

УДК 533. 915

## НОРМАЛЬНЫЙ РЕЖИМ ПРОДОЛЬНОГО КОМБИНИРОВАННОГО РАЗРЯДА В ГАЗАХ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

**В.А. Лисовский, Н.Д. Харченко\***

*Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина*

*61077, Харьков, пл. Свободы 4, Украина*

*\*e-mail: [nadine@list.ru](mailto:nadine@list.ru)*

Поступила в редакцию 30 апреля 2010 г.

Данная работа посвящена изучению нормального режима продольного комбинированного разряда, когда ВЧ и постоянное напряжения прикладываются к одним и тем же электродам. Ранее нами было показано, что продольный комбинированный разряд может гореть в трех различных режимах. В настоящей работе получено, что в третьем режиме (разряд постоянного тока, возмущенный ВЧ напряжением) комбинированного разряда добавление ВЧ напряжения практически не влияет на величину постоянного тока разряда и площадь, занимаемую разрядным пятном на катоде. Однако после перехода во второй режим с ростом ВЧ напряжения наблюдается быстрый рост постоянного тока и расширение разрядного пятна. Показано, что в нормальном комбинированном разряде, как и в разряде постоянного тока, существует переходная область давлений, в которой  $j/p^2$  уменьшается с ростом разрядного тока. Экспериментально исследованы радиальные профили плотности тока продольного комбинированного разряда в нормальном и аномальном режимах, аксиальные профили свечения разряда, проведено моделирование при помощи программы Oopic Pro. Показано, что как для нормального, так и аномального комбинированного разряда характерны три режима горения, а также наличие двух пиков интенсивности свечения вблизи «анода», которые формируются во втором режиме.

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

### NORMAL MODE OF THE LONGITUDINAL COMBINED DISCHARGE IN LOW PRESSURE NITROGEN

**V.A. Lisovskiy, N.D. Kharchenko**

*Kharkov National University*

*4 Svobody sq., Kharkov, 61077, Ukraine*

This work is devoted to investigation of a normal longitudinal combined discharge when DC and RF voltages are applied to the same electrodes. Previously it was shown that longitudinal combined discharge can burn in three possible modes. In this work it is shown that when we apply the RF voltage to the combined discharge burning in the third mode (DC discharge perturbed by the RF electric field) there is almost no influence on the DC current magnitude and the area occupied by the discharge spot at the "cathode". However after transition to the second mode with the RF voltage growth, a fast increase of the DC current and broadening of the discharge spot is observed. It is shown that in the normal combined discharge as well as in the DC discharge, a transition pressure range exists, where  $j/p^2$  is not the constant value but decreases with the discharge current increase. The radial profiles of the discharge current density in normal and abnormal modes of longitudinal combined discharge and the axial profiles of the discharge were experimentally investigated, and modeling of the combined discharge using program Oopic Pro was made. It is shown that both normal and abnormal combined discharges can burn in three modes, and have two peaks of the glow intensity near the "anode" which are formed in the second mode.

**KEY WORDS:** normal mode, radio-frequency capacitively coupled discharges, DC discharges, combined discharges, low pressure, nitrogen.

### НОРМАЛЬНИЙ РЕЖИМ ПОЗДОВЖНЬОГО КОМБІНОВАНОГО РОЗРЯДУ В НІТРОГЕНІ НИЗЬКОГО ТИСКУ

**В.О. Лісовський, Н.Д. Харченко**

*Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна*

*61077, Харків, пл. Свободи 4, Україна*

Цю роботу присвячено вивченню нормального режиму поздовжнього комбінованого розряду, коли ВЧ та постійна напруги прикладені до одних і тих самих електродів. Раніше нами було показано, що поздовжній комбінований розряд може існувати в трьох різних режимах. У цій роботі знайдено, що у третьому режимі (розряд постійного струму, збурений ВЧ напругою) комбінованого розряду додавання ВЧ напруги практично не впливає на величину постійного струму розряду та площу, яку займає розрядна пляма на катоді. Однак після переходу у другий режим із збільшенням ВЧ напруги спостерігається швидке підвищення постійного струму та розширення розрядної плями. Показано, що в нормальному комбінованому розряді, як і в розряді постійного струму, існує перехідна область тиску, у якій  $j/p^2$  зменшується із зростанням розрядного струму. Експериментально досліджені радіальні профілі густини струму поздовжнього комбінованого розряду в нормальному та аномальному режимах, аксіальні профілі світіння розряду, проведено моделювання за допомогою програми Oopic Pro. Показано, що як для нормального, так і аномального комбінованого розряду характерні три режими горіння, а також наявність двох піків інтенсивності світіння біля «анода», які формуються у другому режимі.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** нормальний режим, високочастотний ємнісний розряд, розряд постійного струму, комбінований розряд, низький тиск, нітроген.

Газовый разряд в продольном комбинированном (ВЧ + постоянном) электрическом поле применяется в ряде технологических устройств для спектрохимического анализа [1], плазменного окисления кремния [2], в газоразрядных лазерах [3, 4]. Комбинация постоянного и переменного электрических полей повышает устойчивость горения газового разряда, что позволяет вкладывать в разряд большую мощность [3-7]. В последние годы интерес к продольному комбинированному разряду возрос из-за возможности проводить в этом разряде процесс плазменного травления более однородно по площади полупроводниковых пластин, чем в обычном ВЧ емкостном разряде [8-11]. В связи с этим, изучение характеристик и различных режимов горения газового разряда низкого давления в комбинированных полях является актуальной проблемой.

Известно, что тлеющий разряд постоянного тока может гореть в нормальном и аномальном режимах [7]. Постоянство катодного падения, имеющее место в нормальном тлеющем разряде в довольно широком интервале токов, используется в таких приборах тлеющего разряда, как газоразрядные стабилизаторы напряжения (стабилитроны), а также выпрямители с тлеющим разрядом и др. [12]. Для того чтобы корректно применять нормальный режим тлеющего разряда, необходимо знать условия его существования в различных газах, при различных давлениях и материалах катода, поэтому этот вопрос уже давно исследуется различными авторами [13-17].

Нормальный режим в разряде постоянного тока реализуется, когда на вольт-амперной характеристике (ВАХ) катодного слоя достигается минимум. Для параметров нормального тлеющего разряда, катодного падения потенциала  $U_n$  и плотности тока  $j_n$  в случае геометрически подобных приборов, заполненных одним и тем же газом, при одном и том же материале электродов, предположительно должны выполняться следующие законы подобия: а)  $U_n = const$ , т. е. катодное падение потенциала не зависит от силы тока нормального тлеющего разряда и давления газа, б)  $j_n/p^2 = const$  (нормальная плотность тока, деленная на давление газа в квадрате является независимым параметром от величины разрядного тока), в) произведение давления газа на длину прикатодного слоя остается неизменной величиной ( $pd_n = const$ ) [13, 15, 16]. Однако в работе [16] обнаружены отклонения в поведении нормального режима от законов подобия, которые объясняются возникновением процессов ступенчатой ионизации в катодной области нормального тлеющего разряда. Автором [13] показано, что увеличение полного тока в электрической цепи не приводит к росту плотности тока, а вызывает увеличение площади, занимаемой разрядом на катоде, и рассматриваются возможные причины такого поведения нормального режима тлеющего разряда. После того, как вся поверхность катода покрывается разрядом, наблюдается переход к аномальному режиму горения, в котором соблюдаются законы подобия:  $U_n = f_1(j/p^2)$ ,  $pl_n = f_2(j_n/p^2)$  [7, 13]. На левой ветви ВАХ  $j \leq j_n$  состояние внутри катодного слоя неустойчиво, поэтому уменьшение площади разрядного пятна на электроде является более энергетически выгодным с дальнейшим понижением разрядного тока [7, 17]. В работе [18] экспериментально обнаружено, что нормальный режим может наблюдаться только при давлениях газа вблизи и справа от точки перегиба на кривой зажигания разряда постоянного тока, а в работах [19-21] приводится теоретическое объяснение этого явления.

Причиной появления нормального режима в ВЧ разряде является также существование минимума на ВАХ разряда, однако, в отличие от разряда постоянного тока, на ВАХ всего разряда. В ВЧ емкостном разряде ВАХ плазменного объема (квазинейтральной плазмы) имеет падающий характер, а ВАХ приэлектродных слоев – растущая [22, 23]. Следовательно, когда напряжение на электродах, которое складывается из падений напряжений на слоях и на плазме, достигает минимума, реализуется нормальный ВЧ разряд. Авторами [22, 23] показано, что соответствующая минимуму нормальная плотность тока ВЧ разряда тем больше, чем выше давление газа в камере и чем длиннее межэлектродный промежуток, а также, что на более высоких частотах генератора, при прочих равных условиях, можно достичь больших величин нормальной плотности тока.

Следовательно, условия существования нормального режима тлеющего разряда постоянного тока и ВЧ разряда исследованы многими авторами довольно подробно. Однако до сих пор в литературе отсутствует какая-либо информация о нормальном режиме продольного комбинированного разряда низкого давления, когда ВЧ и постоянное напряжения прикладываются одновременно к одним и тем же электродам.

В связи с этим, целью данной работы является изучение нормального режима продольного комбинированного разряда в азоте низкого давления.

### УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились при давлениях азота и аргона  $p = 0,4 - 2$  Торр в диапазоне амплитудных значений ВЧ напряжения  $U_{rf} \leq 400$  В, постоянных токов  $I_{dc} \leq 5$  мА и частоте ВЧ поля  $f = 13,56$  МГц. На рис.1 показана схема нашей экспериментальной установки. Кварцевая трубка с внутренним диаметром 55 мм вакуумно уплотнялась между фланцами. Расстояние между плоскими параллельными электродами (один из которых представлял собой электрод-сетку) из нержавеющей стали было равно  $L = 50$  мм. ВЧ напряжение прикладывалось к одному из электродов, второй электрод (электрод-сетка) был заземлен. ВЧ электрод одновременно служил «катодом» комбинированного разряда, т.к. на него подавался отрицательный постоянный потенциал. Электрод-сетка, который также являлся «анодом» для комбинированного разряда, располагался вблизи смотрового окна камеры, через которое можно было производить фотографирование разряда. Разряд фотографировался в помощью фотокамеры Canon S3IS.

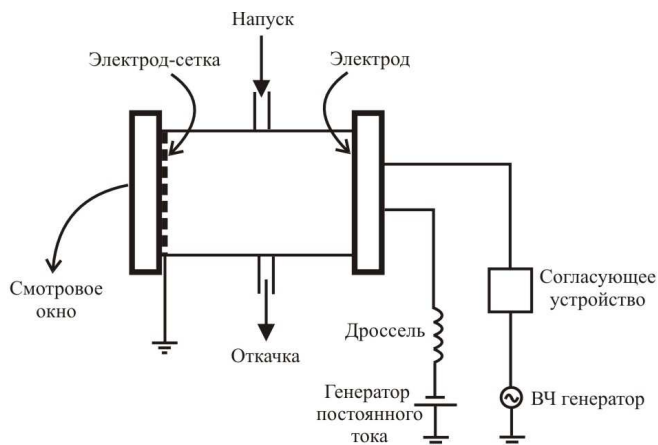


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

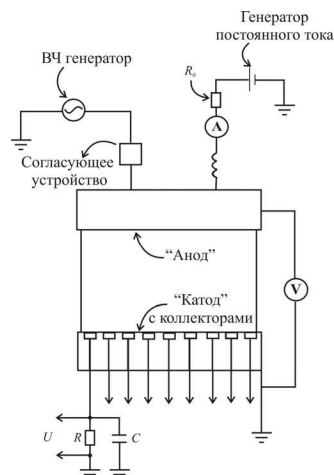


Рис. 2. Схема разрядной камеры, содержащей катод с коллекторами.

Для регистрации давления газа в диапазоне от  $10^{-3}$  Торр до атмосферного мы использовали вакуумный термоэлектрический датчик 13ВТ3-003. Откачка газа проводилась с помощью форвакуумного и турбомолекулярного насосов, что обеспечивало предельный вакуум порядка  $10^{-4}$  Торр в разрядной камере. Высокочастотный генератор подключался к потенциальному электроду через согласующее устройство П-типа. Источник питания постоянного тока подключался к «катоде» с помощью дросселя, который препятствовал нежелательному проникновению в источник ВЧ тока.

Для измерения радиального распределения ионного тока был создан электрод-катод (диаметром 55 мм) с 9 коллекторами тока, расположенными вдоль прямой линии по диаметру этого электрода. Диаметр каждого коллектора был равен 3 мм. Коллекторы электрически были изолированы от электрода, при этом собирающие поверхности коллекторов и поверхность электрода находились в одной плоскости. Схема разрядной камеры с таким электродом показана на рис.2. Ток, собираемый коллекторами, проходил через резисторы сопротивлением 1 кОм, а падение напряжения на каждом резисторе подавалось на ПК. Параллельно резисторам подключались конденсаторы, позволяющие устранить влияние ВЧ тока на измерение тока ионов. Токи на все коллекторы измерялись одновременно, при этом измерения проводились 20 раз, а затем полученные результаты усреднялись.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В настоящей работе были проведены эксперименты по изучению нормального режима разряда в продольных комбинированных (ВЧ и постоянное) электрических полях в разрядной камере с расстоянием между электродами  $L = 50$  мм. На рис.3 показано изменение постоянного тока разряда, площади разрядного пятна на катоде, а также величины  $j/p^2$  в зависимости от ВЧ напряжения, приложенного к нормальному разряду постоянного тока. Разряд постоянного тока зажигался в нормальном режиме и затем устанавливалась такая величина тока, чтобы площадь разрядного пятна была наименьшей. Затем к электродам дополнительно прикладывалось ВЧ напряжение  $U_{rf}$ . При этом наблюдалось, что с ростом  $U_{rf}$  значения постоянного тока разряда для всех исследованных в данной работе давлений практически не менялись, пока ВЧ напряжение не достигло некоторой критической величины (см. рис.3а). Для давления азота  $p = 0,5$  Торр критическое ВЧ напряжение равно  $U_{rf,кр} \approx 80$  В, для  $p = 1$  Торр -  $U_{rf,кр} \approx 155$  В и для  $p = 2$  Торр -  $U_{rf,кр} \approx 200$  В. При дальнейшем повышении ВЧ напряжения наблюдался резкий рост постоянного тока разряда. Ранее нами было показано, что продольный комбинированный разряд может гореть в трех различных режимах [24]: 1) несамостоятельный ВЧ разряд, возмущенный постоянным электрическим полем; 2) «комбинированный разряд»; 3) несамостоятельный разряд постоянного тока, возмущенный ВЧ электрическим полем. При этом переход из третьего режима комбинированного разряда во второй сопровождается быстрым ростом постоянного тока с ростом ВЧ напряжения. Таким образом, при  $U_{rf} \leq U_{rf,кр}$  наблюдается третий режим нормального комбинированного разряда, когда слабое ВЧ поле дает небольшой вклад в ионизацию газа в разрядном объеме. При таких условиях ионизация в «катодном» слое разряда постоянного тока играет значительную роль в поддержании комбинированного разряда. При достижении постоянным напряжением критической величины  $U_{rf,кр}$  разряд переходит во второй режим. При этом, благодаря сравнительно большому значению ВЧ поля, наблюдается повышенный уровень ионизации в плазменном объеме. Плотность плазмы увеличивается, соответственно, растет и величина постоянного тока разряда, происходит перестройка разряда.

На рис.3б показана динамика изменения площади, занимаемой разрядным пятном вблизи «катода», с увеличением ВЧ напряжения комбинированного разряда, горящего в нормальном режиме. Через смотровое окно разрядной камеры были сделаны фотографии нормального режима при различных ВЧ напряжениях,

прикладываемых к разряду постоянного тока. Благодаря тому, что «анод» представлял собой сетку и располагался непосредственно перед смотровым окном, сквозь него можно было фотографировать разрядное свечение вблизи «катода». Фотографии (см. рис. 4) предварительно обрабатывались при помощи программы Photoshop, затем оцифровывались, и вычислялась искомая площадь. Погрешность при вычислении площади разрядного пятна составляла не более 20%. Для всех изученных в настоящей работе давлений газа наблюдается аналогичная картина изменения площади, занимаемой разрядом вблизи «катода» (см. рис.3б), в соответствии с изменением регистрируемого постоянного тока (см. рис.3а). При значениях  $U_{rf} \leq U_{rf,кр}$  площадь разрядного пятна оставалась практически постоянной – ВЧ поле слабо влияло на поведение комбинированного разряда. А затем, начиная с  $U_{rf,кр}$ , площадь, занимаемая нормальным комбинированным разрядом вблизи «катода», начала резко увеличиваться. Этот момент соответствует переходу нормального комбинированного разряда из третьего режима во второй. Нужно заметить, что при высоких давлениях газа ( $p \geq 1$  Торр) в разрядной камере нормальный режим может наблюдаться в более широком диапазоне токов, а разрядные пятна могут быть меньшими по площади. В то время как при низких давлениях ( $p < 1$  Торр) нормальный комбинированный разряд существует в довольно узком диапазоне токов, и для стабильного существования разряда необходимо, чтобы разрядное свечение занимало довольно большую часть «катода».

При известных величинах разрядного тока  $I_{dc}$  и площади  $S$ , занимаемой разрядом, можно вычислить среднюю плотность тока разряда  $j = I_{dc} / S$ . На рис.3в приведены зависимости  $j/p^2$  от величины ВЧ напряжения, приложенного к нормальному разряду постоянного тока, для различных давлений азота. Из рисунка видно, что эти зависимости имеют спадающий характер. Кривая для каждого значения давления имеет два участка. При  $U_{rf} \leq U_{rf,кр}$  величина параметра  $j/p^2$  остается практически постоянной, что соответствует третьему режиму комбинированного разряда. При переходе во второй режим зависимости  $j/p^2$  для всех значений измеренных нами давлений имеют спадающий характер. Таким образом, из рис.3в можно сделать вывод, что для фиксированного давления газа в третьем режиме нормального комбинированного разряда средняя плотность тока практически не меняется при увеличении прикладываемого ВЧ напряжения. Однако при переходе нормального комбинированного разряда во второй режим («комбинированный разряд») увеличение площади, занимаемой разрядом, происходит быстрее, чем увеличение разрядного тока, поэтому  $j/p^2$  резко уменьшается и достигает минимума, когда разряд покрывает весь «катод». Затем, после перехода нормального комбинированного разряда в аномальный режим, величина  $j/p^2$  растет с ростом ВЧ напряжения, прикладываемого к разряду постоянного тока.

На рис. 5 показаны радиальные профили плотности ионного тока в продольном комбинированном разряде при давлениях аргона и азота  $p = 1$  Торр. Эти данные были получены при помощи разрядной камеры, содержащей «катод» с коллекторами, схема которой показана на рис. 2 (расстояние между электродами  $L = 40$  мм). Как в аргоне, так и в азоте радиальные профили ионного тока для  $U_{rf} < 86$  В получены для нормального комбинированного разряда, покрывающего «катод» только частично. При более высоких ВЧ напряжениях разрядное свечение полностью заполняет камеру, т.е. наблюдается аномальный продольный комбинированный разряд. Профили ионного тока нормального комбинированного разряда имеют форму, схожую с

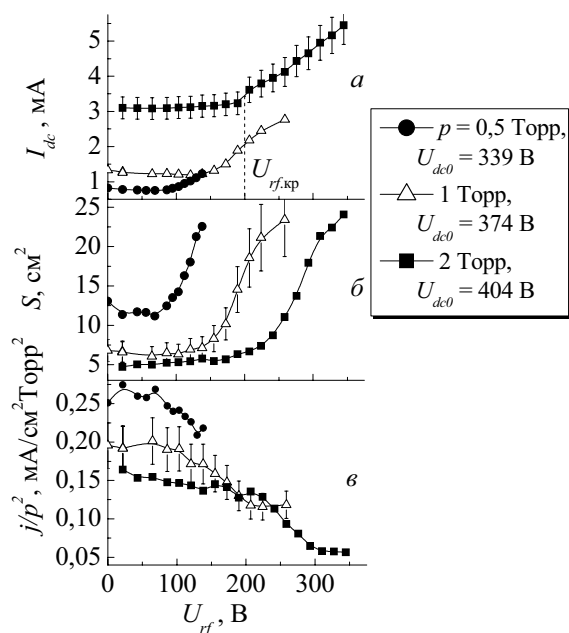


Рис.3. Зависимости а) постоянного тока разряда, б) площади разрядного пятна, в) величины  $j/p^2$  от ВЧ напряжения, приложенного к разряду постоянного тока для фиксированных давлений азота,  $L = 50$  мм.

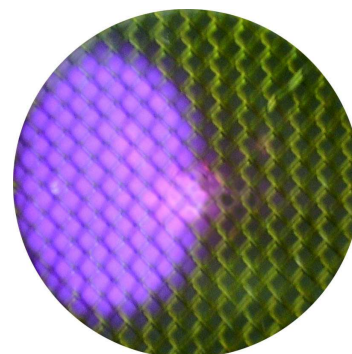


Рис.4. Пример полученной через смотровое окно с анодом-сеткой фотографии электрода с разрядным пятном в нормальном режиме продольного комбинированного разряда, азот,  $p = 1$  Торр,  $U_{rf} = 86$  В,  $U_{dc} = 350$  В.

профилями нормального режима разряда постоянного тока (см. рис.5). В центре разрядного пятна плотность тока максимальна и уменьшается при приближении к границам пятна. Когда продольный комбинированный разряд заполняет всю разрядную камеру, профили плотности ионного тока становятся более однородными, однако наблюдаются небольшие пики ионного тока при приложении повышенного ВЧ напряжения. По-видимому, это связано с вкладом ВЧ напряжения, которое вызывает повышенный нагрев электронов вблизи стенки разрядной трубки. Причины этого эффекта были изучены в работе [25]. Кроме того, из рис. 5 следует, что для плазменных технологий травления полупроводниковых материалов и осаждения тонких пленок подходит только «аномальный» режим продольного комбинированного разряда, в то время как нормальный режим неприемлем для проведения технологических процессов, требующих высокой однородности параметров плазмы по площади электродов.

На рис.6а приведены зависимости постоянного напряжения нормального комбинированного разряда от постоянного тока при различных фиксированных значениях ВЧ напряжения и давлении азота  $p = 1$  Торр. При  $U_{rf} = 0$  В на рисунке приведена вольт-амперная характеристика нормального разряда постоянного тока. Считается, что в нормальном режиме напряжение на разряде остается постоянным, и с ростом разрядного тока увеличивается только площадь, которую занимает разряд на электроде. Однако, как видно из рис.6а, при токах  $I_{dc} \leq 2,5$  мА в нормальном режиме разряда постоянного тока напряжение уменьшается с ростом  $I_{dc}$ . При небольших ВЧ напряжениях, приложенных к нормальному режиму разряда постоянного тока (см., например, кривую для  $U_{rf} = 86$  В на рис.6а), вольт-амперная характеристика имеет два участка. Один из них спадающий (при  $I_{dc} \leq 3,5$  мА), а на втором участке (при  $I_{dc} > 3,5$  мА)  $U_{dc}$  не изменяется с ростом тока. Кроме того, имеется участок на ВАХ нормального комбинированного разряда, который полностью совпадает с ВАХ нормального режима постоянного тока (при  $I_{dc} \leq 2$  мА). Именно при таких условиях существует третий режим комбинированного разряда (несамостоятельный разряд постоянного тока, возмущенный ВЧ электрическим полем). При  $I_{dc} > 2$  мА комбинированный разряд переходит во второй режим горения. Соответственно, с увеличением ВЧ напряжения, прикладываемого к разряду постоянного тока, для поддержания нормального комбинированного разряда во втором режиме достаточно прикладывать меньшее постоянное напряжение. При больших ВЧ напряжениях  $U_{rf} > 86$  В ВАХ также состоят из двух участков, однако комбинированный разряд зажигается сразу во втором режиме. При небольших токах постоянное напряжение на электродах уменьшается с увеличением тока, а затем, при более высоких значениях тока, принимает постоянное значение.

Наличие спадающих участков, по-видимому, связано с тем, что при небольших токах и значительных ВЧ напряжениях разряд занимает небольшую площадь на электроде, наблюдается меньшая плотность плазмы и, соответственно, плотность тока (см. рис. 6б). В таких условиях для поддержания нормального режима необходимо большее постоянное напряжение на разряде. С ростом тока увеличивается площадь разрядного пятна на катоде, уход заряженных частиц из центра пятна в бестоковую область вследствие амбиполярной диффузии уменьшается, и постоянное напряжение разряда сначала понижается, а затем принимает некоторое постоянное значение. Если площадь, занимаемая разрядным пятном вблизи поверхности «катода», достаточно

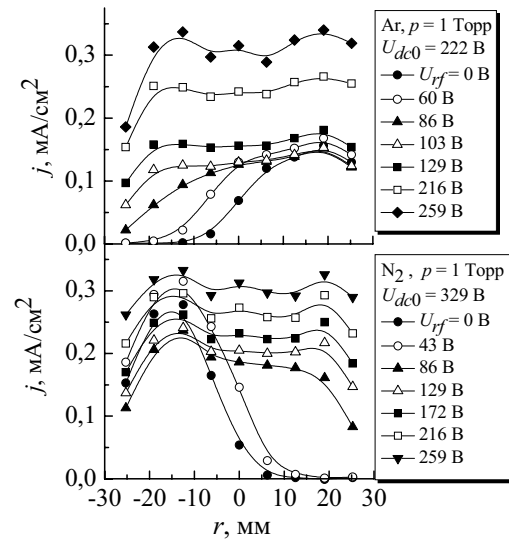


Рис.5. Радиальное распределение плотности ионного тока нормального комбинированного разряда при давлении аргона и азота  $p = 1$  Торр,  $L = 40$  мм.

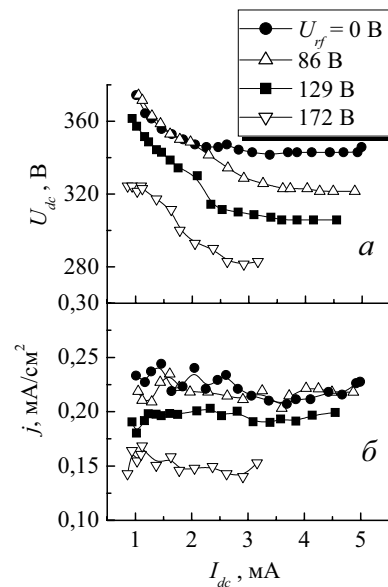


Рис.6. Зависимости а) постоянного напряжения, б) нормальной плотности тока в комбинированном разряде от величины постоянного тока разряда для различных фиксированных значений ВЧ напряжения и давлении азота  $p = 1$  Торр,  $L = 50$  мм.

большая, то уход заряженных частиц происходит только с граничных областей пятна, и для поддержания разряда достаточно более низкой степени ионизации, поэтому понижается плотность тока, по сравнению с разрядным пятном маленькой площади. Из рис. 6б можно сделать вывод, что средняя плотность тока комбинированного разряда практически не меняется с увеличением разрядного тока при фиксированном давлении.

На рис. 7 приведены зависимости постоянного тока, а также постоянного напряжения комбинированного разряда от ВЧ напряжения, прикладываемого к нормальному разряду постоянного тока. Эксперименты для двух газов (аргон, азот) проводились в одной и той же разрядной камере с расстоянием между электродами  $L = 40$  мм. Как видно из рис. 7, и для аргона, и для азота постоянный ток разряда увеличивался, а постоянное напряжение уменьшалось с ростом ВЧ напряжения, поскольку приложенного ВЧ напряжения было достаточно для поддержания необходимого уровня ионизации и стабильного горения комбинированного разряда в нормальном режиме. Из рис. 7 можем сделать вывод, что процессы, происходящие в нормальном комбинированном разряде в молекулярных и атомарных газах, подобны.

На рис. 8 представлены осевые распределения интенсивности свечения нормального режима комбинированного разряда для различных значений постоянного и ВЧ напряжений и давлений азота  $p = 0,4$  Торр и  $p = 2$  Торр. Чтобы получить данные распределения, был сделан ряд фотографий (перпендикулярно оси разрядной камеры) комбинированного разряда, горящего в нормальном режиме. Затем фотографии оцифровывались при помощи программы MathCad 2001 Professional. Кривые для  $U_{rf} = 0$  В (см. рис. 8) соответствуют нормальному режиму разряда постоянного тока, когда вблизи катода имеется пик интенсивности свечения, находящийся в отрицательном свечении, затем наблюдается темное фарадеево пространство, простирающееся до анода, вблизи которого также виден пик, соответствующий анодному свечению. Вторичные электроны, высвобождаемые с поверхности катода вследствие ион-электронной эмиссии, ускоряются в постоянном поле в катодном слое и производят интенсивную ионизацию. В отрицательном свечении электрическое поле мало, поэтому электроны теряют энергию, совершая ионизирующие и возбуждающие столкновения с молекулами газа; при этом наблюдается пик интенсивности свечения. В темном фарадеевом пространстве разрядный ток переносится диффузионным потоком электронов (движущихся в сторону анода), причем его величина с удалением от границы отрицательного свечения уменьшается. В этой области разряда энергия электронов недостаточна для каких-либо неупругих столкновений, поэтому электроны только упруго рассеиваются на молекулах газа. На некотором расстоянии от катода диффузионный ток становится меньше разрядного тока, электрическое поле начинает усиливаться для того, чтобы ток переносился за счет дрейфа электронов. Анод в тлеющем разряде действует как коллектор электронов, уравнивая ток электронов в разрядной области полному разрядному току. Величина анодного падения напряжения (на анодном слое) сильно зависит от положения анода в разряде. Анодное свечение возникает в случае необходимости в дополнительной ионизации в анодном слое, чтобы приравнять разрядный ток во внешней цепи и хаотический электронный ток, поступающий в анодный слой. Анодное падение напряжения сравнимо с потенциалом ионизации молекул газа электронным ударом. С увеличением разрядного промежутка (при фиксированных давлении газа и токе) анодное свечение возникает, когда диффузионный поток перестает играть доминирующую роль в переносе тока через темное фарадеево пространство.

При наложении на нормальный разряд постоянного тока ВЧ напряжения  $U_{rf} = 151$  В практически не изменяется профиль разрядного свечения (см. рис. 8), лишь немного увеличивается интенсивность отрицательного свечения из-за того, что падение ВЧ напряжения на катодном слое способствует набору электронами более высокой энергии и повышенной ионизации в этой области. Если же приложить  $U_{rf} \geq U_{rf,кр}$ , то разряд перейдет во второй режим. Для давления азота  $p = 2$  Торр переход разряда из третьего во второй режим наблюдается при  $U_{rf,кр} \approx 200$  В (см. рис. 3а). На рис. 8 для  $p = 2$  Торр второму режиму нормального комбинированного разряда соответствуют профили свечения при ВЧ напряжениях  $U_{rf} = 237$  В и 323 В, а для  $p = 0,4$  Торр - при  $U_{rf} = 151$  В. С повышением  $U_{rf}$  ВЧ электрическое поле усиливается не только в катодном и

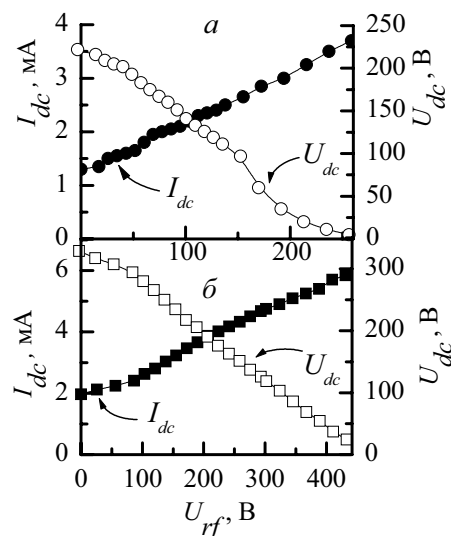


Рис. 7. Зависимости постоянного тока разряда  $I_{dc}$  и постоянного напряжения на электродах  $U_{dc}$  от приложенного ВЧ напряжения  $U_{rf}$ , давление газа  $p = 1$  Торр, расстояние между электродами  $L = 40$  мм: а) аргон,  $U_{dc0} = 222$  В,  $I_{dc0} = 1,3$  мА б) азот,  $U_{dc0} = 330$  В,  $I_{dc0} = 2$  мА.



анодном слоях, но и в центральной области разряда, что приводит к формированию области повышенной ионизации (что видно на рис. 8 в виде пика интенсивности свечения при  $z = 20-25$  мм). Кроме того, резко увеличивается интенсивность свечения вблизи «анода». Во втором режиме комбинированного разряда вблизи анода при давлении  $p = 0,4$  Торр (см. на рис. 8 профиль для  $U_{rf} = 151$  В) видны два пика свечения. Более близкий к аноду пик ( $z = 48$  мм) соответствует анодному свечению и сохраняется при выключении ВЧ напряжения. Второй пик ( $z = 43$  мм) появляется в той части полупериода ВЧ электрического поля, когда в результате наложения достаточно высокого ВЧ напряжения анод становится мгновенным катодом и вблизи него формируется приэлектродный слой ВЧ емкостного разряда (выключение постоянного напряжения не изменяет положение этого пика). Это приводит к тому, что толщина анодного слоя увеличивается, движущаяся граница слоя выталкивает электроны в плазменный объем, сообщая им при этом энергию. Эти более быстрые электроны способны возбуждать и ионизовать молекулы газа, что и приводит к появлению пика свечения вблизи границы приэлектродного слоя. Следовательно, два пика свечения вблизи анода видны в разные полупериоды ВЧ поля: прижимающееся к аноду свечение видно при его положительном мгновенном потенциале, когда анод собирает электроны, а второй пик появляется в следующем полупериоде, когда «анод» приобретает отрицательный потенциал и отталкивает от себя электроны. При увеличении давления газа второй пик приближается к аноду и затем сливается с анодным свечением. Нужно отметить, что два пика интенсивности свечения вблизи анода наблюдаются не только в нормальном, но и в аномальном продольном комбинированном разряде.

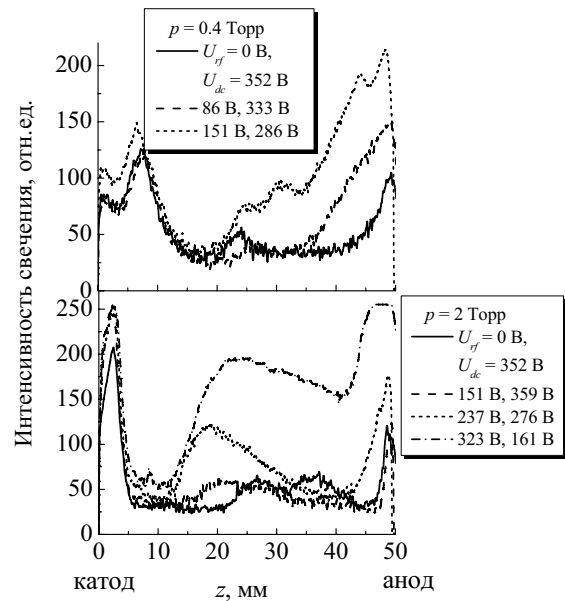


Рис.8. Осевые распределение интенсивности свечения нормального режима комбинированного разряда для различных значений постоянного и ВЧ напряжений и давлений азота  $p = 0,4$  Торр и  $p = 2$  Торр,  $L = 50$  мм.

**МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОДОЛЬНОГО КОМБИНИРОВАННОГО РАЗРЯДА**

Для выяснения процессов, происходящих в продольном комбинированном разряде, было проведено моделирование при помощи программы OOPIC Pro (Tech-X Corporation, [http://www.txcorp.com/products/OOPIC\\_Pro/](http://www.txcorp.com/products/OOPIC_Pro/)). Были выбраны следующие условия для расчетов: зазор между электродами  $L = 50$  мм, радиус разрядной трубки  $R = 27,5$  мм, ВЧ напряжение  $U_{rf} = 350$  В,  $U_{dc} = 200$  В и давление аргона  $p = 1$  Торр.

OOPIC Pro – трехмерный код, использующий принцип «частица в ячейке», разработанный для моделирования различных типов плазмы, пучков заряженных частиц, генерированных внешними электрическими и магнитными полями в газах низкого и среднего давлений с учетом широкого спектра граничных условий. OOPIC Pro включает в себя алгоритмы Монте-Карло для моделирования столкновений заряженных частиц в разных газах, включая такие эффекты, как обмен зарядами между ионами и нейтральными частицами, упругое и неупругое рассеяние электронов, а также ионизацию и возбуждение под действием электронов. При создании рабочего файла программы были выбраны следующие условия моделирования: временной шаг –  $10^{-10}$  с, температура нейтрального газа –  $0,026$  эВ, были учтены столкновения заряженных частиц с нейтральным газом, приводящие к ионизации, начальная плотность электронов, а также положительных ионов были приняты равными  $10^{15}$  м<sup>3</sup>. Программа OOPIC Pro позволяет учитывать вторичную эмиссию электронов с поверхности электродов. При проведении моделирования коэффициент ион-электронной эмиссии принимался равным 0,1.

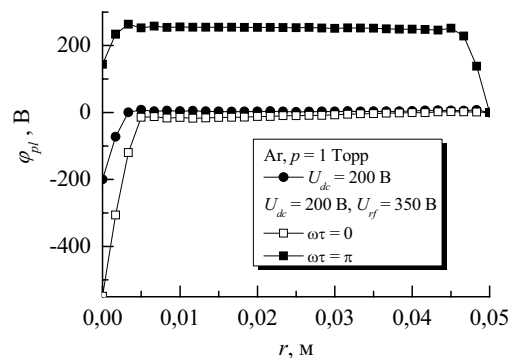


Рис.9. Распределение потенциала плазмы в разряде постоянного тока и в комбинированном разряде в различные моменты периода ВЧ поля.

Результаты моделирования приведены на рис. 9 – 11. На этих рисунках «катод» и ВЧ электрод расположены слева, а заземленный «анод» - справа. Для сравнения показаны результаты моделирования для разряда постоянного тока, а также для двух моментов периода ВЧ поля в продольном комбинированном разряде. На рис. 9 показаны профили потенциала плазмы. Из рисунка видно, что в разряде постоянного тока сформировался катодный слой, а также имеется область квазинейтральной плазмы, в которой падение потенциала практически постоянно. Если к катоду приложить одновременно с постоянным еще и ВЧ напряжение, то в момент периода  $\omega t = 0$  падение потенциала в «катодной» области значительно увеличится. Соответственно, значительно повысится поток электронов из этой области и возрастет интенсивность ионизации вблизи «катодного» слоя, что и приводит к увеличению интенсивности свечения разряда на рис. 8. Через половину периода ВЧ поля в момент  $\omega t = \pi$  ситуация меняется, «анод» приобретает отрицательный потенциал по отношению к плазменному объему и становится мгновенным «катодом». Электрическое поле вблизи правого электрода (рис.10) выталкивает электроны из анодного слоя в плазменный объем, сообщая им повышенную энергию. Динамика осевого профиля плотности электронов хорошо видна на рис.11. Набравшие энергию электроны неупруго сталкиваются с молекулами газа и вызывают появление пика интенсивности свечения вблизи границы приэлектродного слоя (о чем говорилось выше). При условиях расчетов ( $U_{rf} = 350$  В,  $U_{dc} = 200$  В) ВЧ напряжение еще недостаточно велико для формирования заметного пика плотности электронов вблизи «анода», но при более высоких значениях  $U_{rf}$  этот пик появляется.

Как видно из рис.9, «катод» остается отрицательно заряженным по отношению к мгновенному потенциалу плазмы в течение всего периода ВЧ поля, даже когда его потенциал относительно земли становится положительным. Т.е. его поверхность постоянно бомбардируется потоком положительных ионов, а вышедшие из него вторичные электроны ускоряются в «катодном» слое. Поэтому наложение ВЧ напряжения привело к увеличению плотности электронов  $n_e$  в отрицательном свечении примерно вдвое (рис.11), хотя в темном фарадеевом пространстве ( $z > 0,015$  м)  $n_e$  возросла не более, чем на 30%.

## ВЫВОДЫ

Данная работа посвящена изучению нормального продольного комбинированного разряда в газах низкого давления. Получено, что при увеличении ВЧ напряжения, прикладываемого к горящему разряду постоянного тока в нормальном режиме, комбинированный разряд горит сначала в третьем режиме, а затем, при некоторой критической величине ВЧ напряжения переходит во второй режим. В третьем режиме площадь разрядного пятна практически не меняется, а после перехода во второй начинает резко увеличиваться. Также нами было исследовано радиальное распределение плотности ионного тока в нормальном и обычном продольном комбинированном разряде. Показано, что радиальные профили в нормальном режиме имеют форму колокола, принимая максимальные значения в центре пятна и уменьшаясь при приближении к границам пятна. Получено, что при увеличении ВЧ напряжения, прикладываемого к нормальному режиму разряда постоянного тока, плотность тока в разрядном пятне уменьшалась. В третьем режиме продольного комбинированного разряда профиль интенсивности свечения совпадает с профилем для нормального режима разряда постоянного тока, а интенсивность свечения вблизи «анода», а следовательно, степень ионизации, повышается. Этот вывод соответствует результатам моделирования, проведенного при помощи программы ООПИС Pro. Когда комбинированный разряд переходит во второй режим, резко возрастает интенсивность свечения в центре разряда, а также вблизи «анодного» слоя. Кроме того, вблизи «анода» появляются два пика свечения. Один пик (ближе к «аноду») соответствует анодному свечению. Второй пик появляется из-за того, что в определенную

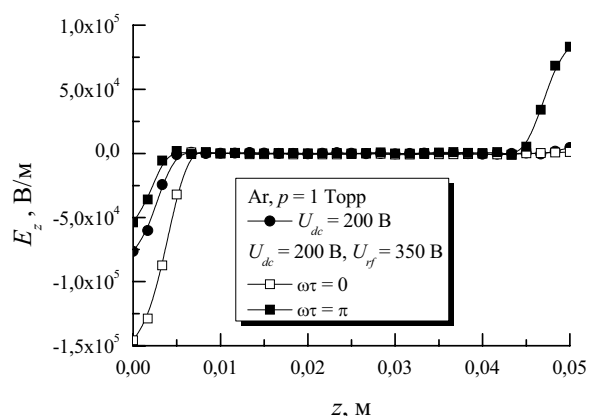


Рис.10. Распределение напряженности продольного электрического поля в разряде постоянного тока и в комбинированном разряде в различные моменты периода ВЧ поля.

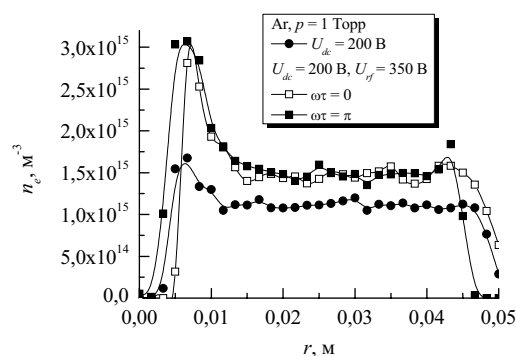


Рис.11. Распределение плотности электронов в разряде постоянного тока и в комбинированном разряде в различные моменты периода ВЧ поля.



часть периода ВЧ поля «анод» комбинированного разряда становится мгновенным «катодом» и вблизи него формируется приэлектродный слой ВЧ емкостного разряда, из которого выталкиваются электроны, которые, ускоряясь в поле, вызывают возбуждение молекул газа. Как для нормального комбинированного разряда, так и для обычного комбинированного разряда характерны три режима горения, а также наличие двух пиков интенсивности свечения вблизи «анода», которые формируются во втором режиме.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cristescu G. D. Eine neue elektrische Entladungsform, die durch Überlagerung zweier verschiedenartiger Entladungen erhalten wurde // *Annalen der Physik*. – 1960. – F. 7, B. 6. – S. 153-155.
2. Ligenza J. R. Silicon Oxidation in an Oxygen Plasma Excited by Microwaves // *J. Appl. Phys.* – 1965. – Vol. 36, №9. – P. 2703-2707.
3. 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.
4. 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.
5. Рахимова Т.В., Рахимов А.Т. К вопросу о стабилизации газового разряда высокочастотным электрическим полем // *Физика плазмы*. - 1975. -Т.1, №5. - С. 854-857.
6. 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.
7. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда*. – М.: Наука, 1987. – 592 с.
8. 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.
9. 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.
10. Kawamura E., Lichtenberg A.J., Lieberman M.A. Secondary electrons in rf and dc/rf capacitive discharges // *Plasma Sources Sci. Technol.* – 2008. – Vol.17, № 5. – P. 045002.
11. 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.
12. *Радиофизическая электроника* / Под ред. Капцова Н.А. Из-во Московского университета, 1960. - С. 470-471.
13. Королев Ю.Д. Интерпретация явления постоянства плотности тока в нормальном тлеющем разряде // *ЖТФ*. – 1987. – Т. 57, № 2. -С. 380-382.
14. Мелехин В.Н., Наумов Н.Ю. О природе катодного пятна нормального тлеющего разряда // *ЖТФ*. – 1986. - Т. 12, № 2. – С. 99-103.
15. Чистяков П.Н. Законы подобия при нормальном тлеющем разряде в неоне и аргоне // *Письма в ЖТФ*. – 1971. - Т. 41, №8. - С. 1672-1674.
16. Чистяков П.Н. Некоторые зависимости нормального катодного падения потенциала в инертных газах // *ЖТФ*. – 1970. - Т. 40, № 2. - С. 303-304.
17. Райзер Ю.П., Суржиков С.Т. Еще раз о природе эффекта нормальной плотности тока на катоде тлеющего разряда // *ЖТФ*. – 1987. - Т.13, №. 8. - С. 452-455.
18. Лисовский В.А., Яковин С.Д. Характеристики катодного слоя тлеющего разряда низкого давления в аргоне и азоте. // *Письма в ЖТФ*. – 2000. - Т. 26, № 19. - С. 88-94.
19. Лисовский В.А., Харченко Н.Д. Условия появления нормального режима разряда постоянного тока низкого давления // *ФИП*. – 2006. – Т. 4, № 3-4. – С. 184-186.
20. Кудрявцев А.А., Цендин Л.Д. Неустойчивость Таунсендовского разряда на правой ветви кривой Пашена // *Письма в ЖТФ*. – 2002. - Т. 28, № 24. - С. 36-42.
21. Кудрявцев А.А., Морин А.В., Цендин Л.Д. Роль нелокальной ионизации в формированию коротких тлеющих разрядов // *ЖТФ*. – 2008. – Т.78, № 8. – С. 71-82.
22. 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.
23. Лисовский В.А. Нормальный режим ВЧ разряда в аммиаке // *Вісник Харківського національного університету, серія фізична "Ядра, частинки, поля"*. – 2008. – №. 823. - Вип. 3/39. - С. 97-102.
24. Lisovskiy 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.
25. Lisovskiy V.A., Kharchenko N.D., Yegorenkov V.D. Radial structure of low pressure rf capacitive discharges // *Vacuum*. – 2010. - Vol. 84, № 1. - P. 782–791.