

УДК 533. 915

ЗАЖИГАНИЕ РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ В КОМБИНИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

Н.Д. Харченко, В.А. Лисовский

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина

61077, Харьков, пл. Свободы 4, Украина

e-mail: nadine@list.ru

Поступила в редакцию 10 июня 2009 г.

В данной работе по аналогии трем режимам существования продольного комбинированного разряда предложено разделить зажигание разряда при одновременном наложении постоянного и высокочастотного электрических полей на три режима: 1) зажигание высокочастотного разряда (ВЧ), возмущенное постоянным электрическим полем; 2) зажигание в комбинированных полях; 3) зажигание разряда постоянного тока, возмущенное ВЧ электрическим полем. Показано, что наложение постоянного напряжения одновременно с высокочастотным сначала увеличивает ВЧ напряжение зажигания, по сравнению с самостоятельным ВЧ разрядом. Однако при достаточно больших постоянных напряжениях ВЧ напряжение зажигания комбинированного разряда уменьшается с увеличением постоянного напряжения и достигает нуля, когда зажигается самостоятельный разряд постоянного тока. Изучено влияние ВЧ напряжения на зажигание разряда постоянного тока. При наложении ВЧ напряжения большего, чем минимальное напряжение зажигания самостоятельного ВЧ разряда, кривая зависимости постоянного напряжения зажигания комбинированного разряда от давления газа состоит из двух частей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: комбинированный разряд, высокочастотный емкостный разряд, разряд постоянного тока, зажигание разряда, разряд низкого давления, азот, аргон.

LOW PRESSURE GAS BREAKDOWN IN COMBINED ELECTRIC FIELDS

N.D. Kharchenko, V.A. Lisovskiy

Kharkov National University

4 Svobody sq., Kharkov, 61077, Ukraine

In this work by analogy to the three modes of the combined (RF+DC) discharges existence, we distinguish the ignition of the combined discharges also in three modes: 1) RF breakdown perturbed by the DC electric field, 2) breakdown in the combined field, 3) DC breakdown perturbed by the RF electric field. It is shown that application of the DC voltage combined with the RF first increases the RF breakdown voltage compared to the breakdown voltage of self-sustained RF discharge. However at sufficiently high DC voltages the DC field starts to contribute to the ionization of gas molecules, RF breakdown voltage goes down with the increasing of the DC voltage applied to the combined discharge and equals to zero, when the self-sustained DC discharge ignites. The DC breakdown curve, influenced by the RF voltages higher than the minimum RF breakdown voltage $U_{rf,min}$, consists of two parts.

KEY WORDS: combined discharge, RF capacitively coupled discharge, DC discharge, gas breakdown, low pressure discharge, nitrogen, argon.

ЗАПАЛЮВАННЯ РОЗРЯДУ НИЗЬКОГО ТИСКУ В КОМБІНОВАНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛЯХ

Н.Д. Харченко, В.О. Лисовський

Харківський національний університет

61077, Харків, пл. Свободи 4, Україна

В цій роботі аналогічно трьом режимам існування попереміжного комбінованого розряду запропоновано розділити запалювання розряду при одночасному прикладенні постійного та високочастотного електричних полів на три режими: 1) запалювання високочастотного розряду (ВЧ), збурене постійним електричним полем; 2) запалювання в комбінованих полях; 3) запалювання розряду постійного струму, збурене ВЧ електричним полем. Показано, що прикладення постійної напруги одночасно з ВЧ спочатку збільшує ВЧ напругу запалення, у порівнянні з самостійним ВЧ розрядом. Однак, при достатньо великих значеннях постійної напруги, ВЧ напруга запалювання комбінованого розряду зменшується зі зростанням постійної напруги та досягає нульового значення, коли запалюється самостійний розряд постійного струму. Вивчено вплив ВЧ напруги на запалювання розряду постійного струму. Якщо прикладати ВЧ напругу більшу, ніж мінімальна напруга запалювання самостійного ВЧ розряду, крива залежності постійної напруги запалювання комбінованого розряду від тиску газу складається з двох частин.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: комбінований розряд, високочастотний ємнісний розряд, розряд постійного струму, запалювання розряду, розряд низького тиску, азот, аргон.

Газовий разряд в комбинированных полях, когда ВЧ и постоянное напряжения прикладываются одновременно к одним и тем же электродам, используется в различных плазменных технологиях, например, для травления различных материалов, плазменной очистки технологических газоразрядных камер, в плазмохимии, для накачки газовых лазеров, стерилизации медицинских инструментов и т.д. [1-5]. Например, в работе [1] показано, что приложение дополнительного отрицательного потенциала к ВЧ электроду значительно повышает плотность разрядной плазмы и ускоряет процесс травления полупроводниковых пластин и модификации поверхностей материалов. Наложение постоянного напряжения на горящий ВЧ емкостный разряд позволило

вложить в плазму газоразрядного CO_2 лазера вплоть до 27 МВт мощности [3-4]. Комбинация постоянного и переменного электрических полей повышает устойчивость горения газового разряда и позволяет вкладывать в разряд большую мощность, что важно для достижения оптимальных условий проведения технологических процессов [3-7]. Для оптимизации плазменных технологий также необходимо знать условия зажигания комбинированного разряда в различных газах и при различных комбинациях постоянного и ВЧ напряжений, приложенных к разрядному промежутку. В литературе довольно широко рассмотрены условия зажигания самостоятельного ВЧ разряда в различных газах и разрядных камерах [8-11]. Зажигание разряда постоянного тока исследовано подробно, например, в работах [12-16]. Вопрос о зажигании продольного комбинированного разряда изучен не так широко. Например, автором [17] при работе с радарными системами, использующими газовый разряд низкого давления, было обнаружено повышение пробойного ВЧ напряжения при одновременном приложении постоянного напряжения к разрядному промежутку при давлении смеси водорода с аргоном, равном $p = 50$ Торр. Автор работы [18] отметил, что повышение пробойного ВЧ напряжения в комбинированном электрическом поле было обнаружено ранее в работе [19]. Кроме того, в работе [19] экспериментально показано, что ВЧ разряд можно погасить наложением постоянного напряжения. Авторы [20] исследовали зажигание поперечного комбинированного разряда в скрещенных высокочастотном и постоянном электрических полях. В работе [10] показано, что наложение постоянного напряжения на ВЧ разряд с частотой $f = 20$ МГц приводит к увеличению пробойного напряжения для давления смеси O_2 с CCl_4 , равного $p = 98$ Торр. В работе [11] также наблюдалось повышение ВЧ напряжения зажигания комбинированного разряда по сравнению с самостоятельным ВЧ разрядом. В работах [21, 22] изучалось экспериментально и с помощью численного моделирования зажигание ВЧ разряда, комбинированного с постоянным электрическим полем, в диапазоне давлений аргона $p = 1 \div 10$ Торр для чистых, а также покрытых стеклом электродов из алюминия. Для чистых алюминиевых электродов получено, что наложение постоянного напряжения сначала увеличивает величину пробойного ВЧ напряжения, но, начиная с некоторого критического значения величины постоянного напряжения, ВЧ пробойное напряжение комбинированного разряда уменьшается. Этот эффект не наблюдался для электродов, покрытых стеклом, что связано с различными значениями коэффициента вторичной ион-электронной эмиссии у стекла и алюминия. В работе [9] экспериментально и теоретически изучен ВЧ и продольный комбинированный (ВЧ и постоянное электрическое поля) пробой в различных сортах газа и для различных расстояний между электродами. Предложено выделить на кривой зажигания ВЧ разряда мультипакторную, Пашеновскую и диффузионно-дрейфовую ветви. Аналитически выведен критерий пробоя газа в комбинированных полях, учитывающий анизотропию диффузии электронов. В работе [23] приведены результаты моделирования пробоя газа в комбинированных полях с учетом вторичной эмиссии с электродов. Показано совпадение результатов моделирования с результатами эксперимента, представленными авторами [24]. В работе [24] зажигание разряда в продольных комбинированных полях (ВЧ и постоянное электрическое) изучалось экспериментально и теоретически. Приведена аналитическая модель, описывающая пробой газа в комбинированном поле, а также экспериментальные данные для воздуха в разрядной камере с расстояниями между электродами $L = 7,5$ мм и $L = 23$ мм и для аргона при $L = 23$ мм. Показано, что наложение небольшого постоянного напряжения одновременно с высокочастотным увеличивает ВЧ напряжение зажигания разряда. Однако в работе [24] рассматривается только влияние постоянного напряжения на ВЧ пробой, и совсем не изучен вопрос о влиянии ВЧ напряжения на зажигание разряда постоянного тока, кроме того, в работе [24] не изучено экспериментально зажигание разряда в азоте, а также в аргоне для узких зазоров.

Кроме того, целесообразно установить параметры зажигания комбинированного разряда для небольших зазоров ($L \sim 10$ мм) между электродами, так как при узких зазорах ВЧ кривые зажигания имеют не только диффузионно-дрейфовую, но и Пашеновскую ветви. При больших зазорах между электродами ВЧ кривая зажигания обычно состоит только из диффузионно-дрейфовой ветви.

В связи с этим, данная работа посвящена изучению влияния ВЧ напряжения на зажигание разряда постоянного тока в камерах с расстоянием между электродами $L \approx 10$ мм в азоте и аргоне. Впервые показано, что если для зажигания комбинированного разряда приложить ВЧ напряжение большее, чем минимальное напряжение зажигания самостоятельного ВЧ разряда, то кривая зависимости постоянного напряжения зажигания от давления газа в камере состоит из двух частей. В зависимости от соотношения постоянного и ВЧ напряжений, приложенных к разрядному промежутку, предложено различать зажигание комбинированного разряда в трех режимах: 1) зажигание высокочастотного разряда (ВЧ), возмущенное постоянным электрическим полем; 2) зажигание в комбинированных полях; 3) зажигание разряда постоянного тока, возмущенное ВЧ электрическим полем.

Целью нашей работы было изучение зажигания разряда низкого давления в продольных комбинированных (ВЧ и постоянном электрическом) полях.

УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились при давлениях азота и аргона $p = 0,01 - 10$ Торр в диапазоне амплитудных значений ВЧ напряжения $U_{rf} \leq 1200$ В, постоянного напряжения $U_{dc} \leq 1000$ В и частоте ВЧ поля $f = 13,56$ МГц. Схема нашей экспериментальной установки показана на рис. 1. Электроды полностью перекрывали все сечение

разрядной трубки из кварца с внутренним диаметром 100 мм, которая вакуумно уплотнялась между ними. Расстояние между плоскими параллельными электродами из нержавеющей стали в экспериментах с аргоном было равно $L = 12$ мм, с азотом - $L = 10$ мм. ВЧ напряжение прикладывалось к одному из электродов, второй электрод был заземлен. ВЧ электрод одновременно служил «катодом», т.к. на него подавался отрицательный постоянный потенциал.

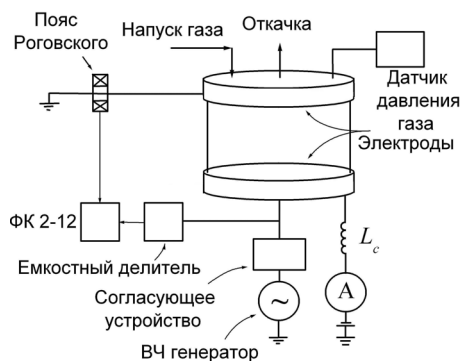


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

Система напуска газа поставляла газ через множество маленьких отверстий в заземленном электроде. Разрядная камера откачивалась через систему отверстий в этом же электроде. Это позволяло напускать и откачивать газ однородно по площади электродов, что играет важную роль в технологических процессах (например, при травлении полупроводниковых материалов). Для регистрации давления газа в диапазоне от 10^{-3} Торр до атмосферного мы использовали вакуумный термоэлектрический датчик 13ВТ3-003. Откачка газа производилась с помощью форвакуумного и турбомолекулярного насосов, что обеспечивало предельный вакуум порядка 10^{-6} Торр. Высокочастотный генератор подключался к потенциальному электроду через согласующее устройство П-типа. Источник постоянного напряжения подключался к этому же электроду с помощью дросселя $L_c = 4$ мГн, чтобы предотвратить повреждение источника ВЧ током.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

По аналогии трем режимам горения продольного комбинированного разряда [25], разделим зажигание комбинированного разряда на три режима: 1) зажигание высокочастотного разряда (ВЧ), возмущенное постоянным электрическим полем; 2) зажигание в комбинированных полях; 3) зажигание разряда постоянного тока, возмущенное ВЧ электрическим полем. На рис.2 показаны измеренные в данной работе кривые

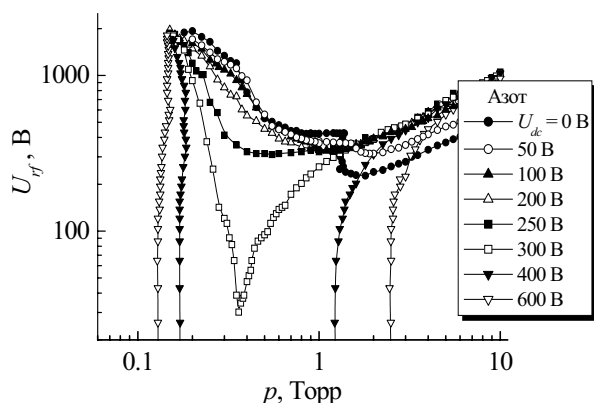


Рис.2. Кривые зажигания комбинированного разряда в азоте при различных фиксированных значениях постоянного напряжения.

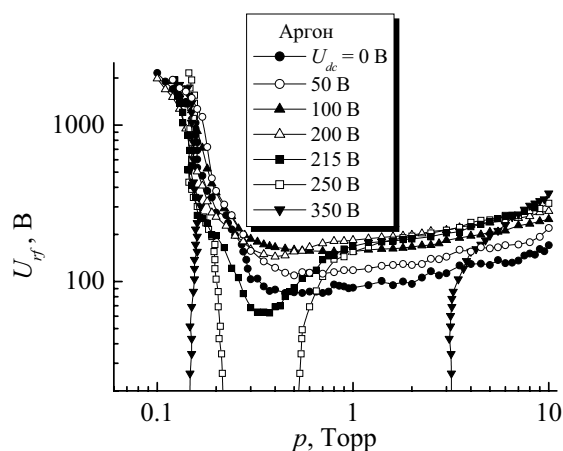


Рис.3. Кривые зажигания комбинированного разряда в аргоне при различных фиксированных значениях постоянного напряжения.

зажигания комбинированного разряда в азоте при различных фиксированных значениях постоянного напряжения. ВЧ кривая зажигания разряда ($U_{dc} = 0$) при расстоянии между электродами $L = 10$ мм имеет область неоднозначной зависимости напряжения зажигания от давления газа [9]. Однако при наложении даже небольшого постоянного напряжения ($U_{dc} = 50$ В) область неоднозначности исчезает. Кроме того, увеличение постоянного напряжения приводит к повышению пробойного напряжения на диффузионно-дрейфовой ветви кривой зажигания комбинированного разряда по сравнению с самостоятельным ВЧ разрядом. Таким образом, наблюдается зажигание комбинированного разряда в первом режиме (зажигание ВЧ разряда, возмущенное постоянным электрическим полем). Затем, начиная с $U_{dc} \approx 250$ В, на кривых зажигания комбинированного разряда появляется глубокий минимум в диапазоне давлений, соответствующих минимуму на кривой зажигания разряда постоянного тока. При таких напряжениях постоянное поле, приложенное одновременно с высокочастотным, дает существенный вклад в ионизацию газа в объеме, облегчая тем самым его пробой. В данном случае наблюдается зажигание комбинированного разряда во втором режиме («зажигание в комбинированных электрических полях»).

На рис. 3 показаны измеренные кривые зажигания комбинированного разряда в аргоне при различных фиксированных значениях постоянного напряжения в разрядной камере с расстоянием между электродами

$L = 12$ мм. В таких экспериментальных условиях на кривой зажигания ВЧ разряда в аргоне наиболее широко представлена диффузионно-дрейфовая ветвь, в то время как Пашеновская ветвь существует в довольно узком диапазоне давлений аргона $p = 0,12 \div 0,25$ Торр.

Одним из интересных и ранее не изученных вопросов комбинированного пробоя является влияние ВЧ напряжения на зажигание разряда постоянного тока.

Приложение постоянного напряжения одновременно с высокочастотным увеличивает ВЧ напряжение зажигания, по сравнению с самостоятельным ВЧ разрядом. Для разряда в азоте мы наблюдали эффект увеличения ВЧ пробойного напряжения в диапазоне давлений $p \geq 1,4$ Торр (см. рис. 4), что соответствует диффузионно-дрейфовой ветви на кривой зажигания самостоятельного ВЧ разряда (см. рис. 2). Для разряда в аргоне повышение напряжения зажигания комбинированного разряда наблюдается почти во всем исследованном в данной работе диапазоне давлений (см. рис. 5). При таких экспериментальных условиях на кривой зажигания ВЧ разряда в аргоне наиболее широко представлена диффузионно-дрейфовая ветвь, в то время как Пашеновская ветвь наблюдается в довольно узком диапазоне давлений аргона. Коэффициент продольной диффузии электронов в электрическом поле в аргоне выше, чем в азоте [26, 27]. Вследствие этого происходит расплывание электронного облака в аргоне. Таким образом, в процессе осцилляций электронного облака от одного электрода к другому число электронов, ушедших в электрод за каждые полпериода ВЧ поля, меньше, чем в азоте. Следовательно, в разрядном промежутке остается большее количество частиц, которые и

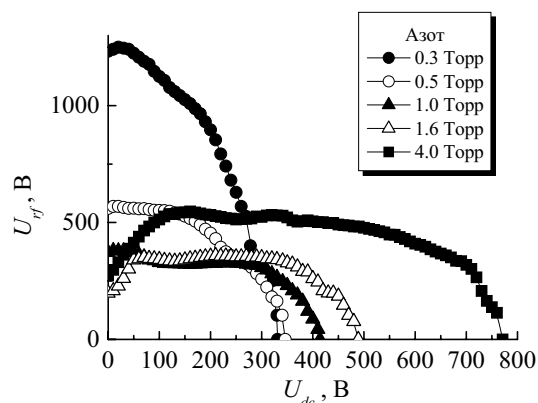


Рис. 4. Зависимость ВЧ пробойного напряжения от приложенного постоянного напряжения зажигания комбинированного разряда при различных фиксированных давлениях азота.

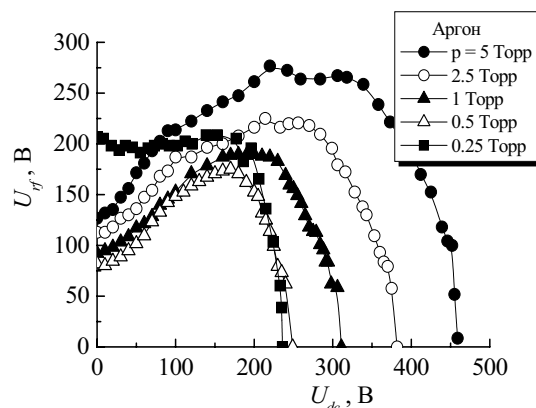
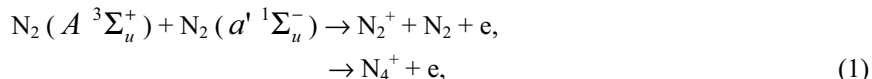


Рис. 5. Зависимость ВЧ пробойного напряжения от приложенного постоянного напряжения зажигания комбинированного разряда при различных фиксированных давлениях аргона.

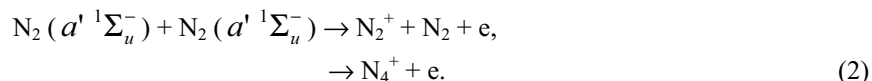
обеспечивают достаточный уровень ионизации при пробое газа при пониженном давлении. Поэтому кривая зажигания ВЧ разряда в аргоне не имеет области неоднозначной зависимости ВЧ пробойного напряжения от давления газа при небольшом расстоянии между электродами [9], в отличие от зажигания разряда в азоте. Если к разрядному промежутку приложено только ВЧ поле, зажигание происходит в тот момент, когда уровень ионизации в разрядном объеме становится достаточным, чтобы компенсировать потери электронов из-за диффузии на стенки камеры и электроды. Однако, если мы одновременно с высокочастотным прикладываем еще и постоянное электрическое поле, потери электронов увеличиваются из-за появления постоянного потока электронов, направленного к “аноду”. В таком случае для зажигания комбинированного разряда в первом режиме необходимо прикладывать большее ВЧ напряжение, чем для зажигания самостоятельного ВЧ разряда. На рис. 5 этот эффект наблюдается в диапазоне давлений $p \geq 0,3$ Торр. В таких экспериментальных условиях наблюдается зажигание комбинированного разряда в первом режиме (ВЧ разряд, возмущенный постоянным полем). При достаточно больших постоянных напряжениях, приложенных к разрядному промежутку, постоянное поле дает значительный вклад в ионизацию молекул газа. Кроме того, вторичная ион-электронная эмиссия играет значительную роль в поддержании достаточного уровня ионизации для осуществления пробоя. ВЧ пробойное напряжение зажигания комбинированного разряда резко уменьшается с ростом постоянного напряжения до тех пор, пока не зажигается самостоятельный разряд постоянного тока. При этом наблюдается зажигание комбинированного разряда в третьем режиме: зажигание разряда постоянного тока, возмущенное ВЧ электрическим полем.

На наш взгляд, наиболее интересным для изучения является зажигание комбинированного разряда во втором режиме (“комбинированный разряд”), когда вклад ВЧ и постоянного напряжений в ионизацию молекул газа является приблизительно одинаковым. На рис. 5 для разряда в аргоне эти участки не явно выражены и являются переходными областями между зажиганием разряда в первом и третьем режимах. На рис. 4 для разряда в азоте второй режим зажигания соответствует горизонтальным участкам зависимостей ВЧ пробойного напряжения от приложенного постоянного напряжения. По-видимому, в условиях, когда исследуется пробой газа на Пашеновской ветви кривой зажигания ВЧ разряда, основную роль в пробое газа играют не электроны. Механизм комбинированного пробоя в азоте во втором режиме аналогичен ВЧ пробую в области минимума

Пашеновской ветви. Приложение постоянного напряжения привело бы к выметанию электронов из разрядного промежутка, и, следовательно, к снижению уровня ионизации в объеме и увеличению пробойного напряжения. Однако на рис. 4 для азота (а также на рис. 5 для аргона при $p = 0,25$ Торр) видно, что на кривых зависимости ВЧ пробойного напряжения от приложенного постоянного напряжения имеется участок, где наложение постоянного напряжения практически не влияет на величину пробойного ВЧ напряжения. Видимо, в таких экспериментальных условиях важную роль в создании достаточного уровня ионизации и зажигании комбинированного разряда играет ассоциативная ионизация:



а также



Здесь $\text{N}_2 (A^3\Sigma_u^+)$ и $\text{N}_2 (a'^1\Sigma_u^-)$ – метастабильные состояния молекулы азота с энергиями 6,2 эВ и 8,4 эВ, соответственно. Значительную роль в поддержании достаточного для зажигания уровня ионизации могут играть также атомы азота $\text{N}(^4\text{S})$. Столкновение этих атомов, а также метастабильных состояний молекул азота с электродами и стенками разрядной камеры может быть причиной увеличения вторичной ион-электронной эмиссии. Кроме того, фотоэмиссия может также играть значительную роль в зажигании комбинированного разряда. Выяснение механизмов зажигания комбинированного разряда во втором режиме в условиях

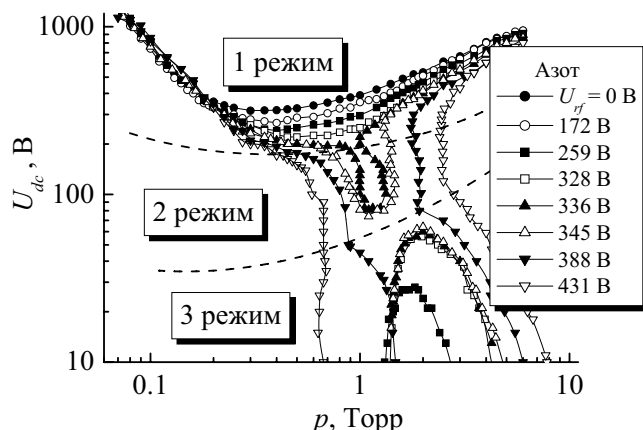


Рис.6. Пробойные постоянные напряжения в азоте при различных фиксированных значениях ВЧ напряжения.

Пашеновской ветви ВЧ кривой зажигания является целью для проведения дальнейших исследований.

Теперь рассмотрим влияние ВЧ напряжения на зажигание разряда постоянного тока. На рис. 6 приведены зависимости пробойного постоянного напряжения от давления азота при различных фиксированных значениях приложенного ВЧ напряжения. Из рисунка видно, что наложение даже небольшого ($U_{rf} = 172$ В) ВЧ напряжения облегчает зажигание разряда по сравнению с зажиганием самостоятельного разряда постоянного тока. В комбинированном электрическом поле электроны приобретают большую энергию, степень ионизации газа увеличивается, что облегчает зажигание разряда. В диапазоне $U_{rf} \leq 330$ В приложение ВЧ напряжения одновременно с постоянным

приводит к снижению пробойного постоянного напряжения комбинированного разряда. Вследствие этого кривые зажигания сдвигаются вниз по оси ординат, сохраняя форму, схожую с формой Пашеновских кривых (см. рис. 6). В таких условиях мы наблюдаем зажигание комбинированного разряда в третьем режиме – зажигание разряда постоянного тока, возмущенное ВЧ напряжением.

Кривая зажигания разряда постоянного тока при одновременном наложении ВЧ напряжения (величина которого выше, чем минимальное напряжение пробоя самостоятельного ВЧ разряда $U_{rf,min}$) состоит из двух частей. Нижняя часть кривой зажигания в комбинированных полях на рис. 6 имеет форму дуги, достигающей нулевых значений при таких давлениях азота, когда приложенное ВЧ напряжение приводит к зажиганию самостоятельного ВЧ разряда. В этой области зажигание комбинированного разряда происходит в первом режиме – ВЧ пробой, возмущенный постоянным электрическим полем. Два значения давления, при которых кривая комбинированного пробоя достигает нуля, расположены с двух сторон от минимального значения напряжения на кривой зажигания ВЧ разряда в азоте на рис. 2 ($U_{rf,min} \approx 230$ В). В диапазоне между этими двумя значениями давлений ВЧ разряд зажигается при ВЧ напряжениях меньших, чем выбранное нами $U_{rf} > U_{rf,min}$. Чтобы измерить точку на нижней ветви кривой зажигания комбинированного разряда, при фиксированном значении давления газа и ВЧ напряжении необходимо было сначала скачком приложить большее постоянное напряжение, чем напряжение зажигания, а затем плавно уменьшать его до наступления пробоя. А чтобы измерить точку на верхней части кривой, напряжение после скачка до $U_{dc} \approx 120$ В (см. рис. 7) при фиксированном давлении нужно было повышать постоянное напряжение до наступления пробоя. Также для измерения двух частей кривых зажигания на рис. 6 и 7 можно было сначала уменьшить давление газа (до 0,5 Торр для азота и до 0,1 Торр для аргона), потом установить необходимую величину ВЧ напряжения и предполагаемую величину напряжения зажигания постоянного напряжения (например, 80 В для азота и 120 В для аргона). Величина выбранного постоянного напряжения должна находиться между верхней и нижней

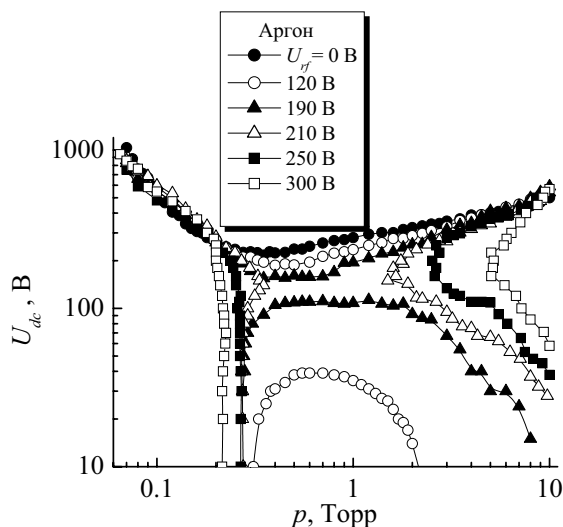


Рис.7. Пробойные постоянные напряжения в аргоне при различных фиксированных значениях ВЧ напряжения.

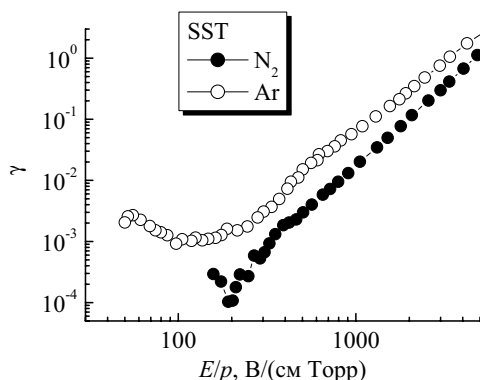


Рис.8. Значения коэффициента вторичной ион-электронной эмиссии в зависимости от соотношения постоянного электрического поля и давления газа для азота и аргона, катод – нержавеющая сталь.

Для этого зависимость α/p от E/p была получена с помощью численного кода Bolsig, который позволяет определить коэффициенты переноса электронов в ряде газов с наложенным постоянным электрическим полем E . В данной работе были также использованы результаты экспериментов и расчетов работ [27-32] и получены аппроксимационные формулы $\alpha/p(E/p)$ для аргона

$$\frac{\alpha}{p} = 1150 \cdot \exp \left[-\frac{19}{(E/p)^{0.238}} - 0,0021 \cdot \left(\frac{E}{p} \right)^{0.89} \right] \quad (4)$$

и азота

$$\frac{\alpha}{p} = 134 \cdot \exp \left[-\frac{65}{(E/p)^{0.53}} - 0,0021 \cdot \left(\frac{E}{p} \right)^{0.853} \right]. \quad (5)$$

Здесь α/p имеет размерность $[\text{см}^{-1}\text{Torr}^{-1}]$, а приведенное электрическое поле E/p - $[\text{В см}^{-1}\text{Torr}^{-1}]$. Из представленных на рис. 6 и 7 кривых зажигания разряда постоянного тока $U_{dc}(p)$ (при $U_{rf}=0$) с помощью формул (3)-(5) определены зависимости $\gamma(E/p)$ для аргона и азота (см. рис. 8). Из рис. 8 видно, что значения коэффициента вторичной ион-электронной эмиссии из поверхности катода при бомбардировке его ионами аргона выше, чем для ионов азота, во всем диапазоне соотношений E/p . Более интенсивная вторичная ион-электронная эмиссия при зажигании разряда в аргоне приводит к переходу комбинированного пробоя газа из первого режима в третий, практически минуя второй (за исключением случая низких давлений, когда на ВЧ кривой зажигания имеется Пашеновская ветвь – на рис. 5 кривая для $p=0,25$ Torr). В азоте переход комбинированного пробоя из второго в третий режим наступает при гораздо более высоких постоянных напряжениях ($U_{dc} > 300$ В), чем в аргоне ($U_{dc} \approx 150-300$ В). Второй режим зажигания разряда в комбинированных полях наблюдается, когда ВЧ напряжение, прикладываемое к разряду постоянного тока, достигает значения, соответствующего минимуму на Пашеновской ветви кривой зажигания самостоятельного

частями кривой зажигания на рис. 6 и 7 для азота и аргона, соответственно. Затем давление газа плавно повышалось до необходимого фиксированного значения. После этого повышением или понижением постоянного напряжения до момента пробоя газа можно было измерить, соответственно, верхнюю или нижнюю части кривой зажигания.

Верхняя часть каждой из кривых зажигания для ВЧ напряжения, меньшего, чем минимальное на Пашеновской ветви кривой зажигания ВЧ разряда ($U_{rf} \approx 330$ В), имеет форму, схожую с кривой зажигания разряда постоянного тока, однако, сдвинута в область более низких постоянных напряжений и более высоких давлений (см. рис. 6). Таким образом, для одного и того же ВЧ напряжения, комбинированного с постоянным, можем наблюдать зажигание в двух режимах. Верхняя часть кривой зажигания соответствует зажиганию в третьем режиме комбинированного разряда, а нижняя – в первом. Критическое значение давления, при котором происходит разделение кривой зажигания на две части, соответствует давлению точки поворота на кривой зажигания самостоятельного ВЧ разряда ($p \approx 1,2$ Torr).

Используя уравнение пробоя Таунсенда [15]

$$\gamma [e^{\alpha L} - 1] = 1, \quad (3)$$

(где α - первый коэффициент Таунсенда для ионизации, γ - коэффициент ион-электронной эмиссии) можно построить зависимость γ от отношения постоянного электрического поля к давлению газа (приведенного электрического поля E/p) для азота и аргона. Так как коэффициент γ зависит не только от сорта газа, но и материала и состояния поверхности катода, то целесообразно определить γ при условиях наших экспериментов.

ВЧ разряда. Для этой ветви минимальное напряжение зажигания не зависит от длины разрядного промежутка и частоты приложенного ВЧ поля [33]. Кроме того, как видно из рис. 4, в условиях Пашеновской ветви для разряда в азоте наложение постоянного напряжения практически не влияет на напряжение зажигания комбинированного разряда. Глубокие минимумы на кривых пробойных постоянных напряжений на рис. 6 соответствуют горизонтальным участкам зависимостей ВЧ пробойного напряжения от приложенного постоянного напряжения на рис. 4. Таким образом, когда одновременно с постоянным мы прикладываем ВЧ напряжение, соответствующее минимальному на Пашеновской ветви кривой зажигания ВЧ разряда в азоте ($U_{rf} \approx 330$ В), появляется резкий минимум на кривых зажигания в постоянном поле. При этом наблюдается пробой газа и зажигание комбинированного разряда во втором режиме (“комбинированный разряд”), когда приложенные ВЧ и постоянное электрические поля имеют сравнимые значения. На кривых зажигания комбинированного разряда в аргоне глубокие минимумы не наблюдаются (см. рис. 7). При дальнейшем увеличении ВЧ напряжения ($U_{rf} > 350$ В) верхняя и нижняя части кривых зажигания комбинированного разряда как для аргона, так и для азота соединяются (см. рис. 6 и 7).

На рис. 7 изображены кривые зажигания комбинированного разряда в аргоне при различных фиксированных значениях ВЧ напряжения. Поскольку минимальное ВЧ напряжение пробоя в данных экспериментальных условиях $U_{rf,min} = 65$ В, то приложение одновременно с постоянным ВЧ напряжения $U_{rf} = 120$ В приводит к разделению кривой зажигания комбинированного разряда на две части. Аналогично случаю для азота, верхняя часть кривой соответствует пробойю в третьем режиме (пробой в постоянном поле, возмущенный ВЧ напряжением), а нижняя – в первом (пробой в ВЧ поле, возмущенный постоянным напряжением). При $U_{rf} \geq 200$ В верхняя и нижняя части кривых комбинированного пробоя соединяются.

Таким образом, из полученных нами результатов экспериментов следует, что зажигание комбинированного разряда может происходить в одном из трех возможных режимов: 1) зажигание высокочастотного разряда, возмущенное постоянным электрическим полем; 2) зажигание в комбинированных полях; 3) зажигание разряда постоянного тока, возмущенное ВЧ электрическим полем. Режим, в котором будет наблюдаться зажигание, зависит от сорта и давления газа в разрядной камере и соотношения ВЧ и постоянного напряжений, приложенных к электродам. При ВЧ напряжениях, больших, чем минимальное напряжение зажигания ВЧ разряда, кривая зажигания комбинированного разряда для одного и того же фиксированного напряжения состоит из двух частей. Верхняя часть соответствует зажиганию комбинированного разряда в третьем режиме, а нижняя – в первом. При ВЧ напряжениях, превышающих минимальное на Пашеновской ветви кривой зажигания ВЧ разряда, наложение постоянного напряжения приводит к зажиганию комбинированного разряда во втором режиме.

ВЫВОДЫ

В данной работе показано, что зажигание комбинированного разряда можно разделить на три режима: 1) зажигание высокочастотного разряда (ВЧ), возмущенное постоянным электрическим полем; 2) зажигание в комбинированных полях; 3) зажигание разряда постоянного тока, возмущенное ВЧ электрическим полем. Изучено влияние постоянного напряжения на ВЧ пробой в разрядных камерах с $L \sim 10$ мм между электродами в азоте и аргоне, так как при узких зазорах ВЧ кривые зажигания имеют не только диффузионно-дрейфовую, но и Пашеновскую ветви. Наложение небольшого постоянного напряжения приводит к увеличению ВЧ пробойного напряжения. При дальнейшем росте постоянного напряжения ВЧ пробойное напряжение достигает максимума, а затем уменьшается и достигает нуля, когда постоянное напряжение становится достаточным для зажигания самостоятельного разряда постоянного тока. Также в данной работе изучено влияние ВЧ напряжения на пробой газа в постоянном электрическом поле. При наложении ВЧ напряжения большего, чем минимальное напряжение зажигания самостоятельного ВЧ разряда, кривая зависимости постоянного напряжения зажигания от давления газа в камере состоит из двух частей для одной и той же величины ВЧ напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lai W.T., Hwang C.J., Wang A.T., Yau J.C., Liao J.H., Chen L.H., Adachi K., Okamoto S. Etch uniformity control by gap and DC superposition at 65 nm metal hard-mask dual damascene // Proceedings of the International Symposium on Dry Process. Japan: Nagoya, Institute of Electrical Engineers; 2006. - P.109.
2. Kawamura E., Lieberman M.A., Lichtenberg A.J., Hudson E.A. Capacitive discharges driven by combined dc/rf sources // J. Vac. Sci. Technol. A. – 2007. - Vol. 25, № 5. – P. 1456-1474.
3. Eckbreth A.C., Davis J.W. Rf augmentation in CO₂ closed-cycle dc electric-discharge convection lasers // Appl. Phys. Lett. – 1972. – Vol. 21, № 1. - P. 25-27.
4. Brown C.O., Davis J.W. Closed-cycle performance of a high-power electric-discharge laser // Appl. Phys. Lett. - 1972. - Vol. 21, № 10. - P. 480-481.
5. Denpoh K., Ventzek P.L.G. Test particle simulation of the role of ballistic electrons in hybrid dc/rf capacitively coupled plasmas in argon // J. Vac. Sci. Technol. A. – 2008. – Vol. 26, № 6. - P. 1415-1424.
6. Рахимова Т.В., Рахимов А.Т. К вопросу о стабилизации газового разряда высокочастотным электрическим полем // Физика плазмы. - 1975. - Т. 1, № 5. - С. 854-857.
7. Мышенков В.И., Яценко Н.А. Исследование устойчивости комбинированного разряда, поддерживаемого постоянным и высокочастотным электрическими полями. II. О механизме стабилизирующего действия высокочастотного

поля на положительный столб разряда постоянного тока // Физика плазмы. - 1982. - Т. 8, № 4. - С. 704-711.

8. Lisovski V., Booth J.-P., Landry K., Douai D., Cassagne V., Yegorenkov V. Similarity law for RF breakdown // Europhysics Letters. - 2008. - Vol. 82, № 1. - P. 15001 (1-5).

9. Lisovski V.A., Yegorenkov V.D. RF breakdown of low-pressure gas and a novel method for electron drift velocity determination in gases // J. Phys. D: Appl. Phys. - 1998. - Vol. 31, № 23. - P. 3349 - 3357.

10. Fatechand R. The electrical breakdown of gaseous dielectrics at high frequencies // Proc. IEE. - 1957. - Vol. 104, № 42. - P. 489-495.

11. Pim J.A. The electrical breakdown strength of air at ultra-high frequencies // Proc. IEE. - 1949. - Vol. 96, № 40. - P. 117-129.

12. Lisovski V.A., Yakovin S.D., Yegorenkov V.D. Low-pressure gas breakdown in uniform dc electric field // J. Phys. D: Appl. Phys. - 2000. - Vol. 31, № 21. - P. 2722 - 2730.

13. Schonenburger M. Breakdown of Gases Below Paschen Minimum: Basic Design Data of High-Voltage Equipment // IEEE Trans. Power App. Systems - 1969. - Vol. 88, № 2. - P. 100-107.

14. Hartmann P., Donkó Z., Bánó G., Szalai L., Rózsa K. Effect of different elementary processes on the breakdown in low-pressure helium gas // Plasma Sources Sci. Technol. - 2000. - Vol. 9, № 2. - P. 183-190.

15. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. - М.: Наука, 1987. - 592 с.

16. Wagenaar E., Bowden M., Kroesen G. Plasma emission imaging of a low-pressure argon breakdown // Plasma Sources Sci. Technol. - 2005. - Vol. 14, № 2. - P. 342-350.

17. Varela A.A. Effect of Direct-Current Potential on Initiation of Radiofrequency Discharge // Phys. Rev. - 1947. - Vol. 71, № 2. - P. 124-125.

18. Kirchner F. The effect of a direct current potential on the initiation of a radiofrequency discharge // Phys. Rev. - 1947. - Vol. 72, № 4. - P. 348.

19. Kirchner F. Über die Glimmentladung bei schnell wechselndem Feld // Ann. der Physik. - 1925. - Vol. 77, № 11. - P. 287-301.

20. Bhattacharjee B., Das S. Breakdown potential of air column with crossed rf and dc electric fields // Indian J. of Pure Appl. Phys. - 1974. - Vol. 12, № 8. - P. 760-763.

21. Shoji M., Sato M. Charge accumulation effects on breakdown condition of capacitive discharges in DC-biased RF field // Extended abstracts of the 4th Int. Conf. on reactive plasmas. - 1998. - Maui. - P. 81-82.

22. Shoji M., Sato M. Argon gas breakdown with bare and insulated electrodes in dc-biased RF field // J. Phys. D: Appl. Phys. - 1999. - Vol. 32, № 8. - P. 1640-1645.

23. Radmilovic-Radenovic M., Radjenovic B. Modelling of a low-pressure argon breakdown in combined fields // Plasma Sources Sci. Technol. - 2006. - Vol. 15, № 1. - P. 1-7.

24. Lisovsky V.A., Yegorenkov V.D. Low-pressure gas breakdown in combined fields // J. Phys. D: Appl. Phys. - 1994. - Vol. 27, № 11. - P. 2340-2348.

25. Lisovski V., Kharchenko N., Yegorenkov V. Modes of longitudinal combined discharge in low pressure nitrogen // J. Phys. D: Appl. Phys. - 2008. - Vol. 41, № 12. - P. 125207 (1-8).

26. Puech V., Torchin L. Collision cross sections and electron swarm parameters in argon // J. Phys. D: Appl. Phys. - 1986. - Vol. 19, № 12. - P. 2309-2323.

27. Roznerski W. Transport parameters of electron swarms in nitrogen at moderate and elevated E/N // J. Phys. D: Appl. Phys. - 1996. - Vol. 29, № 3. - P. 614-617.

28. Spriggs K.R., Fletcher J. Transient voltage measurement of primary ionisation in nitrogen // J. Phys. D: Appl. Phys. - 1982. - Vol. 15, № 10. - P. 1935-1941.

29. Fletcher J., Reid I.D. The transport parameters of an electron swarm in nitrogen at elevated E/N // J. Phys. D: Appl. Phys. - 1980. - Vol. 13, № 12. - P. 2275-2283.

30. Stojanovic V.D., Petrovic Z. Lj. Comparison of the results of Monte Carlo simulations with experimental data for electron swarms in N₂ from moderate to very high electric field to gas density ratios (E/N) // J. Phys. D: Appl. Phys. - 1998. - Vol. 31, № 7. - P. 834-846.

31. Ferreira C.M., Loureiro J. Electron transport parameters and excitation rates in argon // J. Phys. D: Appl. Phys. - 1983. - Vol. 16, № 9. - P. 1611-1621.

32. Nakamura Y., Kurachi M. Electron transport parameters in argon and its momentum transfer cross section // J. Phys. D: Appl. Phys. - 1988. - Vol. 21, № 5. - P. 718-723.

33. Lisovski V., Booth J.-P., Landry K., Douai D., Cassagne V., Yegorenkov V. Electron drift velocity in N₂O in strong electric fields determined from rf breakdown curves // J. Phys. D: Appl. Phys. - 2006. - Vol. 39, № 9. - P. 1866-1871.