

УДК 533. 915

## РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ ПРОДОЛЬНОГО КОМБИНИРОВАННОГО РАЗРЯДА В АЗОТЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

В.А. Лисовский<sup>1</sup>, Н.Д. Харченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Харьковський національний університет, 61077, Харків, пл. Свободи 4, Україна

<sup>2</sup> Научний фізико-технологічний центр, 61022, Харків, пл. Свободи 6, Україна

Поступила в редакцію 7 февраля 2007 г.

В работе исследованы режимы горения разряда низкого давления в комбинированном (ВЧ + постоянном электрическом) поле. Предложено различать три режима продольного комбинированного разряда (ВЧ и постоянное напряжения прикладывались к одним и тем же электродам): 1) несамостоятельный ВЧ разряд, возмущенный постоянным электрическим полем, 2) комбинированный разряд, 3) несамостоятельный разряд постоянного тока, возмущенный ВЧ электрическим полем. Определены условия существования этих режимов. Показано, что диапазон параметров, в котором первый режим комбинированного разряда может быть погашен повышением постоянного напряжения, ограничен со стороны низких давлений кривой потухания ВЧ разряда, а также кривой перехода комбинированного разряда из первого режима во второй. Аналитически получено соотношение между толщинами “катодного” и “анодного” приэлектродных слоев для первого режима, которое хорошо согласуется с экспериментальными данными.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** высокочастотный емкостный разряд, разряд постоянного тока, продольный комбинированный разряд, низкое давление, азот.

Газовый разряд в комбинированном (ВЧ + постоянном электрическом) поле применяется как для определения коэффициентов переноса электронов в газах низкого давления [1,2], так и в ряде технологических устройств для спектрохимического анализа [3], плазменного окисления кремния [4], плазмотронах [5,6], газоразрядных лазерах [7,8]. Это привело к появлению большого количества экспериментальных и теоретических работ, посвященных исследованию характеристик такого комбинированного разряда в разных газах (см., например, [9–19]). Комбинация постоянного и переменного электрических полей повышает устойчивость горения газового разряда, что позволяет вкладывать в разряд большую мощность [7,8,11,12]. В работах [9,10] исследовался поперечный комбинированный разряд, в котором электроды постоянного тока были внутренними и располагались на торцах разрядной трубки, а электроды, к которым прикладывалось высокочастотное напряжение, находились снаружи трубки. При этом в разрядной трубке создавались скрещенные ВЧ и постоянное электрические поля. Авторы [9,10] представили радиальные профили интегрального свечения поперечного комбинированного разряда. Работы [13,15] посвящены экспериментальному и теоретическому исследованию зажигания продольного комбинированного разряда в аргоне и воздухе. Кривые зажигания продольного комбинированного разряда в аргоне представлены в работе [18] для чистых металлических и покрытых слоем диэлектрика электродов. Авторы работы [19] с помощью численного моделирования попытались описать экспериментальные кривые зажигания [13]. Автор [14] измерил с помощью ленгмюровского зонда осевые профили плотности плазмы продольного комбинированного разряда в воздухе, при этом измерения проведены при давлениях газа вблизи и справа от минимума кривой погасания высокочастотного емкостного разряда. Характеристики разряда в комбинированном (ВЧ + постоянном) электрическом поле сложной конфигурации (триодная система) изучены в работе [16]. Авторы [16] измерили функции распределения ионов по энергиям, поступающих на заземленный электрод, при различных величинах высокочастотного и постоянного напряжений.

Хотя структура и режимы горения высокочастотного емкостного разряда [20] и тлеющего разряда постоянного тока [21 гл. 14] изучены хорошо, до сих пор остается открытым вопрос о режимах горения продольного комбинированного разряда, когда ВЧ и постоянное напряжения приложены к одним и тем же электродам.

В комбинированном разряде высокочастотное электрическое поле играет основную роль в создании плотной плазмы, в то время как приложенное к электродам постоянное напряжение увеличивает энергию положительных ионов, поступающих на “катод”. Постоянное напряжение сосредоточено преимущественно в “катодном” слое (вследствие его низкой проводимости), в то время как значительная часть приложенного ВЧ напряжения “падает” на квазинейтральной плазме, контролируя частоту ионизации молекул газа электронным ударом. В отличие от высокочастотного емкостного разряда и разряда постоянного тока, в комбинированном разряде возможно независимо контролировать энергию ионов (с помощью постоянного напряжения  $U_{dc}$ ) и поток ионов на электрод (управляя плотностью плазмы с помощью ВЧ напряжения  $U_{rf}$ ).

Целью нашей работы было исследование режимов горения продольного комбинированного разряда в азоте низкого давления. Показано, что при различных значениях отношения ВЧ и постоянного напряжений на электродах комбинированный разряд может гореть в одном из трех возможных режимов. При небольших

постоянных напряжениях наблюдается первый режим – ВЧ разряд, возмущенный постоянным электрическим полем. Второй режим – комбинированный разряд – существует при наличии интенсивной ионизации в “катодном” слое, когда постоянное напряжение превышает некоторую критическую величину. Третий режим (разряд постоянного тока, возмущенный ВЧ напряжением) наблюдается при добавлении небольшого ВЧ напряжения к горящему разряду постоянного тока. Показано наличие ограниченной со стороны низких давлений области, где первый режим может быть погашен повышением постоянного напряжения. Из столкновительного закона Чайльда-Ленгмюра выведено соотношение между толщинами “катодного” и “анодного” слоев, которое хорошо описывает экспериментальные результаты для первого режима.

### УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились при давлениях азота  $p = 0,01 - 5$  Торр в диапазоне амплитудных значений ВЧ напряжения  $U_{rf} \leq 2000$  В, постоянного напряжения  $U_{dc} \leq 600$  В и частоте ВЧ поля  $f = 13,56$  МГц. Расстояние между плоскими параллельными электродами из нержавеющей стали было равно  $L = 30$  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.

На рис.1 показана схема нашей экспериментальной установки. Кварцевая трубка с внутренним диаметром 100 мм вакуумно уплотнялась между электродами. Система напуска газа поставляла азот 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.

Амплитуда ВЧ тока определялась с помощью пояса Роговского, сигнал с которого подавался на измеритель разности фаз ФК 2-12. На другой вход ФК 2-12 подавался сигнал с емкостного делителя, подключенного к ВЧ электроду. Это позволяло нам измерить амплитуды ВЧ тока, ВЧ напряжения и угол сдвига фазы  $\phi$  между ними. Измеритель разности фаз ФК 2-12 способен регистрировать амплитуды переменных сигналов в диапазоне частот  $f_l = 1$  МГц – 1 ГГц и угол сдвига фазы  $\phi$  между сигналами (в нашем случае между ВЧ напряжением и ВЧ током).

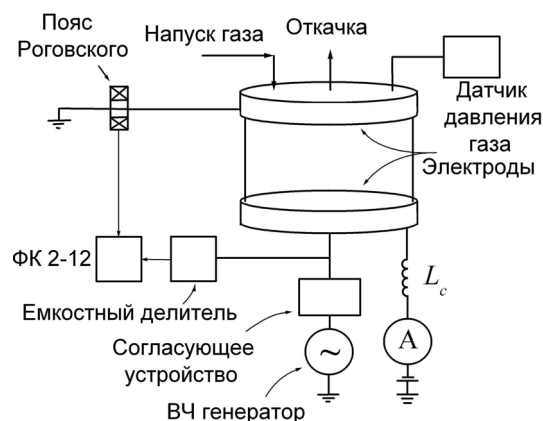


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Нашей целью было исследовать возможные режимы горения продольного комбинированного разряда, условия существования каждого из режимов, а также измерить вольт-амперные характеристики (как по постоянному, так и по ВЧ току). Начнем с предельного случая, когда горит только самостоятельный ВЧ разряд. Кривая погасания такого разряда показана на рис.2 ( $U_{rf,ext}$ ). ВЧ разряд может гореть только при ВЧ напряжениях, превышающих  $U_{rf,ext}$ . При низких давлениях газа (слева от минимума) кривая погасания имеет область неоднозначной зависимости напряжения погасания от давления газа [22,23]. Причины такого поведения кривой погасания объяснены в работе [22], поэтому здесь мы не будем уделять этому внимание, однако, отметим, что наши данные согласуются с результатами [22,23].

ВЧ емкостный разряд имеет слоистую структуру и состоит из приэлектродных слоев примерно равной толщины и области квазинейтральной плазмы. Зажжем ВЧ разряд в слаботочном  $\alpha$ -режиме, в котором ионизация происходит в области квазинейтральной плазмы, а проводимость приэлектродных слоев мала [20, 21,23]. Теперь приложим между электродами небольшое постоянное напряжение. При этом толщина слоя вблизи “катода”  $d_c$  увеличивается, а толщина слоя вблизи “анода”  $d_a$  остается практически неизменной либо слабо уменьшается (см. рис.3). В этом случае мы видим первый режим продольного комбинированного разряда – ВЧ разряд, возмущенный постоянным электрическим полем. Если ВЧ напряжение не превышает предельную величину  $U_{rf,min}$ , дальнейшее повышение постоянного напряжения приводит к уменьшению ширины области плазмы, и при некоторой величине  $U_{dc}$  разряд погасает. При этом, чем меньшей поддерживалась величина ВЧ напряжения, тем меньшее постоянное напряжение  $U_{dc}$  было нужно для погасания разряда. Однако при

дальнейшем росте  $U_{dc}$  совместное действие постоянного и ВЧ напряжений приводит к пробое газа, зажигается разряд во втором режиме, который мы условно называем “комбинированный разряд”.

На рис.2 показана зависимость критического ВЧ напряжения  $U_{rf.min}$  от давления азота. При  $U_{rf} = U_{rf.min}$  разряд с ростом постоянного напряжения не погасает, а переходит во второй режим. При этом постоянное напряжение, необходимое для перехода из первого во второй режим, равно  $U_{dc} = U_{dc.tr}$  и показано на рис.2. Из рисунка видно, что при низких давлениях азота и высоких ВЧ напряжениях кривая погасания ВЧ разряда  $U_{rf.ext}$  и кривая критического ВЧ напряжения перехода во второй режим  $U_{rf.min}$  сходятся. Поэтому область давлений и ВЧ напряжений, в которой первый режим комбинированного разряда может быть погашен наложением постоянного напряжения, ограничена со стороны низких давлений и заключена в зазоре между кривыми  $U_{rf.ext}$  и  $U_{rf.min}$ . Это не означает, что область существования первого режима комбинированного разряда заключена только в зазоре между кривыми  $U_{rf.ext}$  и  $U_{rf.min}$ . Первый режим наблюдается и при ВЧ напряжениях  $U_{rf} > U_{rf.min}$ , но с повышением постоянного напряжения разряд переходит во второй режим. При этом если в первом режиме “катодный” слой темный и с ростом  $U_{dc}$  расширяется, то после перехода во второй режим в “катодном” слое появляется свечение фиолетового оттенка (свидетельствующее о появлении в слое электронов высокой энергии), а его толщина с ростом постоянного напряжения уменьшается. Как видно из рис.3, если в первом режиме толщина “анодного” слоя изменялась слабо, то во втором режиме она уменьшается с ростом постоянного напряжения.

Из рис.2 следует также, что постоянное напряжение, необходимое для перехода разряда из первого режима во второй (во время которого, судя по изменению цвета разряда, происходит пробой “катодного” слоя), оказывается гораздо меньше, чем напряжение зажигания самостоятельного тлеющего разряда постоянного тока. Например, при давлении азота 0,14 Торр (вблизи минимума кривой зажигания разряда постоянного тока) напряжение пробоя равно  $U_{dc.br} = 310$  В, а напряжение перехода разряда во второй режим  $U_{dc.tr} = 189$  В. Во-первых, это связано с тем, что на “катодном” слое сосредоточено не только постоянное падение напряжения, но и в определенные моменты времени “падает” почти все приложенное к электродам ВЧ напряжение. К тому же из плазменной области в “катодный” слой поступают потоки положительных ионов и фотонов высокой энергии (которые при столкновении с поверхностью электрода выбивают вторичные электроны), а также метастабильные атомы и молекулы (которые не только при дезактивации на электроде усиливают поток вторичных электронов, но и приводят к ступенчатой ионизации в “катодном” слое). Поэтому пробить такой “катодный” слой первого режима комбинированного разряда оказывается легче, чем зажечь разряд постоянного тока.

Теперь рассмотрим вольт-амперные характеристики комбинированного разряда. Поскольку мы к электродам прикладываем одновременно ВЧ и постоянное напряжения, то в цепи текут высокочастотный и постоянный токи. На рис.4 показаны зависимости постоянного тока  $I_{dc}$ , активного ВЧ тока  $I_{rf} \cos \phi$  и полного тока (который мы принимаем равным сумме постоянного и активного ВЧ тока) от постоянного напряжения  $U_{dc}$  при давлении азота 1 Торр. При отсутствии ВЧ напряжения самостоятельный разряд постоянного тока перед погасанием горит в нормальном режиме, занимая только часть поверхности электродов. При этом увеличение тока происходит за счет расширения площади токового пятна на электродах при неизменной величине

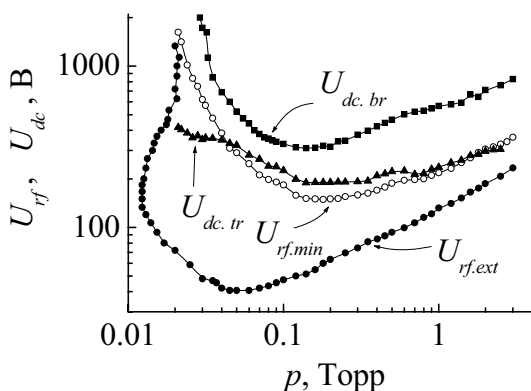


Рис.2. Зависимость ВЧ напряжения погасания  $U_{rf.ext}$  самостоятельного ВЧ разряда, наименьшего ВЧ напряжения  $U_{rf.min}$  перехода из первого режима комбинированного разряда во второй, постоянного напряжения  $U_{dc.tr}$ , соответствующего этому переходу, и постоянного напряжения зажигания самостоятельного разряда постоянного тока  $U_{dc.br}$  от давления газа.

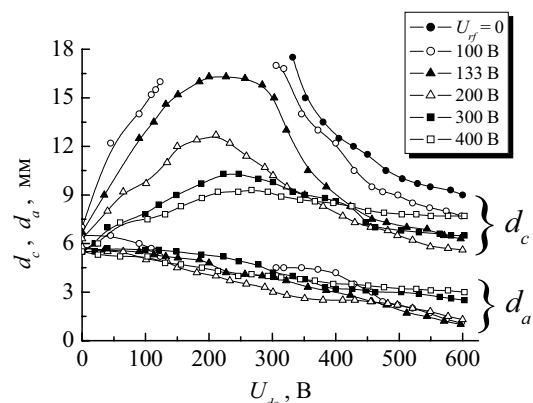


Рис.3. Зависимость толщин “катодного”  $d_c$  и “анодного”  $d_a$  слоев от приложенного постоянного напряжения при фиксированных значениях ВЧ напряжения и давления азота 0,1 Торр.

постоянного напряжения. Когда разряд занимает всю площадь электродов, дальнейший рост тока сопровождается повышением постоянного напряжения. Наложение на тлеющий разряд постоянного тока высокочастотного напряжения приводит к появлению активного ВЧ тока. При небольшом ВЧ напряжении (на рисунке это соответствует случаю  $U_{rf} = 67$  В) мы видим третий режим - *несамостоятельный разряд постоянного тока, возмущенный ВЧ электрическим полем*. Однако даже небольшое ВЧ напряжение заметно влияет на характеристики разряда постоянного тока и приводит к расширению токового пятна на электродах. В представленном на рис.4 случае  $p = 1$  Торр ВЧ напряжения  $U_{rf} = 67$  В оказалось достаточно, чтобы привести к исчезновению эффекта нормальной плотности тока. То есть перед потуханием уменьшение тока сопровождалось сужением токового пятна на электродах, но при этом понижалось также и постоянное напряжение (которое в случае нормального режима обычно сохраняется неизменным). При более высоких ВЧ напряжениях разряд из третьего режима переходил во второй, однако в этом случае трудно выбрать какой-либо критерий такого перехода. Если при переходе из первого режима во второй видны изменения в “катодном” слое (по-видимому, происходит пробой слоя и развитие в нем электронных лавин), то в третьем режиме “катодный” слой и так уже пробит, а ВЧ поле создает дополнительную ионизацию молекул газа в плазменном объеме.

Начиная с ВЧ напряжения  $U_{rf} = 133$  В, при  $p = 1$  Торр может гореть самостоятельный ВЧ разряд, который при наложении на него постоянного напряжения  $U_{dc}$  превращается в первый режим комбинированного разряда. При этом с ростом  $U_{dc}$  активный ВЧ ток сразу начал уменьшаться, а постоянный ток сначала увеличивается, но, начиная с  $U_{dc} \approx 50$  В, монотонно уменьшается вплоть до погасания разряда при  $U_{dc} \approx 104$  В. При дальнейшем повышении постоянного напряжения разряд снова загорается при  $U_{dc} \approx 253$  В, но уже во втором режиме. При ВЧ напряжении  $U_{rf} = 167$  В первый режим ведет себя аналогично, но погасает при более высоком постоянном напряжении (202 В), а затем повышения постоянного напряжения всего на 5 В оказалось достаточно для пробоя газа и зажигания второго режима, который характеризуется быстрым ростом постоянного и активного ВЧ токов. При более высоких ВЧ напряжениях переход комбинированного режима из первого во второй режим происходил без предварительного погасания первого режима и сопровождался пробоем “катодного” слоя. Уменьшение активного ВЧ тока с ростом  $U_{dc}$  в первом режиме наблюдается только при ВЧ напряжениях, при которых самостоятельный ВЧ разряд горит в слаботочном  $\alpha$ -режиме. Когда ВЧ напряжение достаточно велико для появления сильноточного  $\gamma$ -режима (на рис.4 этому соответствует  $U_{rf} = 333$  В), ВЧ ток с ростом  $U_{dc}$  сначала остается неизменным, а затем быстро растет после перехода комбинированного разряда во второй режим.

При меньших давлениях азота нормальный режим разряда постоянного тока не наблюдается, в остальном поведение постоянного и активного ВЧ токов качественно подобно описанному выше, поэтому мы не приводим вольт-амперные характеристики для других давлений газа.

На рис.5 показаны зависимости постоянных напряжений, при которых происходит переход из первого режима комбинированного разряда во второй, от приложенного ВЧ напряжения при различных давлениях азота. Из рисунка видно, что чем выше ВЧ напряжение, тем меньшее постоянное напряжение нужно приложить для перехода разряда во второй режим. Это связано с тем, что на “катодном” слое сосредоточено не только практически все приложенное постоянное напряжение, но и в определенные моменты времени “падает” почти все приложенное ВЧ напряжение. Это значительно облегчает пробой слоя и переход во второй режим.

Теперь возьмем уравнение Чайльда-Ленгмюра для столкновительного ВЧ слоя [20]:

$$J = \frac{1}{4\pi} \left( \frac{500}{243\pi} \right)^{1/2} \left( \frac{2el}{M} \right)^{1/2} \frac{\bar{V}^{3/2}}{d^{5/2}}, \quad (1)$$

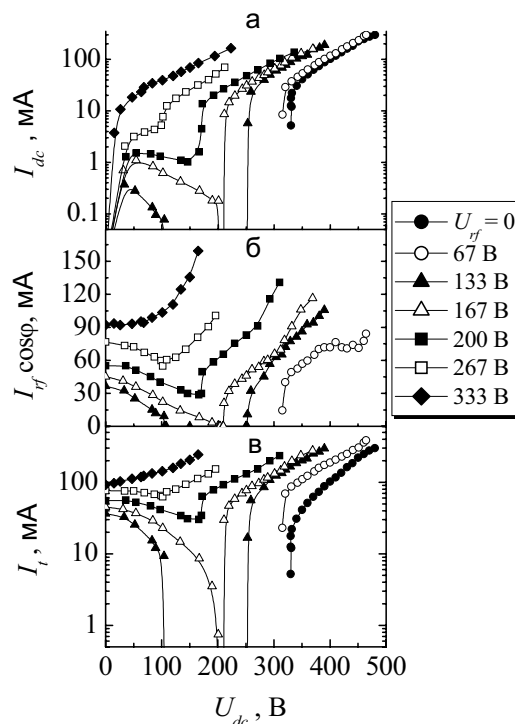


Рис.4. Вольт-амперные характеристики комбинированного разряда: зависимости постоянного тока (а), активного ВЧ тока (б) и полного тока (в) от приложенного постоянного напряжения при давлении азота 1 Торр и различных ВЧ напряжениях.

где  $J$  – плотность ионного тока через слой,  $e$  – элементарный заряд,  $l$  – длина свободного пробега положительных ионов в слое,  $M$  – масса иона,  $\bar{V}$  – постоянное падение напряжения на приэлектродном слое,  $d$  – толщина слоя. Считаем, что плазменный объем имеет высокую проводимость, поэтому на плазме падение ВЧ напряжения гораздо меньше, чем на слое. В самостоятельном симметричном ВЧ разряде постоянное падение напряжения на приэлектродном слое  $\bar{V} \approx U_{rf} / \pi$  [20,21], т.е. примерно в 3 раза меньше, чем амплитуда приложенного ВЧ напряжения, а толщины приэлектродных слоев равны. В первом режиме комбинированного разряда толщина “анодного” слоя  $d_a$  остается практически неизменной, т.е. наложение постоянного напряжения значительно повлияло лишь на характеристики “катодного” слоя. Следовательно, на “анодном” слое падает только ВЧ напряжение, постоянная составляющая которого  $\bar{V}_a \approx U_{rf} / \pi$ . На “катодном” слое толщиной  $d_c$  в первом режиме комбинированного разряда падают постоянное приложенное напряжение и постоянная составляющая ВЧ напряжения, т.е.

$$\bar{V}_c = U_{dc} + (U_{rf} / \pi). \quad (2)$$

Как следует из формулы, приведенной в [20]:

$$J_c / J_a = A_a / A_c, \quad (3)$$

в случае электродов (“катода” и “анода”) равной площади ( $A_c = A_a$ ) диффузионные потоки положительных ионов из плазмы к границам слоев равны  $J_c = J_a$ . Тогда легко получить соотношение между толщинами “катодного”  $d_c$  и “анодного”  $d_a$  слоев:

$$d_c / d_a = [1 + \pi \cdot (U_{dc} / U_{rf})]^{3/5}. \quad (4)$$

На рис.6 показаны измеренные нами отношения толщин “катодного”  $d_c$  и “анодного”  $d_a$  слоев для нескольких величин приложенного ВЧ напряжения. Первому режиму комбинированного разряда соответствует диапазон  $x = (1 + \pi \cdot (U_{dc} / U_{rf}))^{3/5} \leq 3$ , а при  $x > 3$  наблюдается второй режим. Из рисунка следует, что в первом режиме экспериментальные данные для  $d_c / d_a$  удовлетворительно предсказываются соотношением (4).

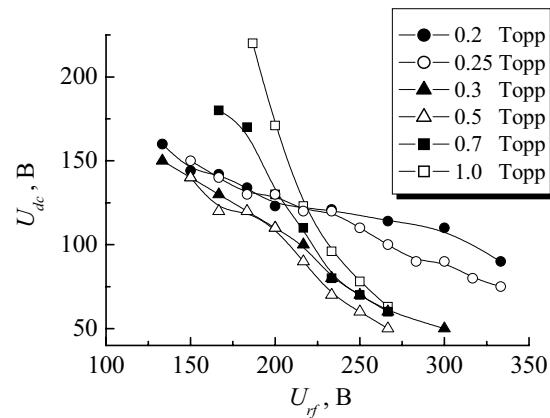


Рис.5. Зависимости постоянных напряжений перехода из первого режима комбинированного разряда во второй от приложенного ВЧ напряжения при различных давлениях азота.

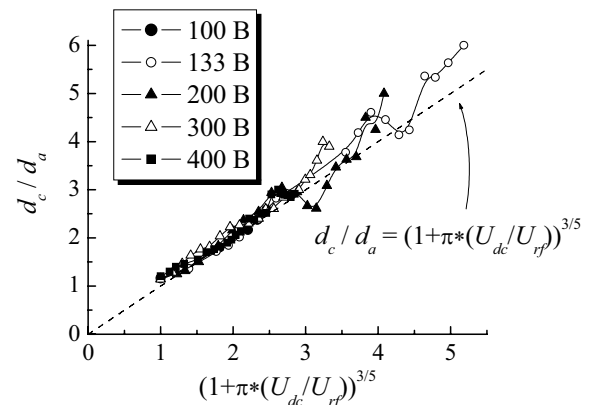


Рис.6. Зависимость отношения толщин “катодного” и “анодного” слоев от величины  $(1 + \pi \cdot (U_{dc} / U_{rf}))^{3/5}$  при различных значениях ВЧ напряжения и давления азота 0,1 Torr.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы исследовали продольный комбинированный разряд (ВЧ и постоянное напряжения прикладывались к одним и тем же электродам) в азоте низкого давления. Показано, что существуют три режима горения такого разряда. В первом режиме (несамостоятельном ВЧ разряде, возмущенном постоянным электрическим полем), ионизация происходит в плазменном объеме в высокочастотном поле, а проводимость как “катодного”, так и “анодного” слоев мала. Во втором режиме (комбинированный разряд) “катодный” слой пробит совместным действием постоянного и ВЧ электрических полей, в нем развиваются электронные лавины. Именно этот режим представляет значительный интерес для плазменных технологий. Третий режим (несамостоятельный разряд постоянного тока, возмущенный ВЧ электрическим полем) наблюдается, когда небольшое ВЧ напряжение приложено к разряду постоянного тока. Впервые показано, что область, где существует только первый режим, ограничена со стороны низких давлений кривой потухания ВЧ разряда, а также кривой перехода комбинированного разряда из первого режима во второй. В этой области ВЧ напряжений и давлений газа повышение постоянного напряжения может погасить горящий комбинированный разряд в первом режиме. Из закона Чайльда-Ленгмюра для столкновительного ВЧ слоя получено соотношение между толщинами “катодного” и “анодного” приэлектродных слоев для первого режима, которое хорошо описывает экспериментальные результаты.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Varnerin L.J., Brown S.C. Microwave Determinations of Average Electron Energies and the First Townsend Coefficient in Hydrogen // *Phys. Rev.* - 1950. - Vol.79, №6. - P.946 – 951.
2. Lisovskii V.A. Determination of electron transport coefficients in argon from ignition curves of rf and combined low-pressure discharges // *Tech. Phys. Lett.* - 1998. - Vol.24, №4. - P.308-310.
3. Кристеску Г.Д., Джурджа М. Результаты спектрохимического анализа с использованием в качестве источника комбинированного электрического разряда // *Оптика и спектроскопия.* - 1961. - Т.11, вып.3. - С.424-426.
4. Ligenza J.R. Silicon Oxidation in an Oxygen Plasma Excited by Microwaves // *J. Appl. Phys.* - 1965. - Vol.36, №9. - P.2703-2707.
5. Захаров В.К. Исследование влияния внешних электрических полей на высокочастотный факельный разряд // *Теплофизика высоких температур.* - 1972. - Т.10, вып.3. - С.491-498.
6. Батенин В.М., Роддатис В.К. О некоторых особенностях разрядов атмосферного давления при совместном действии постоянного и СВЧ-электрических полей (комбинированные разряды). Параметры плазмы и электрические характеристики комбинированного разряда // *Теплофизика высоких температур.* - 1980. - Т.18, вып.6. - С.1137-1143.
7. Eckbreth A. C., Davis J. W. RF augmentation in CO<sub>2</sub> closed-cycle dc electric-discharge convection lasers // *Appl. Phys. Lett.* - 1972. - Vol.21, №1. - P.25-27.
8. 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.
9. Yamamoto K., Okuda T. On the electrical discharge in d.c. and high frequency fields simultaneously // *Applied Scientific Research.* - 1956. - Vol.5, №1. - P.144-147.
10. Goichman V.H., Goldfarb V.M., Tendler M.B. Comparative studies of HF and DC molecular gas discharges // *Proc. 12<sup>th</sup> Intern. Conf. on Phenom. in Ionized Gases.* – Eindhoven (The Netherlands), 1975. - P.109-110.
11. Рахимова Т.В, Рахимов А.Т. К вопросу о стабилизации газового разряда высокочастотным электрическим полем // *Физика плазмы.* - 1975. - Т.1, вып.5. - С.854-857.
12. 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, вып.4. - С.704-711.
13. Lisovskiy V.A., Yegorenkov V.D. Breakdown of a low-pressure gas in combined fields // *Soviet Technical Physics Letters.* - 1992. - Vol.18, №9. - P.573-575.
14. Lisovskii V.A. Structure of a low-pressure discharge in combined fields // *Soviet Technical Physics Letters.* - 1992. - Vol.18, № 10. - P.616-618.
15. Lisovsky V.A., Yegorenkov V.D. Low-pressure gas breakdown in combined fields // *J. Phys. D: Appl. Phys.* -1994. - Vol.27. - P.2340.
16. Zeuner M., Meichsner J. Ion energy distributions in an r.f.-d.c.-triode glow discharge // *Surface and Coatings Technology.* - 1995. - Vol.74-75. - P.562-566.
17. Hassan Z., Fujita H. Dynamic potential formation of a rf sheath near the substrate in a dc discharge plasma // *J. Phys. D: Appl. Phys.* - 1998. - Vol.31. - P.2281–2285.
18. 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. - P.1640–1645.
19. Radmilovic -Radjenovic M., Radjenovic B. Modelling of a low-pressure argon breakdown in combined fields // *Plasma Sources Sci. Technol.* - 2006. - Vol.15, № 1. - P.1–7.
20. Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н., Яценко Н.А. Высокочастотный емкостный разряд: Физика. Техника эксперимента. Приложения. - М.: Изд-во МФТИ; Наука-Физматлит, 1995. - 310 с.
21. Райзер. Ю.П. Физика газового разряда. - М.: Наука, 1987. - 592 с.
22. Lisovskiy V., Booth J.-P., Martins S., Landry K., Douai D., Cassagne V. Extinction of RF capacitive low-pressure discharges // *Europhysics Letters.* - 2005. - Vol.71, №3. - P.407-411.
23. Lisovskiy V., Booth J.-P., Landry K., Douai D., Cassagne V., Yegorenkov V. Modes and the alpha-gamma transition in rf capacitive discharges in N<sub>2</sub>O at different rf frequencies // *Physics of Plasmas.* - 2006. - Vol.13, №10. - P.103505.

## MODES OF LONGITUDINAL COMBINED DISCHARGE IN LOW PRESSURE NITROGEN

V.A. Lisovskiy<sup>1</sup>, N.D. Kharchenko<sup>2</sup><sup>1</sup> *Kharkov National University, 4 Svobody sq., Kharkov, 61077, Ukraine*<sup>2</sup> *Scientific Center of Physics and Technology, 6 Svobody sq., Kharkov, 61077, Ukraine*

The modes of low pressure combined (RF + DC) gas discharge were studied in this work. Longitudinal combined discharge (RF and DC voltages were applied to the same electrodes) can exist in three modes: 1) unself-sustained RF discharge, disturbed with DC electrical field, 2) combined discharge, 3) unself-sustained DC discharge, disturbed with RF electrical field. Conditions of existence of these modes were determined. The parameter range in which combined discharge burning in the first mode can be extinguished by increasing of DC voltage is limited in the low-pressure side with the extinction curve and the curve of the transition of combined discharge from the first mode to the second one. Relation between thicknesses of the “cathode” and “anode” layers was analytically obtained which agrees to the experimental results.

**KEY WORDS:** RF capacitive gas discharge, DC discharge, longitudinal combined discharge, low pressure, nitrogen.