

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Сердитов Константин Юрьевич

Особенности пространственного распределения кинетических и оптических характеристик двухкамерных источников газоразрядной плазмы

01.04.08 - физика плазмы

01.04.05 - оптика

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2013

Работа выполнена на кафедре оптики физического факультета Санкт-Петербургского Государственного Университета

Научные руководители: доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
ТИМОФЕЕВ Николай Александрович

кандидат физико-математических наук, доцент  
КУДРЯВЦЕВ Анатолий Анатольевич

Официальные оппоненты: БЫЧКОВ Владимир Львович  
доктор физико-математических наук, старший  
научный сотрудник, Московский Государственный  
Университет им. Ломоносова, ведущий научный  
сотрудник

НИКАНДРОВ Дмитрий Сергеевич  
кандидат физико-математических наук,  
ЗАО «Светлана-Рост», инженер-технолог

Ведущая организация: Санкт-Петербургский Государственный  
Политехнический Университет

Защита состоится 28 февраля 2013 года в 14 ч. 30 мин. на заседании совета Д 212.232.45 по защите докторских и кандидатских диссертаций на базе Санкт-Петербургского Государственного Университета по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Петродворец, ул. Ульяновская, д.1, Малый Конференц-зал физического факультета.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. М. Горького СПбГУ.

Автореферат разослан «    » января 2013 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических наук



Ионих Ю. З.

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы

Развитие современных технологий неотъемлемо связано с использованием плазмы, поскольку её уникальные свойства позволяют реализовывать более экстремальные условия и более гибкое управление параметрами по сравнению с остальными тремя состояниями вещества.

Изменениями длительности активной фазы и скважности разряда, вкладываемой мощности и других параметров режима, удается достаточно тонко управлять различными характеристиками плазмы [1-9]. При этом большое значение имеет возможность управлять температурой электронов, потоками и концентрациями заряженных и возбужденных частиц, как в разрядном объеме, так и на испытуемый образец, подвергаемый плазменной обработке [5-9].

Такое распределение параметров часто является благоприятным для применения в плазменных технологиях. В качестве примера можно рассмотреть микроэлектронную промышленность, где газоразрядная плазма применяется для осуществления процессов травления, осаждения, полимеризации и многих других [1-2]. Другим известным применением можно считать использование в качестве источника пучка отрицательных ионов для ядерного синтеза [3].

Потребность в тонком и предсказуемом управлении распределением параметров плазмы для технологических применений делает актуальным изучение новых источников плазмы для дальнейшего развития и улучшения параметров промышленных процессов.

В последние годы возрос научный и практический интерес к так называемым двухкамерным (или тандемным) источникам, характерной особенностью которых является наличие двух соединенных между собой камер различного размера. Одна из них (обычно небольшого размера), также называемая разрядной, где вкладывается мощность от внешнего источника (как правило высокочастотного поля) и образуется плазма. Вторая, больших размеров, также называемая диффузионной, где плазма существует в основном за счет переноса частиц и энергии из разрядной камеры.

Режим работы подобного устройства в активной фазе характеризуется распределением параметров плазмы, определяемым как местом локализации вводимой энергии, так и ее перераспределением в объеме. В типичном случае,

высокими значениями концентраций заряженных частиц и электронной температуры в разрядной камере и плавным их спадом при переходе в диффузионную камеру.

При использовании двухкамерных источников плазмы наблюдаются различные физические эффекты, не имеющие прямых аналогий в традиционных геометриях. В частности, можно выделить: серию статей французских исследователей [11-13] посвященную формированию двойных слоев в диффузионном объеме двухкамерного индуктивно-связанного источника плазмы электроотрицательных газов; серию статей болгарских исследователей [14-16] посвященную созданию и анализу двумерной модели двухкамерного источника плазмы и т.п. (см., например, [17-20]).

В тоже время во всех известных руководствах и учебной литературе по физике и технике плазмы рассматриваются простейшие геометрии (плоскопараллельная, цилиндрическая и т.п.). К сожалению, эффекты и явления, возникающие в традиционной геометрии разрядах не могут быть прямо экстраполированы на двухкамерные конструкции. Необходимо заметить, что создание адекватной модели двухкамерных разрядов не является тривиальной задачей. Сложная форма геометрии разряда определяет её усложнение для подобных источников. В частности, продольные потоки частиц и энергии, которыми, как правило, пренебрегают в моделях стационарного разряда в трубках постоянного сечения [21], играют здесь решающую роль, и как следствие, делают её как минимум двумерной. В связи с этим представляется особенно интересным исследовать характерные особенности подобных разрядов и провести подробный анализ происходящих физических процессов, что в свою очередь может открыть новые технологические и исследовательские перспективы.

Таким образом дальнейшее развитие методик описания и моделей, учитывающих необходимые физические характеристики, является актуальным направлением развития физики плазмы.

### Цель работы

Целью настоящей работы являлось построение модели и исследование особенностей распределения электрокинетических и оптических характеристик газоразрядной плазмы низкого давления в двухкамерных источниках плазмы и

выработка физических принципов для прогнозирования их свойств в интересующих условиях.

### Научная новизна и практическая ценность

Проведены работы по исследованию новых эффектов в пространственном распределении заряженных частиц в двухкамерном плазмохимическом реакторе и разработаны физические принципы для управления и контроля за их характеристиками:

1. Исследованы пространственные характеристики разряда (концентрации электронов, положительных и отрицательных ионов, возбужденных и метастабильных атомов, электронной температуры, потоков и потенциала плазмы) как в активной фазе, так и в послесвечении, для электроположительного атомарного аргона и электроотрицательного молекулярного кислорода для давлений 1, 5, 20 и 50 мТорр при различных геометрических конфигурациях разрядной камеры.
2. Обнаружен новый тип пространственного распределения характеристик плазмы связанный с нелокальным переносом тепла, когда мощность выделяется в малой камере, а максимум концентрации плазмы находится в большой камере.
3. Показано, что в активной фазе разряда в режиме локального переноса тепла наличие или отсутствие балластного объема практически не влияет на средние параметры плазмы в разрядной камере. В то же время, в режиме нелокального переноса тепла балластный объем играет решающую роль в процессах, происходящих в разрядном объеме. При этом, в паузах активной фазы в атомарном аргоне, когда источники ионизации отсутствуют, даже в случае локального переноса тепла имеет место сильное влияние параметров большой камеры на характеристики малой. В частности, в процессе послесвечения максимум концентрации плазмы смещается из малой разрядной камеры в большую балластную, а амбиполярное поле меняет знак.
4. Показано, что имеются принципиальные трудности при зондовой диагностики отрицательных ионов, связанные с сильным влиянием держателя зонда на их пространственные распределения. Для исключения возможных ошибок предложено использовать двухсекционные зондовые держатели.

5. Предложен новый способ для управления параметрами электроотрицательной плазмы, основанный на выявленных особенностях пространственного распределения отрицательных ионов по отношению к граничным поверхностям. Показано, что изменения конфигурации разрядного объема, например, путем ввода в разрядный объем дополнительных стержней, позволяет управлять степенью электроотрицательности в требуемом месте разряда. Как приложение, этот метод может быть использован для улучшения вытягивания отрицательных ионов в соответствующих ионных источниках.

### Защищаемые положения

1. Модель двухкамерного источника плазмы, позволяющая корректно описывать основные параметры разряда в атомарных и молекулярных газах.
2. Проведено исследование активной фазы разряда в рассматриваемом двухкамерном объеме в электроположительном атомарном аргоне и в отрицательном молекулярном кислороде, в диапазоне давлений от 1 до 50 мТорр.
3. Показано, что в зависимости от давления, возможна реализация двух различных сценариев распределения пространственных характеристик плазмы: локализация около катушек при  $\lambda_{th} < L$  (локальный режим переноса тепла), либо практически однородное распределение по всему разрядному объему при  $\lambda_{th} > L$  (нелокальный режим переноса тепла).
4. Показано, что изменение химического состава газа, в частности, его электроотрицательности, при неизменном давлении и геометрической конфигурации разряда, также приводит к кардинальному перераспределению пространственных характеристик, и переходу к нелокальному режиму в виде смещения максимумов концентраций плазмы в балластный объем.
5. Проведено исследование фазы послесвечения разряда в рассматриваемом двухкамерном объеме в аргоне в диапазоне давлений от 1 до 50 мТорр.
6. Показано, что переход к режиму послесвечения при неизменном давлении приводит к относительному увеличению концентраций плазмы в балластном объеме в процессе послесвечения в режиме локального переноса тепла.

7. Показано, что существуют принципиальных трудностях в получении корректной информации о невозмущенных характеристиках отрицательных ионов из зондовых измерений и проведена их количественная оценка.

### Публикации и апробация работы

Материалы диссертации опубликованы в рецензируемых журналах и тезисах докладов, список которых представлен в конце автореферата.

Результаты работы были представлены на российских и международных научных конференциях:

- Всероссийская конференция по физике низкотемпературной плазмы ФНТП-2005, Россия, Петрозаводск, 2005
- Молодежная научная конференция «Физика и прогресс», Россия, СПб, 2005
- 48th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, USA, Philadelphia, Pennsylvania, 2006
- 60th Gaseous Electronics Conference, USA, Arlington, Virginia, 2007
- 49th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, France, Paris, 2007
- XXXV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, Россия, Звенигород, 2008
- VI International Conference Plasma Physics and Plasma Technology. Belarus, Minsk 2009
- 63rd Gaseous Electronics Conference, Paris, France, 2010
- XXXVIII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, Россия, Звенигород, 2011
- 65rd Gaseous Electronics Conference, Austin, Texas, USA, 2012

### Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, содержит 107 страниц машинописного текста, включая 82 рисунка и 9 таблиц. Список цитированной литературы содержит 99 наименований.

## Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы, отмечена научная новизна и практическая ценность, представлена структура диссертации и публикации по её теме.

В первой главе проведен обзор существующей литературы по теме диссертации. Рассмотрены существующие подходы к описанию характеристик газоразрядной плазмы, основные модели и их классификация. Представлена последовательность шагов, необходимая для численного моделирования разряда. Проведено обоснование выбора модели для определения основных характеристик газового разряда.

Во второй главе представлена двумерная гибридная самосогласованная модель для описания параметров исследуемого двухкамерного разряда.

Модель разряда основывается на кинетическом описании электронов и гидродинамическом описании ионов и нейтральных частиц. Для концентраций ионных и нейтральных компонент плазмы решаются соответствующие уравнения непрерывности с учетом как процессов пространственного переноса, так и всевозможных объемных процессов их рождения и гибели. Выражения для их потоков записываются в стандартном дрейфово-диффузионном приближении в предположении Максвелловского распределения по энергии для тяжелых частиц. Таким образом, в решаемый набор уравнений включаются уравнения баланса энергии, частиц и уравнение Пуассона. Более подробно модель описана в тексте диссертации и в [22-26].

В третьей главе представлены результаты моделирования стационарного разряда при различных начальных условиях, а также рассмотрены наиболее интересные эффекты и явления в исследуемом двухкамерном плазменно-химическом реакторе. Были выполнены симуляции в диапазоне условий по давлению от 5 до 50 мТорр и по вводимой мощности от 1 до 100 Вт, как для аргона, так и для кислорода.

Было показано, что в зависимости от давления может реализовываться два различных сценария пространственного распределения. Так как в индуктивно-связанном разряде мощность, вкладываемая в разряд, выделяется в узком скин-



слое около катушек индуктивности и рассеивается при помощи механизма электронной теплопроводности с характерной длиной  $\lambda_{th} = \sqrt{4D_{th}\tau}$  (где  $D_{th}$  - коэффициент электронной теплопроводности,  $\tau$  - характерное время релаксации электронов по энергиям). А поскольку характерная длина электронной теплопроводности зависит главным образом от давления газа ( $\lambda_{th} \propto 1/p$ ), то изменения давления (или же параметра  $p\Lambda$ ) могут приводить к различным соотношениям между  $\lambda_{th}$  и характерной диффузионной длиной разрядного объема  $\Lambda$ , определяющей скорость спада концентрации плазмы в (для цилиндра, комбинацией которых является рассматриваемая двухкамерная конструкция,  $\Lambda = R/2.4$ , где  $R$  - радиус цилиндра). Для  $\lambda_{th} < \Lambda$  вводимая энергия остается локализованной в точке ввода, около катушек, и электронная температура быстро спадает с расстоянием от них (как  $e^{-x/\lambda_{th}}$ ). С уменьшением давления, когда  $\lambda_{th} > \Lambda$ , тепло переносится заметно дальше от источника, что делает температуру электронов  $T_e$  более однородной по объему. В таких случаях, для таких важных характеристик как скорость возбуждения и скорость ионизации, зависящих от  $T_e$ , могут реализовываться два базовых сценария их пространственного распределения, что и было подтверждено моделированием разряда:

- локализация около катушек при  $\lambda_{th} < \Lambda$  (локальный режим переноса тепла), как показано на рисунке 1.

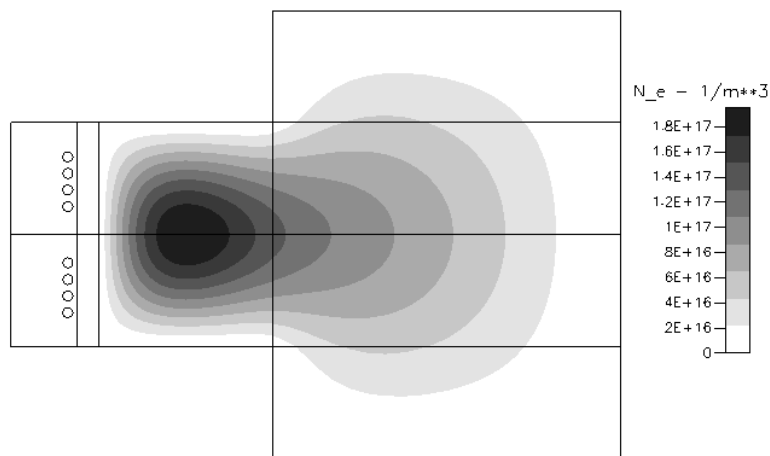


Рисунок 1. Двумерное распределение концентрации электронов в исследуемой двухкамерной конструкции в аргоне при давлении 20 мТорр и вводимой мощности 25 Вт в активной фазе разряда.

- практически однородное распределение по всему разрядному объему при  $\lambda_{th} > \Lambda$  (нелокальный режим переноса тепла), как показано на рисунке 2.

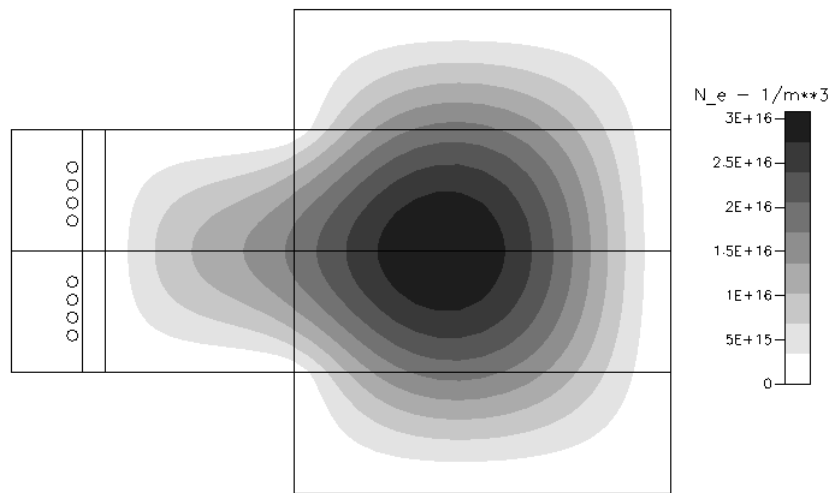


Рисунок 2. Двумерное распределение концентрации электронов в исследуемой двухкамерной конструкции в аргоне при давлении 5 мТорр и вводимой мощности 25 Вт в активной фазе разряда.

В случае электроотрицательного газа характерной особенностью является расслоение плазмы на две области [1]. Во внутренней области, т.е. в центральных частях разрядного объема, сосредоточены практически все отрицательные ионы (ион-ионная область). На периферии же плазменного объема (вблизи ограничивающих поверхностей) отрицательные ионы практически всегда отсутствуют (электрон-ионная область). Физической причиной этого является тот факт, что самосогласованное поле, выравнивающее потоки заряженных частиц, определяется электронным газом  $E_a \approx -T_e \frac{\nabla n_e}{n_e}$  даже при относительно малых концентрациях электронов. Как результат, амбиполярное поле «держит» малоподвижные отрицательные ионы, имеющие значительно меньшие температуры  $T_e \gg T_i \approx T$  на определенном расстоянии  $l_{sk}$  от поверхности стенки.

Было показано, что в таких условиях зондовые измерения не могут дать корректную информацию о характеристиках отрицательных ионов. Это связано с тем, что отрицательные ионы «чувствуют» присутствие зондового держателя с больших расстояний от него: его влияние простирается не на длину, примерно соответствующую радиусу держателя, а на гораздо большее расстояние, соответствующее толщине шкурки. При этом изменения абсолютного значения концентрации отрицательных ионов весьма значительны, настолько, что в интересующей области (от торца зондового держателя  $x = l_h = L/2$  до  $x = l_h + r_h$ ) они практически отсутствуют. Количественные искажения концентрации можно

увидеть на рисунке 3, где представлены радиальные зависимости (профили) концентрации отрицательных ионов при различных аксиальных сечениях.

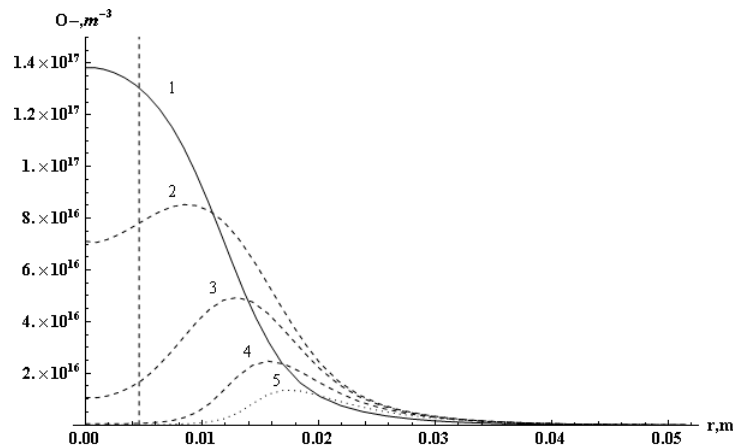


Рисунок 3. Радиальные зависимости концентрации отрицательных ионов при различных аксиальных сечениях: без держателя (1), на торце зондового держателя (5), на конце зонда (4), на удвоенной длине зонда (3), на утроенной длине зонда (2).

В окрестности зондового держателя происходит сильное изменение профилей концентрации отрицательных ионов. При этом, в наиболее важной для диагностики области расположения зонда, т.е. от торца зондового держателя (осевая координата  $x = l_h = L/2$ ) возмущение концентрации плазмы велико и простирается не на радиус держателя, как в электроположительных газах, а на большое расстояние.

В четвертой главе представлены результаты моделирования фазы послесвечения разряда. Представлен набор характеристик плазмы в режиме послесвечения при различных давлениях (5, 20 и 50 мТорр), приведены профили концентраций возбужденных частиц, температура электронов и потенциал в различные моменты времени после отключения подаваемой в разряд мощности (0, 50, 100, 250, 500 и 2000 мкс). Проведено сравнение динамики распада в двухкамерном разряде с расчетами с использованием однокамерной геометрии при неизменных остальных начальных условиях. Граница между камерами была закрыта, то есть весь разрядный объем состоял исключительно из малой камеры. Было обнаружено, что в условиях сравнительно высокого давления при  $\lambda_{th} < L$  распад концентрации электронов является более медленным в двухкамерном случае, чем в однокамерном.

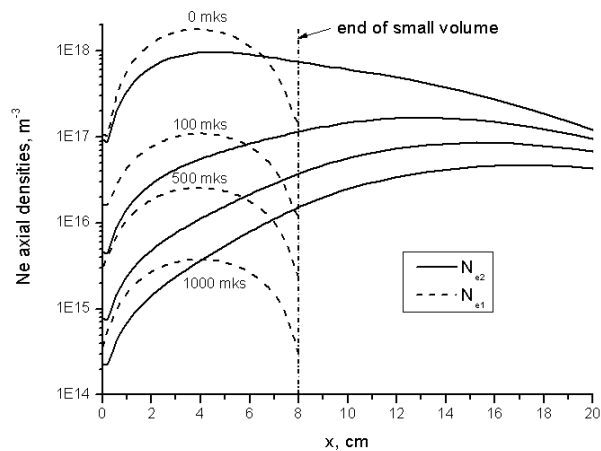


Рисунок 4. Временное изменение профилей концентрации электронов в послесвечении при давлении 20 мТорр в аргоне.

Концентрация плазмы в балластном объеме, которая была намного меньше, чем в малом разрядном объеме в активной фазе разряда, остается таковой лишь на ранних стадиях послесвечения, что иллюстрирует рисунок 4. Поскольку, из-за существенной разницы в размерах, диффузионный распад в балластном объеме происходит намного медленнее, чем в разрядной (малой) камере, то более быстрый распад в малой камере приводит к тому, что в раннем послесвечении уже на 30 мкс концентрация электронов в малой разрядной камере становится меньше, чем в балластном объеме. Соответственно градиент концентрации плазмы в аксиальном направлении меняет знак, т.е. диффузионный поток перенаправляется в противоположную по отношению к разрядной фазе стороны, т.е. не в большую балластную, а в малую камеру из балластной. Таким образом, большая камера играет роль своеобразного термостата, поскольку накапливает плазму в активной фазе и отдает её в послесвечении.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

1. Исследованы пространственные характеристики разряда (концентрации электронов, положительных и отрицательных ионов, возбужденных и метастабильных атомов, электронной температуры, потоков и потенциала плазмы) в активной фазе для электроположительного атомарного аргона и электроотрицательного молекулярного кислорода для давлений 1, 5, 20 и 50 мТорр при различных геометрических конфигурациях разрядной камеры.
2. Обнаружен новый тип пространственного распределения характеристик плазмы связанный с нелокальным переносом тепла, когда мощность

выделяется в малой камере, а максимум концентрации плазмы находится в большой камере.

3. На основании проведенных исследований показано, что в активной фазе двухкамерного разряда как для атомарного электроположительного, так и для молекулярного электроотрицательного газа могут реализовываться два базовых сценария пространственного распределения плазмы в зависимости от давления газа:
  - локализация около источника возбуждения разряда (например, у катушек в индуктивно-связанном разряде) при  $\lambda_{th} < L$ , локальный режим переноса тепла
  - практически однородное распределение по всему разрядному объему при  $\lambda_{th} > L$ , нелокальный режим переноса тепла.
4. Показано, что в активной фазе разряда в режиме локального переноса тепла наличие или отсутствие балластного объема практически не влияет на средние параметры плазмы в разрядной камере. В то же время, в режиме нелокального переноса тепла балластный объем играет решающую роль в процессах, происходящих в разрядном объеме.
5. Показано, что имеются принципиальные трудности при зондовой диагностики отрицательных ионов, связанные с сильным влиянием держателя зонда на их пространственные распределения. Для исключения возможных ошибок предложено использовать двухсекционные зондовые держатели.
6. Предложен новый способ для управления параметрами электроотрицательной плазмы, основанный на выявленных особенностях пространственного распределения отрицательных ионов по отношению к граничным поверхностям. Показано, что изменение конфигурации разрядного объема, например, путем ввода в разрядный объем дополнительных стержней, позволяет управлять степенью электроотрицательности в требуемом месте разряда. Как приложение, этот метод может быть использован для улучшения вытягивания отрицательных ионов в соответствующих ионных источниках.
7. Исследованы пространственные характеристики разряда (концентрации электронов, положительных и отрицательных ионов, возбужденных и метастабильных атомов, электронной температуры, потоков и потенциала плазмы) в фазе послесвечения для электроположительного атомарного аргона

и электроотрицательного молекулярного кислорода для давлений 1, 5, 20 и 50 мТорр при различных геометрических конфигурациях разрядной камеры.

8. Показано, что в паузах активной фазы в атомарном аргоне, когда источники ионизации отсутствуют, даже в случае локального переноса тепла имеет место сильное влияние параметров большой камеры на характеристики малой. В частности, в процессе послесвечения максимум концентрации плазмы смещается из малой разрядной камеры в большую балластную, а амбиполярное поле меняет знак.

### **Цитированная литература**

1. M.A. Lieberman, A.J. Lichtenberg. Principles of Plasma Discharges and Material Processing. New York: Wiley. 1994
2. Chen F.F., Chang J.P. Lecture notes on Principles of plasma processing. Kluwer, 2002
3. Bacal M 2006 Nucl. Fusion 46 S250
4. U Kogelschatz. Plasma Sources Sci.Technol., 2002, v.11, p.A1-A6.
5. N.Herskowitz. IEEE Trans. Plasma Sci., 1998, v.26, N6, p.1610-1620.
6. W.G.Graham. Plasma Source Sci.Technol., 1995, v.4, p.281-292.
7. M.A.Lieberman, S.Ashida. Plasma Sources Sci.Technol., 1996, v.5, p.145-158.
8. J.H. Hong, S.H.Seo, S.S.Kim et all. Phys.Plasmas, 1999, v.6, N3, p.1017-1027.
9. L.A.Berni, M.Ueda, G.Gomes at all. J.Phys.D: Appl.Phys., 2000, v.33, p.1592-1595.
10. G.Cicala, M.Creatore, P.Favia at all. Appl.Phys.Lett., 1999, v.75, N1, p.37-39.
11. N. Plihon, C. S. Corr et P. Chabert 2005 Appl. Phys. Lett.,86, 091501
12. N. Plihon, P. Chabert. et C. S. Corr. 2007 Phys. Plasmas, 14, 013506
13. P. Chabert., N. Plihon, C. S. Corr, J.L. Raimbault et A.J Lichtenberg. 2006 Phys. Plasmas, 13, 093504
14. St Kolev et al 2008 Plasma Sources Sci. Technol. 17 035017
15. St Kolev et al 2008 IEEE Transaction On Plasma Science, Vol. 36, No. 4
16. St Kolev et al 2008 Journal of Physics: Conference Series 113 012010
17. Tsanko Tsankov, Zhivko Kiss'ovski, Nina Djermanova, Stanimir Kolev Electron Energy Distribution Function Measurements in an Inductively Driven Tandem Plasma Source, Volume 3, Issue 2, pages 151–155, February 17, 2006
18. Kushner M J 1993 J. Appl. Phys. 73 4098

19. W. Tan, R. J. Hoekstra and M. J. Kushner, "A Time Dependent Propagator Method for Long Mean Free Path Transport of Neutral Particles in Plasma Processing Reactors", *J. Appl. Phys.* 79, 3423 (1996)
20. M. Mozjetchkov et al 1998 *Rev. Sci. Instrum.* **69**, 971
21. Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров И.Е. Основы физики плазмы // Москва. Атомиздат. 1977
22. Bogdanov E.A., Kudryavtsev A.A., Arslanbekov R.R. 2D simulation of short-pulsed dielectric barrier discharge xenon excimer lamp // *Contrib. Plasma Phys.* v.46, No. 10, p.807-816, 2006
23. Demidov V I, DeJoseph C A Jr and Kudryavtsev A A 2004 *Plasma Sources Sci. Technol.* 13 600
24. Demidov V I, DeJoseph C A Jr and Kudryavtsev A A 2004 *Phys. Plasmas* 11 5350
25. Demidov V I, DeJoseph C A Jr and Kudryavtsev A A 2005 *Phys. Rev. Let.* 95, 215002
26. Demidov V I, DeJoseph C A Jr 2005 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 38 3805

#### **Публикации автора по теме диссертации:**

##### Публикации в журналах из списка ВАК:

1. E. A. Bogdanov, C. A. DeJoseph Jr., V. I. Demidov, A. A. Kudryavtsev, K. Yu. Serditov. Influence of an additional ballast volume on a pulsed ICP discharge. *Plasma Source Sci. Technol.*, v.16, p. 697–702, 2007.
2. A. A. Kudryavtsev, V. I. Demidov, C. A. DeJoseph, Jr., S. F. Adams, and K. Yu. Serditov. Probe Measurements in Electronegative Plasmas: Modeling the Perturbative Effects of the Probe-Holder. *Contrib. Plasma Phys.* 49, No. 6, 373 – 380 (2009)
3. A. A. Kudryavtsev, K. Yu. Serditov. Influence of heat and particle fluxes nonlocality on spatial distribution of plasma density in two-chamber inductively coupled plasma sources. *Phys. Plasmas* 19, 073504 (2012).

##### Тезисы российских и международных конференций:

4. Кудрявцев А.А., Сердитов К.Ю. Моделирование плазмы высокочастотного индуктивно-связанного импульсного разряда. Материалы Всероссийского симпозиума молодых ученых, студентов и аспирантов “Фундаментальные

проблемы приложений физики низкотемпературной плазмы”, Петрозаводск, 5-11 сентября 2005. P.274-282.

5. Сердитов К.Ю. Моделирование импульсного индуктивно-связанного разряда с дополнительным балластным объемом. Сборник тезисов молодежной научной конференции “Физика и прогресс”, 1-3 ноября 2005, Санкт-Петербург, Петродворец, ул. Ульяновская, 3, Е-02
6. Сердитов К.Ю. Моделирование импульсного индуктивно-связанного разряда с дополнительным балластным объемом. Сборник работ молодежной научной конференции “Физика и прогресс”, 1-3 ноября 2005, Санкт-Петербург, Петродворец, ул. Ульяновская, 3, Р. 141-146
7. V. I. Demidov, C. A. DeJoseph, Jr., E.A. Bogdanov, A. A. Kudryavtsev, K.Yu.Serditov. The influence of additional ballast volume on pulsed ICP discharge plasma parameters. 48th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, October 30–November 3, 2006; Philadelphia, Pennsylvania, USA. Bulletin of the American Physical Society, v.51, No7, p.359, ZP1.76, 2006.
8. E.A. Bogdanov, A.A. Kudryavtsev, K. Yu. Serditov, C.A. DeJoseph, Jr., V.I. Demidov. Probe measurements in electronegative plasmas: modeling the perturbative effects of the probe. 60th Gaseous Electronics Conference Tuesday-Friday, October 2-5, 2007; Arlington, Virginia, USA. Bulletin of the American Physical Society, v.52, No8, p.59, SRP1.00019, October, 2007.
9. V.I. Demidov, E.A. Bogdanov, A.A. Kudryavtsev, K. Yu. Serditov, C.A. DeJoseph, Jr. Modeling and experiments in argon-oxygen RF ICP pulse plasma. 49th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, Monday–Friday, November 12–16, 2007; Orlando, Florida, USA. UP8.00088.
10. Кудрявцев А.А., Сердитов К.Ю., Ткаченко Т.Л. К вопросу о применимости зондовой методики для диагностики плазмы электроотрицательных газов Тезисы XXXV Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС. 11-15 февраля 2008, Звенигород, Р.187
11. Kudryavtsev A.A., Serditov K.Yu., Timofeev N.A. Features of the spatial distribution formation of electronegative plasma parameters in tandem plasma-chemical reactors. Contributed Papers of VI International Conference Plasma Physics and Plasma Technology Minsk, Belarus, September 28 - October 2, 2009, v.2, p.216-219, 2009.
12. E.A. Bogdanov, A.A. Kudryavtsev, K. Yu. Serditov. 2D fluid simulations of two-chamber ICP electronegative plasma source. 63th Gaseous Electronics



Conference Monday-Friday, October 4-8, 2010; Paris, France. Bulletin of the American Physical Society, CTP.00038.

13. Кудрявцев А.А., Сердитов К.Ю., Ткаченко Т.Л. Резкое изменение пространственных распределений плотности плазмы двухкамерного ICP разряда в аргоне при изменении давления газа. Тезисы XXXVIII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС. 14-18 февраля 2011, Звенигород, P.246
14. A.Kudryavtsev, K.Serditov. The role of nonlocal electron energy transport in the formation of spatial distributions of the two-chamber plasma density of ICP discharge at change of gas pressure. 65th Annual Gaseous Electronics Conference, October 22-26, 2012; Austin, Texas, USA. Session PR1: Abstract: PR1.49. Bulletin of American Physics Society, v.57, N8, p.68, 2012.