

УДК 537.521 (575.2) (04)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕЖЭЛЕКТРОДНОГО РАССТОЯНИЯ НА ПРОСТРАНСТВЕННУЮ СТРУКТУРУ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЧЕ РАЗРЯДА ДИОДНОЙ КОНФИГУРАЦИИ В АРГОНЕ

Д.К. Оторбаев – чл.- корр. НАН КР,

С.В. Автаева – канд. физ.-мат. наук,

Т.М. Лапочкина – инженер

The influence of the interelectrode distance on spatial structure and electric properties of the RF excited, capacitively coupled discharge in argon is investigated on the base of the software SIGLO-rf 1.0.

Введение. Теории приэлектродных слоев ВЧ разрядов низкого давления посвящено множество работ. Интерес к этой проблеме продиктован важностью ее для приложений. Умение правильно оценивать параметры и понимать процессы, происходящие в этой части разряда, позволяет управлять технологическими процессами и регулировать параметры ВЧ реакторов, предназначенных для производства материалов, применяемых в микроэлектронике [1].

Современные теории слоев направлены на проникновение внутрь слоя, выяснение его структуры, эволюции во времени в течение периода. Основной задачей при изучении приэлектродных слоев является нахождение распределений в нем плотности заряженных частиц и потенциала электрического поля.

Известно [2], что в ВЧЕ разряде центральную часть разряда, обладающую постоянным положительным потенциалом относительно электродов, называют положительным столбом по аналогии с тлеющим разрядом, а вблизи электродов вследствие колебаний электронов плазмы относительно малоподвижных ионов возникают приэлектродные слои, которые играют важную роль в поддержании разряда и протекании процессов в плазме.

В работе проводится исследование влияния длины межэлектродного промежутка на структуру ВЧЕ разряда в аргоне. Моделировался ВЧЕ разряд диодной конфигурации с длиной межэлектродного промежутка $d = 1; 3; 5; 10$ см. Для изучения структуры разряда рассчитываются усредненные по ВЧ периоду распределения внутренних параметров разряда в межэлектродном промежутке, такие как напряженность электрического поля и потенциал плазмы, концентрация заряженных частиц, средняя энергия электронов, скорость ионизации. Особое внимание уделяется изучению распределения этих параметров разряда в приэлектродных слоях.

Описание физической модели. Расчет характеристик ВЧЕ разряда проводился с помощью программного обеспечения SIGLO-rf 1.0 фирмы Kinema Software [3, 4]. Программа SIGLO-rf позволяет вычислять электрические характеристики емкостного ВЧ разряда в чистом газе при заданных давлении p , температуре газа T_g и межэлектродном расстоянии d . Параметры разряда рассчитываются в рамках одномерной гидродинамической модели, содержащей три уравнения для электронов (уравнения неразрывности, импульса и энергии) и два уравнения для ионов (неразрывности и импульса), которые решаются совместно с уравнением Пуассона. Более подробное описание модели

дано в [5]. Коэффициент вторичной электронной эмиссии γ вследствие ионной бомбардировки катода предполагается равным нулю, и разряд поддерживается ионизацией, производимой электронами плазмы. Модель позволяет рассчитывать параметры ВЧЕ разряда в скрещенном постоянном магнитном поле с величиной магнитной индукции B .

Результаты расчета. Электрические характеристики ВЧЕ разряда рассчитывались при следующих внешних параметрах разряда: частота электрического поля $f = 13,56$ МГц; давление $p = 1$ Торр; ВЧ напряжение $V_{rf} = 200$ В; индукция магнитного поля $B = 100$ Гс; температура газа $T_g = 500$ К. Расчеты выполнены для межэлектродных расстояний $d = 1; 3; 5$ и 10 см.

Результаты расчета представлены в виде усредненных за ВЧ период распределений характеристик ВЧЕ разряда в аргоне в межэлектродном промежутке по приведенной длине промежутка (безразмерная величина z/d , где z – расстояние от электрода, d – длина межэлектродного промежутка) и вблизи электрода (z – расстояние от электрода в сантиметрах) в зависимости от длины межэлектродного промежутка. Распределения всех рассчитанных характеристик ВЧЕ разряда по длине межэлектродного промежутка симметричны, поэтому на рисунках показана только одна приэлектродная область.

На рис. 1 и 2 приведены усредненные за ВЧ период распределения напряженности электрического поля и потенциала плазмы в межэлектродном промежутке.

Из рис. 1 и 2 видно, что аксиальные распределения напряженности электрического поля и потенциала плазмы для ВЧЕ разрядов разной длины очень близки: как значения величин напряженностей электрического поля и потенциалов плазмы, так и вид их распределений в межэлектродном промежутке.

Напряженность электрического поля изменяется монотонно с удалением от электрода при всех рассматриваемых межэлектродных промежутках. В приэлектродной области напряженность электрического поля быстро падает по мере удаления от электрода, на границе слой-плазма она становится близкой к нулю, и на всем протяжении положительного столба остается такой же. Как известно, приэлектродный слой характеризуется сильным полем у поверхности и значительным падением потенциала. Из рис. 1, 2 можно оценить размеры приэлектродных слоев. Во всех случаях толщина приэлектродного слоя не превышает $0,5$ см. Величины напряженности электрического поля вблизи электрода ($\sim 0,1$ см от электрода) для $d = 1; 3; 5$ см мало отличаются и составляют $\sim 420\text{--}440$ В/см, а для $d = 10$ см они меньше примерно на 20% и равны 320 В/см.

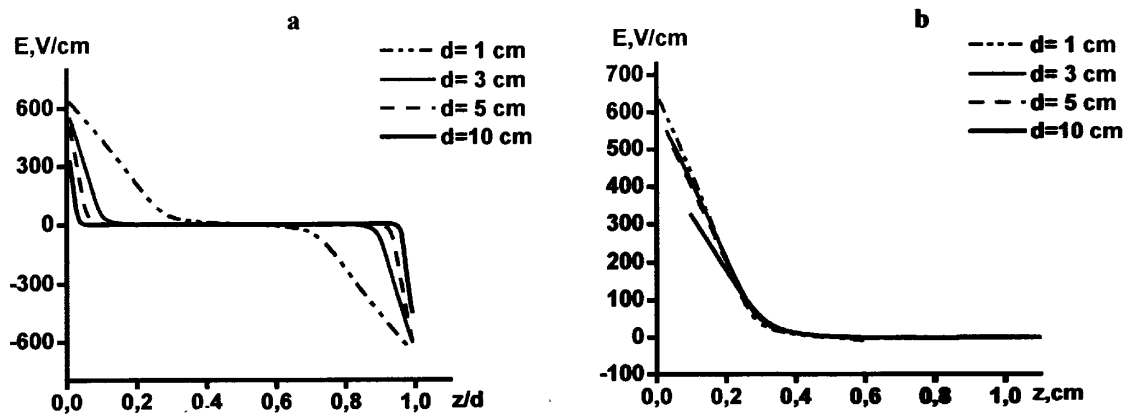


Рис. 1. Усредненное за ВЧ период распределение напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке по приведенной длине промежутка (а) и вблизи электрода (б) в ВЧЕ разряде в аргоне.

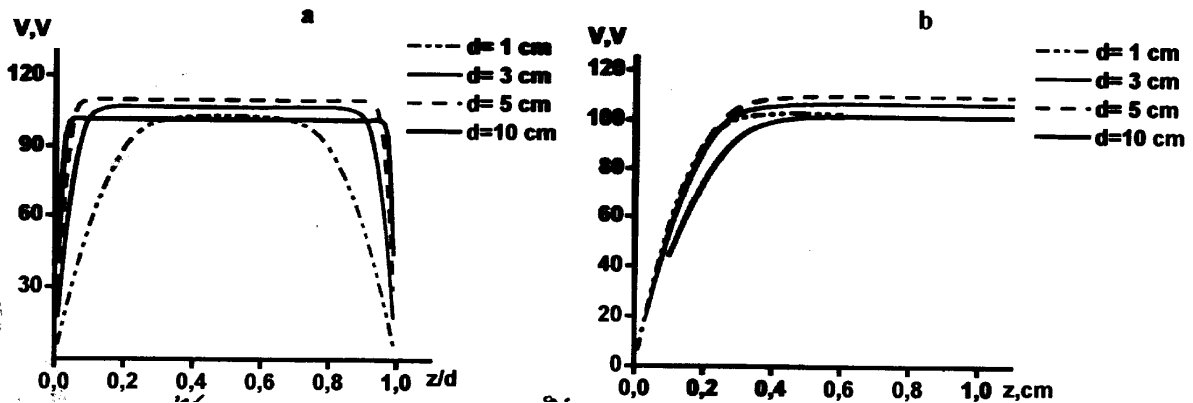


Рис. 2. Усредненное за ВЧ период распределение потенциала плазмы в межэлектродном промежутке по приведенной длине промежутка (а) и вблизи электрода (б) в ВЧЕ разряде в аргоне.

Изменение потенциала плазмы по величине в зависимости от межэлектродного расстояния не монотонно. Вблизи электрода ($z < 0,25$ см) величины потенциала различны только для промежутка длиной 10 см, в остальных случаях распределения они очень близки. При увеличении межэлектродного расстояния от 1 до 5 см наблюдается увеличение значения потенциала плазмы на границе слой-плазма, при последующем увеличении межэлектродного расстояния до 10 см значение потенциала на границе слой-плазма уменьшается до значения, наблюдаемого при $d = 1$ см. В центральной области разряда влияние длины разрядного промежутка на потенциал плазмы такое же, как и в приэлектродных слоях. В целом колебания потенциала в центре разряда при изменении межэлектродного расстояния составляют 5–8% от максимальной величины потенциала ($V_{\max} = 110$ В), наблюдаемой при $d = 5$ см.

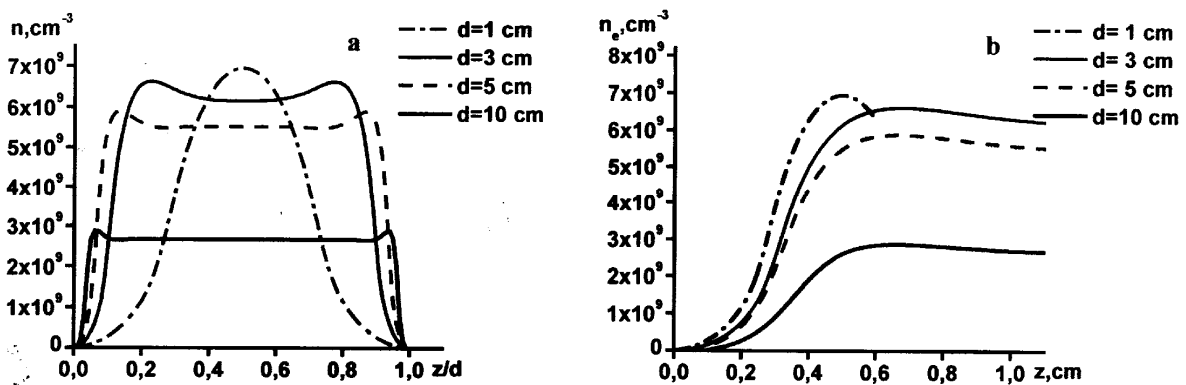


Рис. 3. Усредненное за ВЧ период распределение концентраций электронов в межэлектродном промежутке по приведенной длине промежутка (а) и вблизи электрода (б) в ВЧЕ разряде в аргоне.

Из рис. 3 видно, что концентрация электронов в разрядном промежутке максимальна на границе слой-плазма, в приэлектродных областях по мере приближения к электроду наблюдается сильное уменьшение концентрации электронов. В центральной части разряда по сравнению с концентрацией на границе слой-плазма она уменьшается на 5–10 % и на протяжении всего положительного столба остается примерно одинаковой. С увеличением межэлектродного расстояния наблюдается увеличе-

ние протяженности положительного столба, а толщина приэлектродного слоя остается примерно одинаковой. В случае $d = 1$ см все пространство разряда занято приэлектродными слоями, положительный столб не возникает, поэтому наблюдается один максимум концентрации электронов в центре разрядного промежутка. Максимальная концентрация электронов уменьшается с увеличением межэлектродного расстояния, в случае $d = 1$ см составляет $\sim 7 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$, а при увеличении межэлектродного расстояния до 10 см уменьшается до величины $\sim 3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$.

Усредненные за ВЧ период распределения средней энергии электронов в межэлектродном промежутке ВЧЕ разряда приведены на рис. 4.

Распределения средней энергии электронов в межэлектродном промежутке при всех рассматриваемых межэлектродных расстояниях почти одинаковы, в приэлектродных слоях и в центре промежутка вид распределения меняется неодинаково. Влияние межэлектродного расстояния на величину средней энергии электронов в центре промежутка немонотонно и в случае $d = 3$ см и $d = 5$ см их величины практически не отличаются друг от друга и составляют ~ 6 эВ (рис. 4). При уменьшении ($d = 1$ см) и увеличении ($d = 10$ см) энергия электронов возрастает примерно на 0,25-0,35 эВ, достигая максимального значения в середине приэлектродного слоя ($\sim 0,25$ см) для всех значений межэлектродных промежутков.

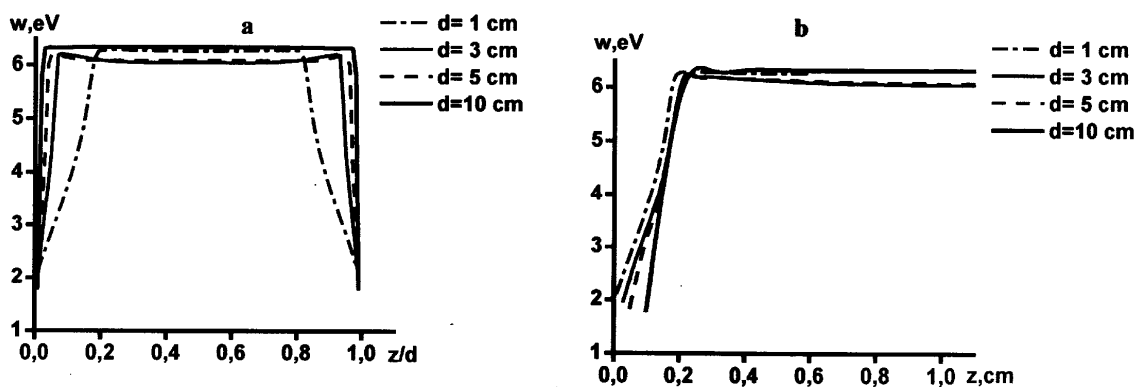


Рис. 4. Усредненное за ВЧ период распределение средней энергии электронов в межэлектродном промежутке по приведенной длине промежутка (а) и вблизи электрода (б) в ВЧЕ разряде в аргоне.

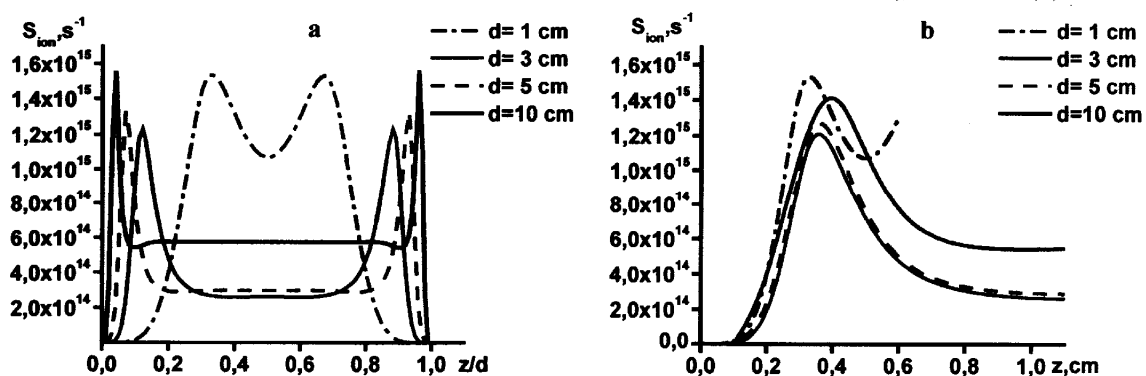


Рис. 5. Усредненное за ВЧ период распределение скорости ионизации в межэлектродном промежутке по приведенной длине промежутка (а) и вблизи электрода (б) в ВЧЕ разряде в аргоне.

Усредненные за ВЧ период распределения скорости ионизации в межэлектродном промежутке показаны на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что при изменении межэлектродного расстояния вид зависимостей $s_{\text{ion}}(z/d)$ сохраняется, скорость ионизации в разряде меняется немонотонно: в центральной области разряда в пределах одного порядка (наибольшая скорость ионизации $\sim 1,1 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ ($d=1 \text{ см}$), при наименьшей $\sim 3 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$ ($d=3 \text{ см}$)), в приэлектродной на границе слой-плазма максимальна, затем уменьшается и в центральной области разряда остается постоянной.

Анализ результатов. На основе одномерной гидродинамической модели ВЧЕ разряда рассчитаны характеристики ВЧЕ разряда диодного типа, активированного поперечным магнитным полем в аргоне при различных межэлектродных расстояниях.

Установлено, что длина межэлектродного промежутка наибольшее влияние оказывает на распределение концентрации заряженных частиц и скорость ионизации в разряде, особенно заметное в центральной части разряда, в приэлектродном слое эти величины имеют меньшее отличие.

Показано, что при выбранных одинаковых внешних параметрах разряда (частота и величина ВЧ напряжения, давление и температура газа, индукция магнитного поля) ВЧЕ разряд в аргоне при разных межэлектродных расстояниях (1; 3; 5; 10 см) имеет близкую пространственную структуру. Вся область разряда может быть разделена на приэлектродные слои пространственного заряда и квазинейтральную область положительного столба. Толщина приэлектродных слоев остается примерно одинаковой при изменении расстояния между электродами. Протяженность положительного столба не оказывает существенного влияния на характеристики разряда и его присутствие не является необходимым для протекания процессов в разряде. Так, в случае межэлектродного расстояния $d = 1 \text{ см}$ положительный столб не возникает, весь межэлектродный промежуток занимают приэлектродные слои.

Все это позволяет провести аналогию между ВЧЕ разрядом низкого давления и тлеющим разрядом, что заключается, по-видимому, в близости условий, реализующихся в ВЧЕ и тлеющем разрядах, в частности, близких для этих разрядов механизмах образования и гибели заряженных частиц в центральной области промежутка и приэлектродных слоях, а также в близких вкладах дрейфа и диффузии заряженных частиц в их общий баланс.

Литература

1. Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н., Яценко Н.А. Высокочастотный емкостной разряд // Физика. Техника эксперимента. Приложения. – М., 1995.
2. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М., 1987.
3. SIGLO-RF v.1.0. KINEMA SOFTWARE & CPAT. 1995. <http://www.kinema.com>
4. Voeuf J.P. and Pitchford L.C. Phys. Rev. E, 52, 1995.
5. Автаева С.В., Лапочкина Т.М., Оторбаев Д.К. Расчет характеристик ВЧ разряда // Вестн. КPCУ. – 2003. – Т.3. – №5.