей α_{ij} (константы) задается отображение T , а $x^t(x_1^t, x_2^t, \dots, x_d^t)$ - d -мерный вектор, задающий состояние системы, по повторяющимся индексам производится суммирование. Мы полагаем фазовый объем сохраняющимся

$$\det \alpha_{ij} = 1. \quad (3)$$

Не только для упрощения задачи, но и для получения наглядных и обозримых результатов мы ограничимся рассмотрением двумерного отображения, а еще конкретнее, стандартного отображения [2]

$$\alpha_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & k \\ 1 & 1+k \end{pmatrix}, \quad (i, j = 1, 2). \quad (4)$$

Здесь k -целые числа, и в этом случае в формуле (2) можно опустить скобки, восстановив их в конечном результате [3]. При этом система уравнений (2) становится просто системой алгебраических уравнений

$$x_i^{t+1} = \alpha_{ij} x_j^t \quad (5)$$

для решения и исследования которой уже можно применить хорошо известные методы [5].

УСТОЙЧИВОСТЬ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Мы будем исследовать периодические структуры с периодом τ

$$T_\tau = T_1 T_2 \dots T_N, \quad (6)$$

где N - число этапов (шагов) в период (т.е. число преобразований, из которых состоит период).

Как известно, (см., например, [6]) вопрос об устойчивости периодических систем решается исследованием собственных значений ρ матрицы монодромии $\hat{M}$, удовлетворяющих уравнению

$$\rho^2 - \rho \operatorname{Sp} \hat{M} + 1 = 0. \quad (7)$$

мы учли условие сохранения фазового объема(3)). Здесь $\hat{M}$ – матрица монодромии, смешивающая решение на период:

$$\hat{M}_{ij} x_j^0 = x_i^T. \quad (8)$$

Полагая [6]

$$\rho = e^{i\Phi} \quad (9)$$

для фазы Φ получим уравнение

$$\cos \Phi = \frac{1}{2} \operatorname{Sp} \hat{M}. \quad (10)$$

Устойчивость соответствует реальным значениям Φ , т.е. условие устойчивости имеет вид

$$-1 \leq \frac{1}{2} \operatorname{Sp} \hat{M} \leq 1. \quad (11)$$

Для нахождения величины $\operatorname{Sp} \hat{M}$ построим два решения системы (5).

Первое $(x_j^I)^I$ при краевых условиях

$$\begin{aligned} (x_1^0)^I &= 1 \\ (x_2^0)^I &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

тогда из (8) следует

$$(x_1^T)^I = \hat{M}_{11}. \quad (13)$$

Второе решение системы (5) $(x_j^I)^{II}$ построим при краевых условиях

$$\begin{aligned} (x_1^0)^{II} &= 0 \\ (x_2^0)^{II} &= 1 \end{aligned} \quad (14)$$

тогда из (8) следует

$$(x_2^T)^{II} = \hat{M}_{22}. \quad (15)$$

Итак,

$$\operatorname{Sp} \hat{M} = (x_1^{(T)})^I + (x_2^T)^{II} \quad (16)$$

и условие устойчивости периодической структуры запишется в виде

$$-2 \leq (x_1^T)^I + (x_2^T)^{II} \leq 2. \quad (17)$$

Напомним, что при стандартном отображении [4] условие устойчивости имеет вид [7]

$$-4 \leq k \leq 0. \quad (18)$$

ДВУХЭТАПНАЯ ПЕРИОДИЧНОСТЬ

Исследуем устойчивость периодического отображения T с периодом τ , состоящего из двух последовательных стандартных отображений

$$T = T_1 T_2, \quad (19)$$

где

$$T_q \equiv \begin{pmatrix} 1 & k_q \\ 1 & 1 + k_q \end{pmatrix} \quad (q = 1, 2). \quad (20)$$

Условие устойчивости в этом случае имеет вид

$$-1 \leq 1 + k_1 + k_2 + \frac{1}{2} k_1 k_2 \leq 1 \quad (21)$$

Заметим, что неравенство (21) симметрично относительно замены $k_1 \Leftrightarrow k_2$, т.е. относительно порядка в T_1 и T_2 в (19).

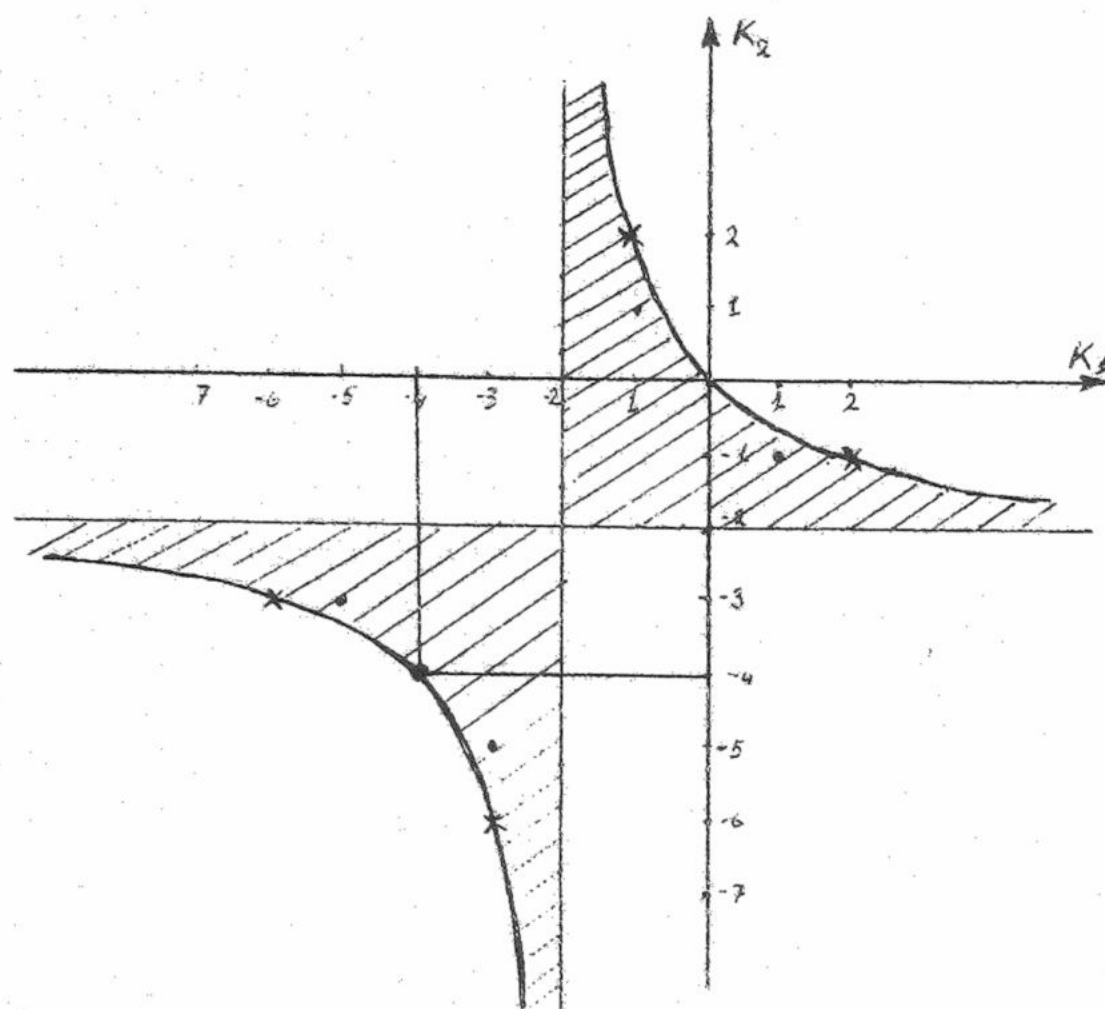


Рисунок. Области устойчивости

В плоскости (k_1, k_2) на рис. штриховкой указана область устойчивости периодической структуры (19), определяемая неравенством (21) [Квадрат с вершинами в точках $(0,0)$, $(-4,0)$, $(0,-4)$ и $(-4,-4)$ — область устойчивости неперiodической структуры].

По нашему мнению, получен интересный результат: некоторые точки, устойчивые или граничащие в неперiodических структурах [например, $(-3,-1)$, $(-1,-3)$] стали неустойчивыми тогда как некоторые неустойчивые точки [например, $(1,-1)$, $(-5,-3)$, $(-3,-5)$, $(-1,1)$] стали устойчивыми. Иначе, наличие периодичности отображения изменяет условия устойчивости при стандартном отображении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заславский Г.М. Стохастичность динамических систем. М.: Наука, 1984, 269с.
2. Неймарк Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания. М.: Физмат, 1987, 424с.
3. Демуцкий В.П., Половин Р.В. Модель динамического хаоса, допускающая аналитическое решение. //ЖТФ.-1991-Т.61, в.4, 1-6.
4. Демуцкий В.П., Половин Р.В. О скорости перемешивания в детерминированной псевдолинейной системе. //УФЖ. -1990 -Т.35, №2, 310-314.
5. Шилов Г.Е. Конечномерные линейные пространства. М.: Наука, 1969.
6. Мытник А.Д. Математика. Специальные курсы. -М.: Наука, 1971, 632с.
7. Заславский Г.М., Сагдеев Р.З. Введение в нелинейную физику. М.: Физматлит, 1988.

STABILITY OF DYNAMICAL CHAOS IN THE CASE OF PERIODICAL MAPPING

V. P. Demutskii

Department of Physics and Technology, Kharkov National University, 31 Kurchatov ave.,
61108 Kharkov, Ukraine.

The influence of periodicity of standard map onto stability of chaotic dynamical system was investigated. It was received the conditions of stability and it was shown that the new points of stability have arisen.

KEY WORDS: chaos, standard map, stability.

УДК 621.317:541.13

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТНЫХ СИСТЕМ В САНТИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ**А.А. Ашеко, В.Г. Гордиенко, Е.А. Шарков***

Харьковский национальный университет, 61077, Харьков, пл. Свободы, 4,

* Институт космических исследований РАН, 117810, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

Поступила в редакцию 14 июня 2000 г.

На частоте 9.56 ГГц в интервале температур 271...353 К исследована комплексная диэлектрическая проницаемость дистиллированной воды, ряда поли- и моноэлектrolитных жидких систем. Измерения выполнены с помощью экспериментального стенда балансного типа с систематической ошибкой 0.7% и 1.5%, соответственно, в измерениях ϵ' и ϵ'' . Случайная ошибка не превышает 0.5% для ϵ' и 1% для ϵ'' с доверительной вероятностью 0.95. Все исследованные объекты обнаружили зависимость действительной и мнимой составляющих от концентрации электролита и температуры.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: диэлектрическая спектроскопия, комплексная диэлектрическая проницаемость, вода, электролит

Дальнейшее развитие и эффективное использование дистанционного зондирования Земли со спутников требует решения ряда специфических проблем. Одной из требующих решения проблем является разработка высокоточной релаксационной модели диэлектрических свойств жидких электролитных систем, поскольку практически во всех задачах дистанционного зондирования акваторий океана релаксационная модель морской воды выступает в качестве фундаментальной основы теоретических расчетов (см., например, [1-3]). В свою очередь, решение этой задачи требует проведения систематических экспериментальных исследований диэлектрических свойств указанных систем с относительной погрешностью не хуже 1-3% в широком диапазоне длин волн, температур и соленостей. Ниже представлены результаты последовательных экспериментов по изучению диэлектрических свойств электролитных систем (аналогов широко распространенных природных растворов) на частоте 9.5 ГГц в широком диапазоне температур (271-353 К) и соленостей (0-200%).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД. ТЕОРИЯ И ПРИНЦИП МЕТОДА

Нами создана измерительная система балансного типа, позволяющая определять диэлектрические параметры сильнопоглощающих жидких систем на частоте 9.5 ГГц с погрешностью не превышающей 2.5%. Блок-схема экспериментального стенда изображена на рис.1.

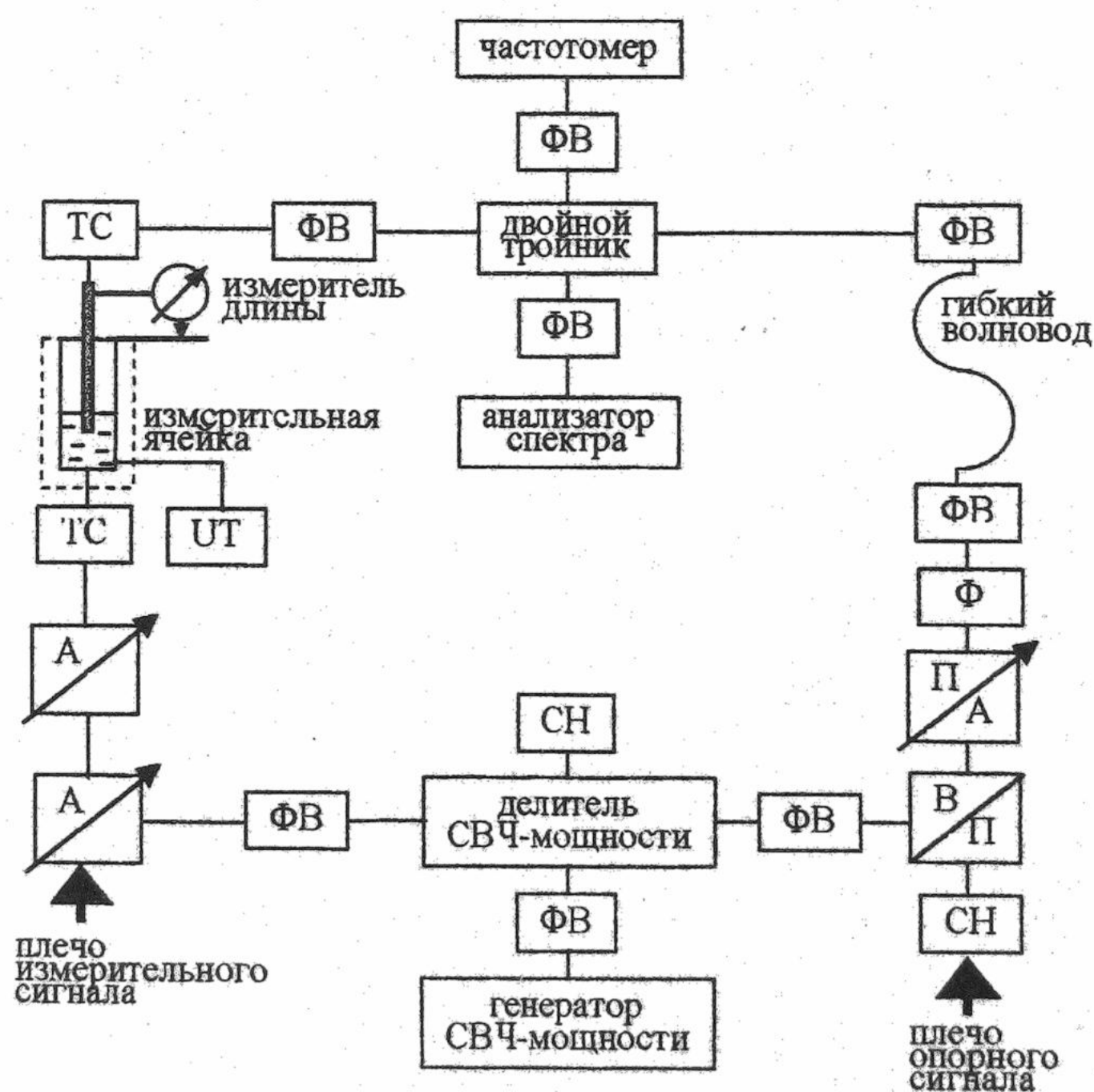


Рис.1. Блок-схема экспериментального стенда

Измерительная система построена по мостовой схеме [4]. В одно из плеч моста входит измерительная камера, в другое – переменный поляризационный аттенуатор (ПА) и фазовращатель (ФВ). Измерительная камера проходного типа состоит из двух круглых волноводов – подвижного и неподвижного. Оба волновода закрыты снизу герметизирующими диэлектрическими втулками, между которыми находится исследуемая жидкость. Подвижный волновод может перемещаться вдоль оси неподвижного, изменяя при этом толщину слоя жидкости. Перемещения контролируются измерителем длины, жестко связанным с подвижным волноводом. Измерительная камера может термостатироваться. Вход и выход камеры согласованы с помощью трансформаторов сопротивлений (ТС), построенных на базе двойных волноводных тройников с короткозамыкающими поршнями в Е- и Н-плечах. В качестве делителя СВЧ мощности на опорную и измерительную составляющие и волноводного моста применены согласованные двойные волноводные тройники.

Волноводный переключатель (ВП) в опорном плече используется для его запираания в процессе измерений. Применение гибкого волновода обусловлено необходимостью изменения длины измерительного плеча. Частота электромагнитных колебаний контролируется с помощью электронносчетного частотомера ЧЗ-54. В качестве приемника используется анализатор спектра СЧ-60.

СВЧ-мощность от генератора через развязывающий вентиль, разделившись на двойном волноводном тройнике на опорную и измерительную составляющие, поступает в соответствующие каналы измерительной системы и далее в боковые плечи волноводного моста. Е-плечо моста подключено к частотомеру, Н-плечо – к приемнику СВЧ-мощности. Мощность на выходе волноводного моста есть результат интерференции опорной и измерительной составляющих. Мост балансируется изменением толщины слоя жидкости в измерительном канале и с помощью поляризационного аттенуатора и фазовращателя в опорном. Толщина жидкости выбирается достаточной для исключения влияния многократных отражений между входом и выходом измерительной камеры на результаты измерений.

Значения действительной ϵ' и мнимой ϵ'' составляющих комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) исследуемых жидких систем рассчитываются по формулам [5]:

$$\epsilon' = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}} \right)^2 + \left(\frac{\lambda_0}{2\pi} \right) \cdot (\beta^2 - \alpha^2) \quad (1)$$

$$\epsilon'' = 2 \left(\frac{\lambda_0}{2\pi} \right)^2 \cdot (\beta \cdot \alpha) \quad (2)$$

Здесь: λ_0 – длина волны в свободном пространстве, $\lambda_{кр}$ – критическая длина волны измерительной камеры, α и β – постоянная затухания и фазовая постоянная электромагнитных колебаний в исследуемой жидкости.

Для расчета значений ϵ' и ϵ'' с помощью соотношений (1) и (2) необходимо определить постоянную распространения в жидкости $j = \alpha + i\beta$. Запишем выражение для СВЧ-мощности $P(z)$, нормированной относительно мощности опорного сигнала, на выходе моста:

$$P(z) = |1 - 1 \cdot e^{-jz}|^2 = 1 - 2e^{-jz} \cdot \cos \beta z + e^{-2jz} \quad (3)$$

На рис.2 приведен вид зависимости $P = P(z)$ согласно уравнению (3).

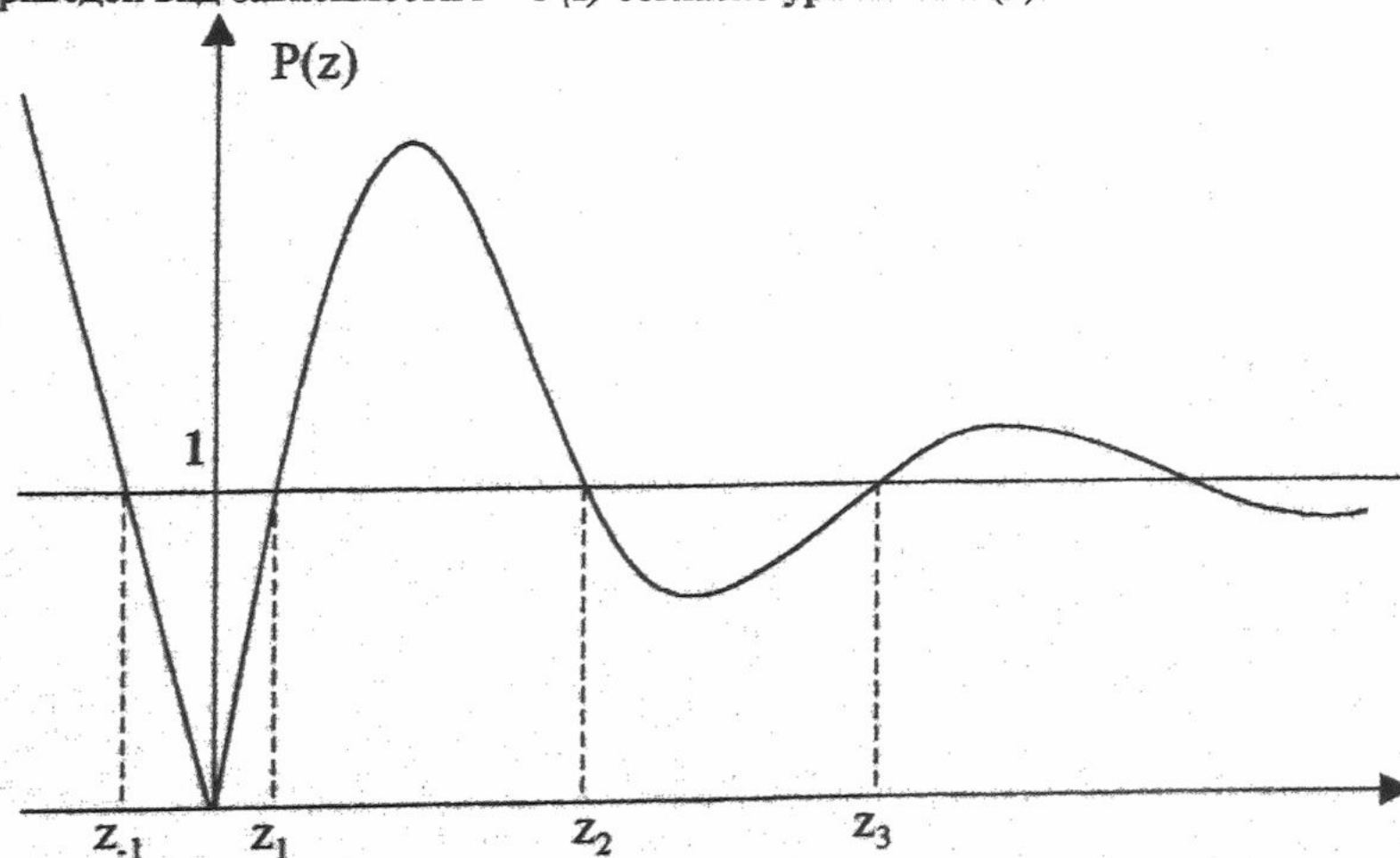


Рис.2. Нормированная СВЧ-мощность $P(z)$ на выходе моста

Начало отсчета оси z совпадает с балансным положением моста. При $z=0$ в плоскости симметрии двойного тройника имеет место узел электрического поля, т.е. $\vec{E}_{\text{опорн.}} \uparrow \downarrow \vec{E}_{\text{измерит.}}$, $|E_{\text{опорн.}}| = |E_{\text{измерит.}}|$. Из соотношения (3) следует, что нормированная мощность на выходе моста определяется опорным сигналом $P(z_{\infty}) \approx 1$ при $z=z_{\infty}$, т.е. «бесконечном слое жидкости». В то же время в окрестности точки баланса $z=0$ существуют точки $z_{-1} < 0$ и $z_1 > 0$ (см. рис. 2), в которых:

$$P(z_{-1}) = P(z_1) = P(z_{\infty}). \quad (4)$$

Из соотношений (3) и (4) получаем для z_{-1} и z_1

$$e^{-\alpha z_1} = 2 \cos \beta z_1. \quad (5)$$

$$e^{-\alpha z_{-1}} = e^{-\alpha |z_{-1}|} = 2 \cos \beta z_{-1}. \quad (6)$$

Решим эту систему уравнений относительно α и β . Прологарифмировав (5) и (6), получаем:

$$\frac{|z_{-1}|}{z_1} \ln 2 + \frac{|z_{-1}|}{z_1} \ln \cos \beta z_1 = -\ln 2 - \ln \cos \beta \frac{|z_{-1}|}{z_1} z_1. \quad (7)$$

Положив $|z_{-1}|/z_1 = k$, а $\beta z_1 = y$ уравнение (7) запишем в виде:

$$-(k+1) \ln 2 = k \ln \cos y + \ln \cos ky. \quad (8)$$

Определив экспериментально z_{-1} и z_1 , с помощью уравнения (8) методом последовательных приближений (методом хорд), находим значения $y = y(k)$.

В результате постоянная затухания α и фазовая постоянная β определяются соотношением:

$$\beta = \frac{y(k)}{z_1} \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{-\ln(2 \cos y(k))}{z_1}. \quad (10)$$

По данным об α и β с помощью уравнений (1) и (2) рассчитываем ϵ' и ϵ'' исследуемой жидкой системы.

Процесс измерений сводится к следующему. С помощью переменных аттенюаторов устанавливаем необходимый уровень опорного сигнала. Изменяя положение подвижного волновода, добиваемся примерного равенства амплитуд опорного и измерительного сигналов и, регулируя фазовращатель и поляризационный аттенюатор, достигаем баланса моста.

Далее закрываем измерительное плечо и отмечаем показание анализатора A_0 , соответствующее величине опорного сигнала. Открыв измерительное плечо, поднимаем подвижный волновод таким образом, чтобы при обратном ходе еще до достижения показания анализатора, равного A_0 , были выбраны все возможные люфты подвижных частей измерительной камеры. Перемещая подвижный волновод вниз, уменьшаем тем самым толщину слоя исследуемой жидкости, отмечаем показания измерителя длины l_1 , при котором амплитуда анализируемого сигнала равна A_0 . Продолжая перемещать подвижный волновод в том же направлении, определяем точку баланса l_0 , в котором сигнал на выходе моста равен нулю, и точку l_{-1} , в которой сигнал на выходе моста равен A_0 . Значения z_{-1} и z_1 (см. рис. 2), необходимые для расчета ϵ' и ϵ'' определяем из соотношений:

$$z_1 = l_1 - l_0 \quad |z_{-1}| = l_0 - l_{-1}. \quad (11)$$

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ

При выводе соотношений для расчета величин ϵ' и ϵ'' (1, 2) были сделаны следующие допущения:

- 1) сигнал на выходе моста при балансе точно равен нулю;
- 2) изменение сигнала на выходе измерительной камеры при вариации слоя жидкости следует закону, имеющему место в случае бегущей волны, т.е. коэффициент связи между неподвижным и подвижным волноводами остается постоянным;

- 3) многократные отражения и высшие типы волн отсутствуют в рабочем объеме;
- 4) флуктуации мощности и частоты генератора СВЧ отсутствуют;
- 5) амплитуда и частота сигнала на выходе гибкого фидера не зависит от его деформаций;
- 6) флуктуации температуры исследуемой жидкости отсутствуют;
- 7) измеритель длины не вносит ошибок.

В реальных условиях любое из сделанных допущений справедливо лишь приближенно. Оценим возможные систематические ошибки, связанные с приведенными допущениями. Выпишем выражения для определения относительных систематических погрешностей

$$\delta \epsilon' \approx 2 \delta z_1 + |f_1| \cdot (\delta z_{-1} + \delta z_1) \quad (12)$$

$$\delta \epsilon'' \approx 2 \delta z_1 + |f_2| \cdot (\delta z_{-1} + \delta z_1), \quad (13)$$

где:

$$f_1 = \frac{2k[y + \operatorname{tg} y \cdot \ln(2 \cos y)] \cdot \left[\frac{\ln(\cos y) - \operatorname{tg} ky + \ln 2}{\operatorname{tg} y + \operatorname{tg} ky} \right]}{y^2 - [\ln(2 \cos y)]^2}$$

$$f_2 = \frac{2k[\ln(2 \cos y) - y \operatorname{tg} y] \cdot \left[\frac{\ln(\cos y) - \operatorname{tg} ky + \ln 2}{\operatorname{tg} y + \operatorname{tg} ky} \right]}{y \cdot \ln(2 \cos y)}$$

График функций $f_1=f_1(k)$ и $f_2=f_2(k)$ для $k \in [0.5; 0.9]$ приведены на рис.3.

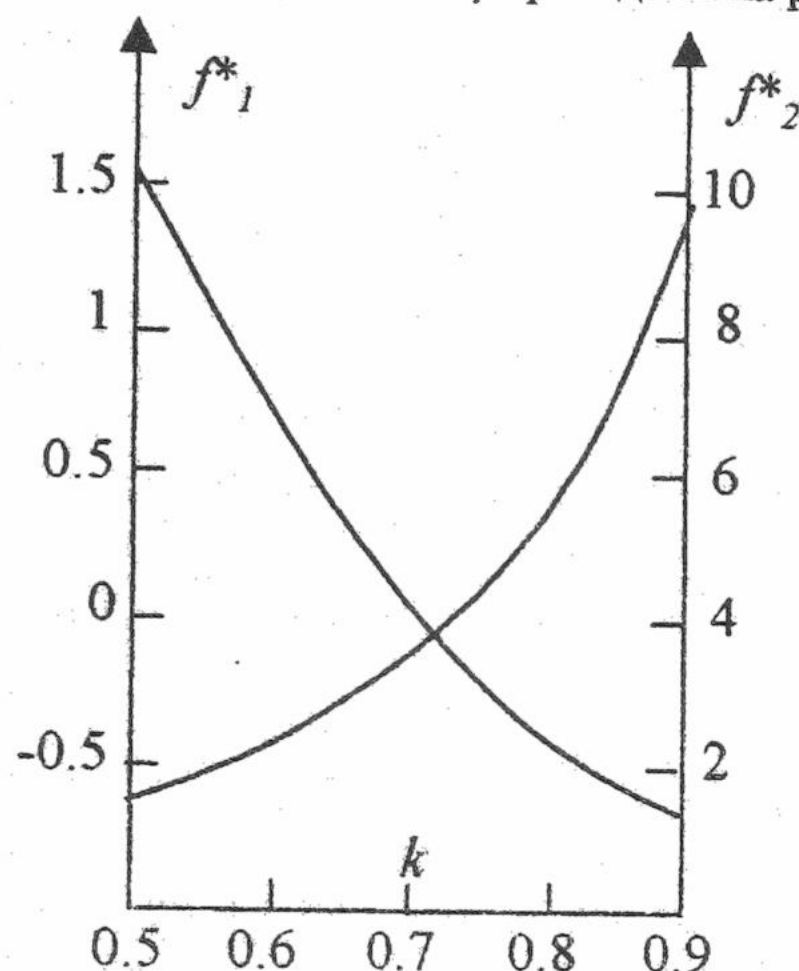


Рис. 3. Функции $f_1(k)$ и $f_2(k)$ для расчета относительных ошибок

Любой источник ошибок будем рассматривать как некоторое возмущение, искажающее вид основного уравнения (3). Решения полученного с учетом этого возмущения уравнения отличаются от соответствующих решений z_{-1} и z_1 , основного уравнения на малые величины Δz_{-1} и Δz_1 .

Рассмотрим влияние неполного баланса моста на результаты измерений. Положим, что вследствие конечной разрешающей способности системы регистрации измерительный сигнал меньше опорного при сбалансированном мосте. Отношение их амплитуд равно $1-\rho$, причем $\rho \ll 1$. Уравнение (3) в этом случае выглядит следующим образом:

$$P(z) = 1 - 2(1-\rho)e^{-dz} \cos \beta z + (1-\rho)^2 e^{-2dz} \quad (14)$$

Правая часть (14) принимает значения равные 1 при $z'_i = z_i + \Delta z_i$, где z_i - решение уравнения (2). Приравняв (14) единице, запишем его в виде:

$$2 \cos \beta z'_i = (1-\rho) e^{-\alpha z'_i} \quad (15)$$

Разложив (15) в ряд Тейлора в окрестности z_i и опустив члены, начиная со второго порядка и выше, получим выражение для δz_i :

$$\delta z_i = \frac{\rho}{y_i} \cdot \frac{\cos y_i}{\sin y_i + \ln(2 \cos y_i) / y_i \cdot \cos y_i} \quad (16)$$

Зависимости δz_1 и δz_{-1} от k приведены на рис.4. Значения δz_{-1} и δz_1 выражены в единицах ρ . Амплитуда сигнала на выходе моста при балансе не менее чем в 10^4 раз меньше амплитуды опорного сигнала, следовательно, можно принять величину $\rho \leq 10^{-4}$.

Выполненные с помощью формул (16), (12), (13) расчеты показали, что относительные ошибки $\delta \epsilon'$, $\delta \epsilon''$, вызываемые неполным балансом моста, для интервала $k \in [0.5; 0.9]$ не превышают 0.02% для ϵ' и 0.12% для ϵ'' . С ростом потерь в жидкости $\delta \epsilon'$ и $\delta \epsilon''$ уменьшаются.

Расчет возможных систематических погрешностей, обусловленных непостоянством коэффициента связи между неподвижным и подвижным волноводами, многократными отражениями и высшими типами волн в рабочем объеме выполнен также с помощью соотношений (16), (12), (13). В предельном случае для $k \leq 0.9$: $\delta \epsilon' \leq 0.2\%$ и $\delta \epsilon'' \leq 0.5\%$. Влияние на результаты измерений флуктуаций мощности и частоты СВЧ-генератора, а также непостоянства коэффициента передачи гибкого волновода исследовались экспериментально. Для интервала $[z_{-1}, z_1]$ величины $\delta \epsilon'$, $\delta \epsilon''$ в этом случае незначительны и не превышают 0.01%.

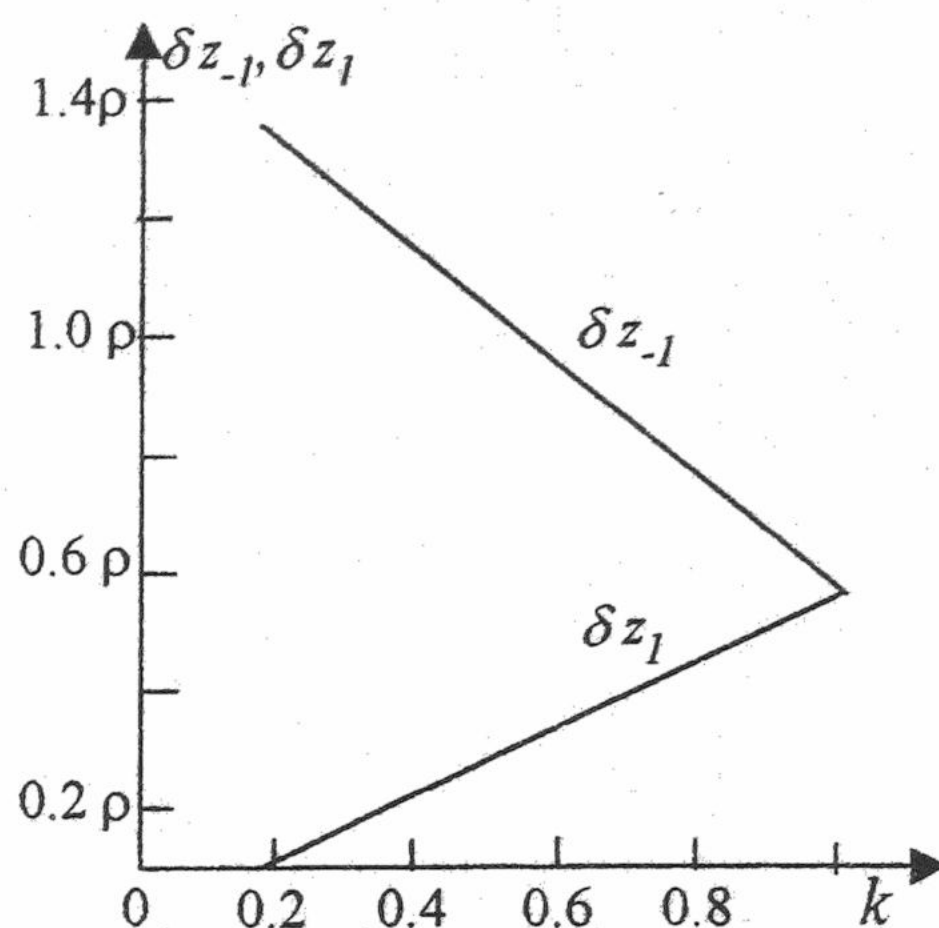


Рис. 4. Значения вызываемых полным балансом моста ошибок δz_{-1} и δz_1 (δz_{-1} и δz_1 выражены в единицах ρ)

Для исключения ошибок, связанных с флуктуацией температуры исследуемой жидкости, измерительная камера тщательно термоизолировалась и термостатирование проводилось в течение длительного времени (40...60 мин.).

Рассмотрим систематические ошибки, вызванные инструментальными погрешностями измерителя длины. В установке использован индикатор перемещений с ценой деления $1 \cdot 10^{-6}$ м и пределом измерения $0...5 \cdot 10^{-3}$ м. Абсолютная погрешность в определении z_i составляет $\Delta z_i = 5 \cdot 10^{-7} + 5 \cdot 10^{-7} = 1 \cdot 10^{-6}$ м. Относительные ошибки $\delta \epsilon'$ и $\delta \epsilon''$, обусловленные погрешностями измерителя длины, составляют: 0.3-0.4% для ϵ' и 0.8-1.1% для ϵ'' . Суммируя проанализированные ошибки, получаем, что относительные систематические ошибки измерений ϵ' и ϵ'' сильнопоглощающих жидкостей не превышают 0.7% для ϵ' и 1.5% для ϵ'' .

КОМПЛЕКСНАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ЖИДКИХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

С помощью созданного экспериментального стенда проведены измерения ϵ' и ϵ'' водных растворов NaCl с концентрациями: 2, 5, 12, 18, 36, 50; 70, 100, 140, 180, 200‰; MgCl₂ с концентрациями: 7.23, 18.97, 40.21, 62.78 68.85, 121.8 ‰; MgSO₄ с концентрациями: 10, 20, 40, 60, 80, 100‰; CaSO₄ с концентрацией 1‰, а также смесей: вода-NaCl(30‰)-MgSO₄(5‰); вода-NaCl(30‰)-MgSO₄(5‰)-MgCl₂(10‰); вода-NaCl(30‰)-MgSO₄(5‰)-CaSO₄(1‰)-MgCl₂(10‰). Измерения выполнены на частоте 9.56 ГГц в интервале температур от 271 до 353 К. Исследована также дистиллированная вода (табл. 1,2).

Значения ϵ' и ϵ'' исследованных жидких электролитных систем приведены в табл. 1-5. Случайная погрешность в цикле измерений не превышает 0,5% для ϵ' и 1% для ϵ'' в каждой точке измерений с доверительной вероятностью 0.95 по критерию Стьюдента.

Таблица 1

Значение ϵ' для системы вода-NaCl

S‰	0	2	5	12	18	36	50	70	100	140	180	200
T K												
271	46.7*	43.5	42.9	42.1	41.5	40.9	40.5	39.8	37.8	35.6	32.7	30.2
283	57.1	56.2	56.0	54.8	53.9	51.7	50.5	48.2	44.3	40.2	37.8	34.5
293	63.3	62.5	61.4	60.5	59.5	56.6	54.5	52.4	47.3	42.5	39.3	35.6
303	65.8	64.7	64.4	62.8	61.6	58.7	56.1	53.4	47.7	44.5	39.7	36.4
313	66.3	65.1	64.6	63.5	61.7	59.1	56.3	53.3	48.3	44.7	40.2	36.0
323	65.1	64.1	63.7	62.9	60.9	57.8	55.6	52.0	47.3	43.3	38.0	34.7
333	63.6	63.8	63.4	61.8	59.7	56.8	54.9	50.8	46.3	42.0	37.2	33.9
343	62.2	61.9	61.4	59.2	57.8	55.6	52.4	49.7	45.0	40.5	36.0	32.1
353	60.1	59.8	59.6	57.8	56.5	54.0	50.7	48.6	43.7	39.8	35.2	31.9

* при 273.5 К

Таблица 2.

Значение ϵ'' для системы вода-NaCl

S°/∞	0	2	5	12	18	36	50	70	100	140	180	200
Т К												
271	40.8	42.8	43.1	43.5	43.9	44.5	44.8	45.1	45.5	46.1	46.4	46.7
283	35.2	36.3	36.6	37.1	38.3	39.7	40.7	41.9	45.3	46.3	46.5	47.4
293	30.4	32.2	33.0	33.4	34.3	36.4	38.3	42.1	45.6	48.4	49.0	51.0
303	24.6	27.9	28.5	29.7	30.6	33.7	36.4	41.4	46.9	50.7	54.1	56.1
313	20.2	24.2	24.3	26.1	27.8	32.0	35.3	41.1	48.9	53.8	59.1	62.4
323	16.3	20.8	21.4	22.9	25.1	31.4	35.7	42.8	52.7	58.6	65.5	70.9
333	13.2	17.8	18.4	20.2	23.6	31.7	36.3	44.4	56.0	65.3	72.8	78.2
343	10.5	14.6	14.5	18.8	22.7	31.7	36.6	46.9	60.0	69.9	80.6	87.3
353	8.7	11.8	14.4	17.0	23.0	31.8	38.9	49.3	63.9	75.3	88.0	94.0

Таблица 3

Значение ϵ'' и ϵ' для системы вода-MgCl₂

S°/∞	7.23	18.97	40.21	62.78	68.85	121.8	7.23	18.97	40.21	62.78	68.85	121.8
Т К	ϵ''						ϵ'					
271	42.9	43.2	43.5	43.9	44.0		41.9	41.0	40.3	39.1	38.5	35.8
283	37.2	38.4	38.9	39.5	40.1	40.8	52.4	51.1	48.7	46.1	45.2	40.5
293	33.3	34.5	37.4	38.3	39.2	40.9	59.5	57.3	53.2	50.3	49.2	43.8
303	29.1	31.5	35.3	37.8	39.4	41.7	63.8	59.8	54.6	51.8	50.8	46.1
313	25.2	28.8	32.95	38.4	39.7	43.6	64.4	61.3	55.4	52.1	51.0	46.4
323	22.0	27.2	31.7	38.0	40.8	44.7	63.7	59.8	55.0	51.8	50.3	46.1
333	19.5	25.4	30.5	40.4	43.2	47.4	62.0	58.1	54.3	50.9	49.4	44.9
343	18.1	23.5	31.6	42.3	43.8	49.2	60.1	56.3	53.4	48.9	48.4	44.0
353	15.5	21.6	32.0	44.6	46.4	51.4	58.5	55.0	51.6	48.3	46.9	44.2

Таблица 4

Значение ϵ'' и ϵ' для системы вода-MgSO₄

S°/∞	10	20	40	60	100	10	20	40	60	100
Т К	ϵ''					ϵ'				
271	42.8	43.0	43.5	43.8	44.4	43.2	42.5	41.4	40.7	39.1
283	36.8	37.6	38.6	39.4	40.8	54.6	52.9	50.1	48.4	45.5
293	31.9	33.1	34.7	36.1	37.6	60.7	59.0	56.6	53.7	48.7
303	27.3	29.2	31.9	34.4	35.8	63.1	61.5	59.1	55.4	50.1
313	23.7	25.3	28.8	32.0	34.5	63.6	62.7	59.8	56.3	50.8
323	20.6	22.6	27.1	30.7	34.1	62.8	61.6	59.3	56.0	50.3
333	18.5	20.1	25.6	30.2	34.4	61.5	60.4	58.5	54.4	50.0
343	16.4	18.5	24.9	30.5	35.6	60.7	59.1	55.8	53.1	48.4
353	15.1	18.9	24.1	31.8	36.9	57.9	57.0	54.9	52.2	47.8

Таблица 5

Значение ϵ' и ϵ'' для водных полиэлектролитных систем

S°/∞	NaCl – 30% MgSO ₄ – 5%		NaCl – 30% MgSO ₄ – 5% MgCl ₂ – 10%		NaCl – 30% MgSO ₄ – 5% MgCl ₂ – 10% CaSO ₄ – 1%		CaSO ₄ – 1%	
Т К	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''
271	41.2	44.3	40.8	44.6	40.6	44.6	43.8	42.5
283	51.6	39.7	50.5	40.3	50.3	40.5	56.6	36.0
293	56.7	36.5	54.8	37.7	54.1	38.1	62.8	31.6
303	59.2	33.6	56.6	35.3	55.7	35.7	65.0	27.5
313	59.4	31.8	56.9	34.2	56.6	34.6	65.7	22.9
323	58.5	31.5	56.7	33.6	55.9	33.7	64.9	20.1
333	57.7	31.8	55.5	33.9	55.5	33.9	63.6	16.5
343	55.3	31.7	53.6	34.0	53.4	34.3	61.5	13.7
353	54.0	32.3	51.9	35.0	51.7	35.6	59.9	10.5

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

При всех исследованных температурах ϵ' и ϵ'' обнаруживают зависимость от концентрации растворов. С ростом солености значения ϵ' при всех температурах понижаются, а значения ϵ'' растут. Характер температурных зависимостей диэлектрических параметров свидетельствует о релаксационной природе наблюдаемого взаимодействия электромагнитного СВЧ излучения с жидкими электролитными системами [6]. Исходя из имеющихся данных о значениях КДП на одной частоте, выявить принадлежность исследуемых систем к определенному релаксационному типу и определить релаксационные параметры не представляется возможным. Для оценки релаксационных параметров необходимы данные об ϵ' и ϵ'' , по крайней мере, на трех-четырёх частотах. Эти измерения являются предметом дальнейших наших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башаринов А.Е., Гуревич А.С., Егоров С.Т. Радиоизлучение Земли как планеты. -М.: Наука, 1974. - 188 с.
2. Шарков Е.А. О выборе релаксационной модели диэлектрических свойств воды для задач дистанционного зондирования. // Препринт. Пр-800. -М.: ИКИ АН СССР, 1983. -23 с.
3. Ньюку Э. Пассивное дистанционное зондирование Земли из космоса в СВЧ-диапазоне // ТИИЭР, 1982. -Т.70. № 7. - С.49-75.
4. Левин В.В. Абсолютный метод измерения диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь полярных жидкостей и растворов в диапазоне СВЧ. - В сб.: Современные проблемы физической химии, Изд.МГУ, 1970, т.4, с.283-315.
5. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. -М.: Физматгиз, 1963. -403 с.
6. Фрелих Г. Теория диэлектриков. -М.: Иностран. лит., 1960, 240 с.

DIELECTRIC PROPERTIES OF WATER ELECTROLYTE SYSTEMS IN CENTIMETER BAND

A.A. Asheko, V.G. Gordienko, E.A. Sharkov*

Kharkov National University, 61077, Kharkov, Svoboda square, 4

* Space research institute RAN, 11781, Moscow, Profsoyuznaya str. 84/32

The complex permittivity of distilled water, poly- and monoelectrolytes was measured within a systematic error of 0.7% in ϵ' and 1.5% in ϵ'' and an unbiased error (95% confidence limit) of 0.5% in ϵ' and .1% in ϵ'' from 271 to 353 K at 9.5 GHz. It was found that both the permittivity and loss of the polyelectrolytes exhibit a dependence on concentration with strong temperatures dependences.

KEY WORDS: dielectric spectroscopy, complex dielectric permittivity, water, electrolyte.

УДК 621.382 (083)

МАГНИТОРЕЗИСТОРЫ И ДАТЧИКИ ХОЛЛА НА ОСНОВЕ СЛОЖНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Н.М. Пелихатый¹, Н.И. Коваленко², А.К. Гнап²

1. Харьковский Национальный университет им. В.Н. Каразина, Украина, 61077, г. Харьков, пл. Свободы, 4.

2. Харьковский государственный аграрный университет им. В.В. Докучаева, 61483, г. Харьков, п/о Коммунист – 1.

Поступила в редакцию 24 апреля 2000 г.

Рассмотрены трудности применения электронно-лучевой технологии для изготовления датчиков Холла сложной геометрической формы. Программирование движения электронного луча должно предусматривать не только управление координатой перемещения, но и возможную модуляцию по мощности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: датчики Холла, проводящие иглы, электронный луч, антимонид индия, антимонид никеля, эвтектика.

Для получения анизотропных полупроводниковых материалов, в которых электропроводящая среда кристаллизуется в полупроводниковой матрице в виде проводящих игл и равномерно распределена по всему объему, используются двойные эвтектики. В их состав входят соединения металлов (антимонид никеля) и соединения полупроводниковой группы $A^{III}B^V$ (антимонид индия, антимонид галлия и др.) [1].

Необходимость в эвтектических сплавах такого рода возникла в связи с проблемой улучшения качества приборов использующих эффекты Холла и Гаусса (чувствительных к форме образца) [2, 3], в том числе микроминиатюрных магниторезисторов и датчиков Холла для измерения характеристик и распределения магнитного поля в простых и сложных электромеханических устройствах.

Для обеспечения большой величины относительного сопротивления полупроводника помещенного в магнитное поле необходимо, чтобы при изготовлении датчиков Холла, металлы, служащие областями высокой проводимости, не растворялись в полупроводниковой матрице, то есть, чтобы она сохраняла свои полупроводниковые свойства при формировании сложных геометрических форм. Наряду с этим необходимо, чтобы проводящие иглы металла были равномерно и ориентированно распределены по всему объему датчика сложной геометрической формы.

При изготовлении приборов, работающих на основе эффекта Холла, для получения заготовки кристалла необходимой геометрии обычно используют химическое травление. При малых размерах и толщине образцов оно не обеспечивает перпендикулярности стенок. Отклонение от перпендикулярности существенно влияет на точность измерения напряженности магнитного поля. Использование для формирования геометрических размеров ультразвука вносит дефекты в приповерхностную область.

В связи с этим для изготовления датчиков Холла была применена электроннолучевая технология [4], которая позволила улучшить параметры датчиков Холла, устранив влияние краевых эффектов.

Исследовались технологические режимы обработки и их влияние на микро и макронеоднородности, возникающие при взаимодействии электронного луча с полупроводниковым кристаллом.

Наряду с улучшением электрофизических параметров наблюдались микронеоднородности как в области дна микропазов, так и на их стенках. Поэтому возникла задача по исследованию микронеоднородностей, возникающих в толще обрабатываемого кристалла при взаимодействии с электрическим лучом.

Обработка образцов. Для исследования были использованы образцы эвтектического сплава антимонида индия и антимонида никеля ($InSb+NiSb$) размером $0,2 \times 20 \times 20$ мм. Иглы $NiSb$ были равномерно и ориентированно распределены по объему исследуемых образцов. Длина игл $\approx 10 - 20$ мкм. Температура плавления антимонида никеля - 1153°C , эвтектического сплава - $517 \pm 2^\circ\text{C}$.

Обработка образцов электронным пучком (рис.1) проводилась на электроннолучевой установке типа IEBD-3B-S. Ускоряющее напряжение электронного пучка 50-90 кВ, ток 10-15 мкА, скорость движения электронного луча 1-2 мм/с.

Необходимая геометрия и конфигурация паза формировалась двумя способами. Первый способ - изготовление паза заданной конфигурации фотокопированием, второй - обработка по заданной программе с помощью компьютера.

Экспериментальные результаты. Химическое окрашивание и травление позволяет выявлять структуру матричного кристалла в необработанном сложном полупроводнике эвтектического состава (рис.1а).

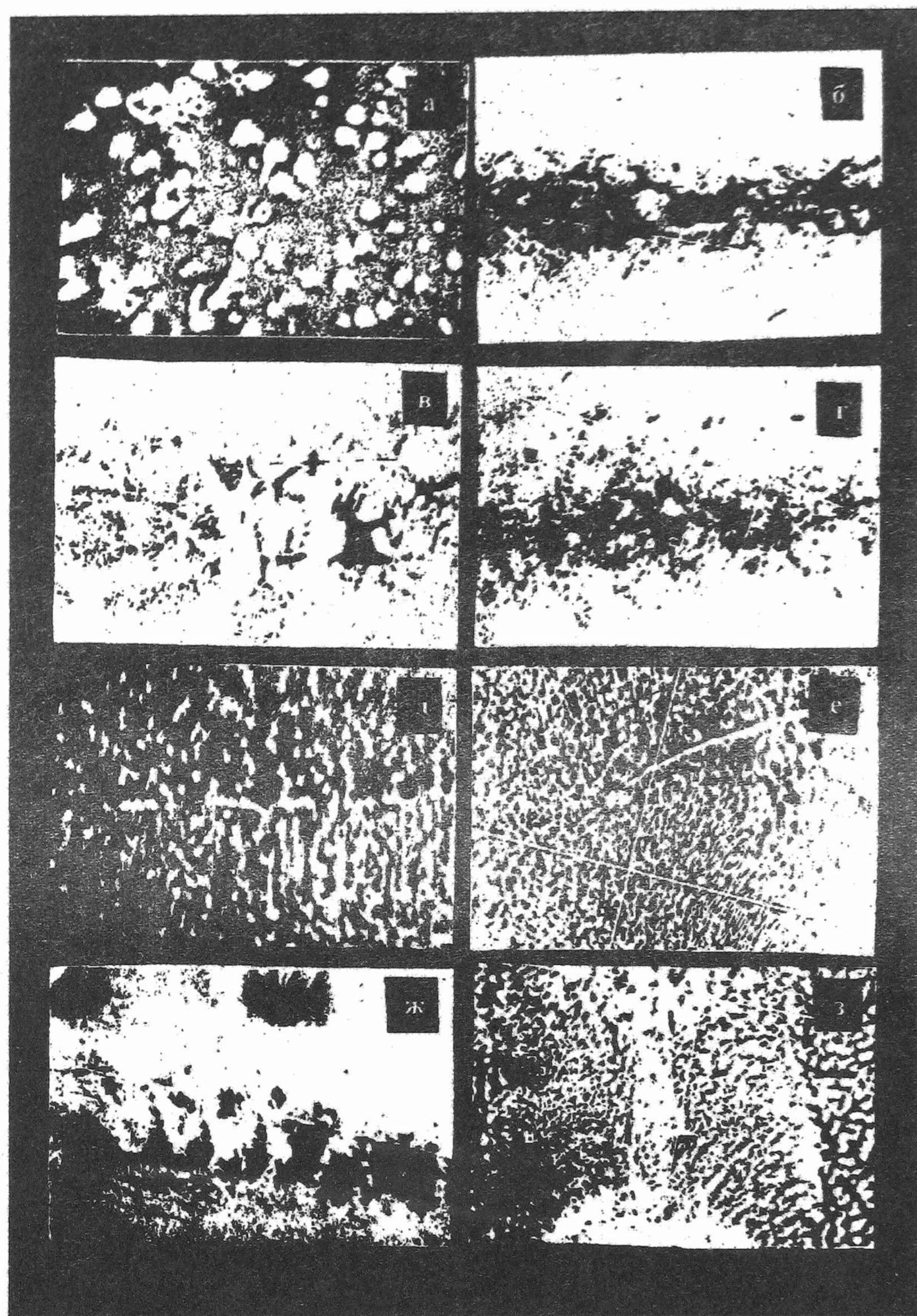


Рис. 1. Распределение игл антимонида никеля в антимониде индия при обработке образцов электронным лучем.

Наблюдается зеркальная поверхность $InSb$ с вкрапленными перпендикулярно к наблюдаемой поверхности иглами $NiSb$. Контрастный ярко-красный отлив игл позволяет определить их плотность и выявить ориентацию.

При исследовании в оптическом микроскопе продольного паза в кристалле $InSb$ на внутренней поверхности стенки часто наблюдались застывшие наплывы расплавленного металла. На рис.1б, в, ж дана фотография участка с затвердевшими наплывами полупроводника.

Дно продольной бороздки, образованной электронным лучом до травления и химического окрашивания можно рассматривать как застывший конгломерат переplava (рис.1в). Химическое окрашивание выявляет его структуру (рис.1г).

Дальнейшее травление позволяет наблюдать упорядоченные зоны переplava (рис.1г) дугообразной формы, расстояния между которыми равно $\approx 1,5$ мкм, это соответствует шагу шаговых двигателей, перемещающих обрабатываемый образец по заданной программе. Наличие таких зон можно объяснить, так как в процессе обработки в зоне взаимодействия электронного луча с образцом происходит не только испарение полупроводникового материала, но и электронно-лучевой переplav, сопровождающийся сегрегацией примеси.

Дальнейшая химическая полировка и окрашивание позволяет наблюдать слои, в которых видны иглы, но они расположены в перпендикулярном направлении, по отношению к первоначальному направлению игл в матрице обрабатываемого кристалла (рис.1д). Это можно объяснить, если предположить, что температура в тонком обрабатываемом слое при взаимодействии с пучком электронов была достаточна для расплавления $InSb$, но недостаточна для плавления игл антимонида никеля и они ориентировались в расплаве антимонида индия.

Более глубоко расположенные слои характеризуются наличием поликристаллической структуры. На границах кристаллов расположено скопление ямок травления и игл. По обе стороны от образовавшихся границ наблюдается различная ориентация игл (рис.1д, е).

Можно проследить характер и направление движения пучка и зоны кристаллизации после перехода пучка в следующую точку обрабатываемого кристалла (рис.1ж).

Использование электронного пучка для создания сложных конфигураций наталкивается на определенные трудности. Наблюдается неравномерность обработки при формировании прямых и острых углов (рис.1з.). В связи со значительным (по сравнению с другими областями обработки) выделением мощности на единичную площадь при переходе луча на перпендикулярную к первоначальной траекторию наблюдается ухудшение структуры обрабатываемого материала, как показано на рис.1 е, ж, з. Теплоотвод такой области незначителен, а процесс введения энергии в обрабатываемый кристалл характеризуется большой мощностью на единицу площади. Поэтому при резком изменении направления движения пучка вдоль поверхности обрабатываемого образца, возникают трудности в обеспечении равномерной прямолинейной ширины испаряемой зоны и равномерности распределения игл Ni в слое, прилегающем к поверхности микропаза.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о необходимости программирования не только перемещения электронного луча по образцу, но и регулировки энергии и интенсивности элементов. Энергия, вводимая в кристалл, должна обеспечивать неизменность структуры кристалла в процессе обработки. Компромиссным вариантом может быть случай минимального изменения структуры в тонком слое (толщиной в несколько микрон), который может быть удален травлением в полирующем травителе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранский П.И., Ключков В.П., Потыкевич И.В. Полупроводниковая электроника. К.: "Наукова думка", 1975.- 704 с.
2. Киреев П.С. Физика полупроводников. М.: "Высшая школа", - 1975. - 544 с.
3. Кузнецов В.А. и др. Измерения в электронике. М.: "Энергоатомиздат". 1987. - 512 с.
4. Шиллер З. и др. Электронно-лучевая технология. М.: "Энергия", - 1980.-528 с.

MAGNETIC RESISTORS AND HALL SENSORS ON THE BASIS OF COMPLEX SEMICONDUCTORS

N.M. Pelykhatiy¹, N.I. Kovalenko², A.K. Ghnay²

1. The Kharkov National university, Ukraine, 61077, Kharkov, Svoboda sq., 4
2. The Kharkov state agrarian university, Ukraine, 61483, Kharkov, p/o the Kommunist - 1.

The difficulties of applying of electron-beam technology for manufacturing sensors of a Hall of the difficult geometrical form are considered. The programming of motion of an electron beam should envision not only control of coordinate of moving, but also possible modulation on power.

KEY WORDS: sensors of a Hall conductive needles, electron beam, antimonide of indium, antimonide of a nickel, eutectica.



АЛЕКСАНДР ИЛЬИЧ АХИЕЗЕР

(31.10.1911 — 04.05.2000)

ПАМЯТИ АЛЕКСАНДРА ИЛЬИЧА АХИЕЗЕРА

Наука Украины и мировая наука понесли тяжелую утрату. На 89 году ушел из жизни академик НАН Украины, лауреат Государственной премии в области науки и техники Украины, заслуженный деятель науки Украины, профессор, доктор физико-математических наук **АХИЕЗЕР Александр Ильич** (31.10.1911 — 04.05.2000). Выдающийся физик, педагог, человек исключительно высоких моральных качеств, патриот и учитель нескольких поколений физиков, он был одним из создателей знаменитой харьковской школы теоретической физики.

А.И. Ахиезер родился в г. Черикове в Белоруссии в семье земского врача. Его научная деятельность началась в 1934 году в Харькове. После окончания Киевского политехнического института А.И. Ахиезер поступил в Харьковский физико-технический институт (в то время УФТИ), в теоретический отдел, которым руководил Л.Д. Ландау. Любовь и признательность к своему учителю А.И. Ахиезер пронес через всю жизнь. В 1938 году он становится (после Ландау) заведующим теоретическим отделом ХФТИ и руководит им до 1988 года. Во время Великой Отечественной войны А.И. Ахиезер продолжал работать в ХФТИ, эвакуированном в Алма-Ату. В 1944 году он был вызван в Москву, где до 1952 года работал (по совместительству) у И.В. Курчатова в Лаборатории №2 (Институт атомной энергии им.И.В. Курчатова). С 1945 года А.И. Ахиезер снова в Харькове, руководит теоретическим отделом ХФТИ.

Более полувека он преподавал в Харьковском университете. Начав в 1936 году преподавательскую деятельность в должности доцента, он после защиты докторской диссертации в 1940 году работал в должности профессора, заведывая кафедрой теоретической физики. А.И. Ахиезер был одним из организаторов отделения ядерной физики при физико-математическом факультете: создателем кафедры теоретической ядерной физики, которой руководил до 1973 года; одним из основателей физико-технического факультета. Он организовал в университете подготовку студентов по специальности «теоретическая физика»; заложил основные идеи изложения материала и руководил разработкой учебных планов общих теоретических курсов для студентов-физиков. Правильность заложенных им основ теоретической подготовки студентов подтверждается жизнью, выпускники физико-технического факультета, получив соответствующую подготовку, пользуются заслуженным авторитетом и спросом не только в Украине, но и в ближнем и дальнем зарубежье.

Он был подлинным научным лидером, учителем ряда поколений физиков-теоретиков, одним из создателей обширной и авторитетной харьковской теоретической школы. Некоторые из его учеников сами являются основателями научных школ. Среди учеников А.И. Ахиезера 33 доктора и 72 кандидата физико-математических наук, семь членов Национальной Академии Наук Украины (В.Г. Барьяхтар, Я.Б. Файнберг, Д.В. Волков, С.В. Пелетминский, А.Г. Ситенко, К.Н. Степанов, П.И. Фомин).

Благодаря инициативе и усилиям А.И. Ахиезера в Национальном научном центре ХФТИ создан Институт теоретической физики, в котором продолжают работать его ученики.

А.И. Ахиезер — уникальное явление в теоретической физике. Для всей его деятельности характерен широчайший спектр исследований. А.И. Ахиезер внес выдающийся вклад в развитие всех областей физики, он был поистине ученый энциклопедических знаний и гениальной интуиции. Работы его посвящены ядерной физике, квантовой электродинамике, физике элементарных частиц, физике плазмы, магнитной гидродинамике, теории твердого тела, магнетизму, физике взаимодействия частиц большой энергии с веществом.

А.И. Ахиезер развил теорию рассеяния фотона фотоном в области высоких энергий и теорию когерентного рассеяния фотона в поле ядра. Совместно с И.Я. Померанчуком выполнил пионерские исследования по рассеянию медленных нейтронов кристаллами и предсказал возможность получения «холодных» нейтронов, построил теорию резонансных ядерных реакций (1948) и теорию дифракционного рассеяния быстрых заряженных частиц ядрами (1949). В 1955 году с А.Г. Ситенко предсказал эффект дифракционного расщепления дейтрона и дал его теорию. Внес вклад в теорию и расчет линейных ускорителей электронов и более тяжелых частиц. Развил теорию радиационных поправок к ряду квантовоэлектродинамических процессов (совместно с Р.В. Половиным, 1963). Выполнял большой цикл работ по электродинамике адронов, в частности, с М.П. Рекало сформулировал правило эквидистантности для различных электромагнитных характеристик адронов (1964), модель кварков обобщил на электромагнитные процессы с участием адронов. Построил дифракционную теорию реакции срыва с участием трехнуклонных ядер (совместно с Ю.А. Бережным и А.П. Созником, 1996).

Совместно с Я.Б. Файнбергом предсказал (1948) пучковую неустойчивость плазмы, с Г.Я. Любарским и Р.В. Половинным сформулировал условие эволюционности и установил критерий устойчивости магнитогидродинамических волн. Впервые создал кинетическую теорию колебаний электронной плазмы в магнитном поле. Было предсказано явление электронного циклотронного резонанса (совместно с Л.Э. Паргаманником, 1948). Им было проведено исследование рассеяние электромагнитных волн в плазме на флуктуациях электронов и ионов (совместно с А.Г. Ситенко и И.Г. Проходой, 1957).

А.И. Ахиезер впервые сформулировал концепцию взаимодействующих между собой магнонов, на основе которой развил общую теорию релаксационных процессов в магнетиках (1946), и предсказал совместно с В.Г. Барьяхтаром и С.В. Пелетминским (1956) новое явление — магнитоакустический резонанс, построил (1959) теорию кинетических, релаксационных и высокочастотных процессов в ферродиелектриках. Выполнил основополагающие работы по теории поглощения звука в диэлектриках и металлах (1938), разработал теорию поглощения ультразвука в металлах совместно с М.И. Кагановым и Г.Я. Любарским (1957). Эти работы положили начало исследованиям по электронной акустике в СССР. Совместно с Н.Ф. Шульгой развил теорию квантовоэлектродинамических процессов при высоких энергиях в кристаллах.

Особое место в многогранной деятельности А.И. Ахиезера занимал интерес к философским и фундаментальным вопросам мироздания, что, в частности, нашло выражение в последней из написанных им книг «Развивающаяся физическая картина мира».

Педагогическая деятельность А.И. Ахиезера нашла адекватное воплощение в создании многочисленных учебников и научных монографий. Всего А.И. Ахиезер написал 23 монографии по физике. Среди них известные во всем мире монографии по теории ядра, квантовой электродинамике, спиновым волнам, электродинамике плазмы, электродинамике высоких энергий в веществе, физической кинетике, теории полей и их фундаментальным взаимодействиям, учебники практически по всем разделам общей физики. Эти книги сыграли выдающуюся роль в подготовке высококвалифицированных физиков во всем мире.

За выдающиеся научные заслуги и организационную деятельность А.И. Ахиезер был награжден орденами Трудового Красного Знамени и орденом «Знак Почета», Почетной грамотой президиума Верховного Совета Украины, знаками отличия президента Украины — орденами «За заслуги» III и II степени, медалями. Ему присуждено звание заслуженного деятеля науки Украины. А.И. Ахиезер удостоен академических премий им.Л.И. Мандельштама, Н.Н. Боголюбова, А.С. Давыдова, премии им.И.Я. Померанчука. Он также удостоен Государственной премии Украины за 1986 год.

Человек талантливый, огромной эрудиции, неиссякаемой энергии, оптимизма и работоспособности, необыкновенного обаяния и доброты, общительный и остроумный — таким он запомнился всем, кто имел счастье общаться с ним.

Память об Александре Ильиче Ахиезере навсегда останется в сердцах его учеников и друзей.

*Н.А. Азаренков, В.С. Бакиров,, В.Г. Барьяхтар, Ю.А. Бережной,
В.П. Демуцкий, И.И. Залюбовский, Ю.А. Кирочкин, В.Ф. Клетиков,
Б.Г. Лазарев, В.И. Лапшин, С.В. Пелетминский, А.Г. Ситенко,
К.Н. Степанов, Я.Б. Файнберг, П.И. Фомин, В.Д. Ходусов, Н.Ф. Шульга*

**ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
ЛАБОРАТОРИЯ ПРИКЛАДНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
И КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

ПРЕДЛАГАЕТ

Экспресс-проектирование и изготовление электронных приборов, информационно-измерительных систем, управляющих устройств, средств сопряжения научного, учебного, технологического оборудования с компьютерами любых платформ и программного обеспечения к ним.

НОВИНКА!

Линейные и импульсные блоки питания радиоэлектронной аппаратуры, в том числе - высоковольтные, а также источники бесперебойного питания с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Сервисное сопровождение всех разработок.

Контактный телефон: (0572) 352-834

E-mail: nicst@pht.univer.kharkov.ua

Збірник наукових робіт

**«Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна», № 490
серія фізична «Ядра, частинки, поля», 2000, вип.3 /11/**

Підписано до друку 30.08.2000

Формат 60 × 84 1/8

Умов. друк. арк. 12,36

Облік.-вид. арк. 9,89

Тираж 300.

Ціна договірна

61077, Харків, пл. Свободи, 4, Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна
Видавничий центр ХНУ.
Різо ХНУ

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРІВ

До редакції подається рукопис обсягом не менше 3 сторінок українською, російською або англійською мовами в двох примірниках з направленням установи і експертним висновком. Рукописи, які подаються до редакції, мають точно відповідати таким вимогам.

Текст друкується на білих аркушах формату А4 через один інтервал з високою якістю друку, придатною для фотокопіювання (рекомендується лазерний принтер). Застосовується редактор MS Word, шрифт Times New Roman (Cyr), розмір шрифту 10 pt., вирівнювання тексту по ширині. Поля справа і зліва по 2 см, зверху 3 см, знизу 2 см. Сторінки нумеруються послідовно на зворотному боці аркуша олівцем. Математичні та хімічні символи, рівняння і формули вводяться до тексту статті за допомогою комп'ютерної техніки. Рисунки в повністю придатному до репродукції вигляді вставляються до тексту в межах площі сторінки, вказаної вище. Рисунки виготовляються з використанням комп'ютерної техніки або виконуються тушшю на білому папері з друкованими цифрами і літерами на осях. Усі написи на рисунках та осях друкуються шрифтом не меншим за 8 pt. Підписи під рисунками друкуються шрифтом 9 pt. Формули, таблиці й рисунки нумеруються послідовно арабськими цифрами, наприклад: (1); Табл. 1; Рис. 1.

Послідовність розміщення матеріалу.

На першій сторінці зверху пропускаються два рядки; на третьому рядку в лівому верхньому куті друкується УДК (курсив, 9 pt.). Потім після пропуску одного рядка розміщується назва статті (прямий напівжирний шрифт, 12 pt., всі літери прописні, вирівнювання по центру). Після пропуску одного рядка друкуються ініціали та прізвища авторів (прямий напівжирний шрифт, 12 pt., вирівнювання по центру). У наступному рядку друкуються повні назви й адреси організацій авторів (шрифт курсив, 9 pt., вирівнювання по центру). Адреса електронної пошти друкується за бажанням авторів. Якщо організацій декілька, то для визначення авторів та організацій слід застосовувати виноски зірочкою або цифрами. У наступному рядку друкується дата надходження статті до редакції: число – цифрами, місяць – прописом, рік – цифрами (шрифт прямий, 9 pt., вирівнювання по центру).

Після пропуску одного рядка друкується реферат статті, 5-10 рядків, з коротким викладенням методичних підходів, запропонованих в роботі, та основних результатів. Слово “реферат” не друкується. Для тексту реферату застосовується прямий шрифт розміром 9 pt. У наступному рядку друкується 5-8 ключових слів (шрифт 9 pt.). Заголовок “**КЛЮЧОВІ СЛОВА:**” друкується прописом на тому ж рядку, що й ключові слова і виділяється напівжирним шрифтом. Текст реферату і ключові слова мають ширину на 1 см меншу, ніж основний текст (по 0,5 см з кожного боку).

Далі після пропуску одного рядка друкується основний текст статті. Абзаци починаються з червоного рядка (0,75 см). Рекомендується розбиття статті на такі розділи: вступ (назва цього розділу не друкується), **МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ** (обов'язково для експериментальних робіт), **РЕЗУЛЬТАТИ Й ОБГОВОРЕННЯ**, **ВИСНОВКИ**. Для теоретичних робіт передбачається більш вільне розташування матеріалу, наприклад, замість розділу **МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ** рекомендуються розділи **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ**, **МОДЕЛЬ** та ін. Розділи не нумеруються, в назвах розділів усі літери прописні й виділяються напівжирним шрифтом, вирівнювання по центру. При необхідності розділи поділяються на підрозділи. Назви підрозділів друкується з великої літери і виділяються напівжирним шрифтом, вирівнювання по центру. Після кожного розділу або підрозділу йде один пустий рядок.

У кінці тексту статті після пропуску одного рядка, якщо потрібно, наводиться назва фонду, який фінансував роботу, і номер гранту.

Використані в роботі літературні джерела нумеруються в порядку цитування в тексті, номер посилання друкується в квадратних дужках. Не допускаються посилання на неопубліковані роботи. Список літератури (шрифт 9 pt.) розміщується одразу за основним текстом статті й виділяється як розділ **СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**.

Після списку літератури до статті додається реферат англійською мовою. Після пропуску одного рядка дається назва статті прописом, шрифт прямий 10 pt., напівжирний, вирівнювання по центру. У наступному рядку — ініціали та прізвища авторів, шрифт прямий 10 pt., напівжирний, вирівнювання по центру. У наступному рядку друкується повна назва організації та її адреса (курсив 9 pt., вирівнювання по центру). Після пропуску одного рядка вміщується текст реферату (шрифт прямий 9 pt., вирівнювання по ширині, без червоного рядка). У наступному рядку після слів “**KEY WORDS:**” (прописом, шрифт прямий напівжирний, 9 pt.) вміщуються ключові слова (шрифт прямий 9 pt., вирівнювання по ширині).

Один примірник рукопису має бути підписаний на зворотному боці аркуша усіма авторами.

Рукописи, оформлені не у відповідності до наведених правил, не розглядатимуться.