

На правах рукописи

Чжао Чэнь

**ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕЙ ЦЕПИ
НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЭНЕРГОВКЛАДА
В ГИБРИДНЫЙ ВЧ РАЗРЯД НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ**

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук



Москва 2011

Работа выполнена на кафедре физической электроники физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Научный руководитель:

– доктор физико-математических наук,
в.н.с. Кралькина Елена Александровна

Официальные оппоненты:

**доктор физико-математических наук,
профессор
Лейман Владимир Георгиевич
кандидат физико-математических наук,
доцент
Попов Олег Алексеевич**

Ведущая организация: Федеральное государственное научное учреждение «Государственный научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики»

Защита состоится «__» февраля 2012г в ____ на заседании Диссертационного совета Д. 501.001.66 Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ, физический факультет, аудитория СФА.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан «__» _____ 2012г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 501.001.66

кандидат физико-математических наук



- И.Н.Карташов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В настоящее время высокочастотный (ВЧ) разряд низкого давления широко применяется в промышленных плазменных технологиях. Известны источники плазмы, основанные на емкостном и индуктивном ВЧ разряде. Известно, что в емкостном ВЧ разряде формируются приэлектродные слои объемного заряда, в которых возникает среднее по периоду ВЧ поля падение потенциала, ускоряющее ионы в направлении электродов. Это позволяет обрабатывать с помощью ускоренных ионов образцы материалов, расположенных на электродах емкостного ВЧ разряда. Еще одной особенностью емкостного разряда, также нашедшей практическое применение, является формирование в приэлектродных слоях объемного заряда большого количества быстрых электронов. Наличие быстрых электронов в разряде приводит к эффективной диссоциации сложных молекул и образованию радикалов, которые необходимы для реактивного травления материалов, плазменной полимеризации и т.д. Недостатком емкостного ВЧ разряда является относительно низкая концентрация электронов в основном объеме плазмы. Это ограничивает производительность ряда плазменных технологий. Значительно более высокая концентрация электронов при тех же ВЧ мощностях характерна для индуктивных ВЧ разрядов.

ВЧ индуктивные плазменные реакторы и источники ионов низкого давления уже в течение нескольких десятилетий являются важнейшей составляющей современных земных и космических технологий. Широкому распространению технических применений индуктивного ВЧ разряда способствуют его основные достоинства – возможность получения высокой концентрации электронов при относительно невысоком уровне ВЧ мощности, отсутствие контакта плазмы с металлическими электродами, небольшие температуры электронов, а, следовательно, невысокий потенциал плазмы относительно стенок, ограничивающих разряд. Последнее помимо минимизации потерь мощности на стенках источника плазмы позволяет избежать повреждения поверхности образцов ионами высоких энергий при их обработке в разряде.

ВЧ мощность поступает в плазму индуктивного разряда по двум каналам: индуктивному, существующему благодаря току, текущему по индуктору или антенне, и емкостному, существующему благодаря наличию емкостной связи между антенной и плазмой. Ранее [1,2] было показано, что наличие емкостной составляющей разряда приводит при малых мощностях ВЧ генератора к увеличению энергозатрат в плазму через индуктивный канал, а наличие индуктивного канала разряда влияет на величину приэлектродных скачков квазистационарного потенциала. Взаимное влияние каналов приводит к появлению ряда самосогласованных эффектов, анализ которых позволяет глубже понять механизмы физических процессов, происходящих в емкостном и индуктивном разрядах. Кроме того, вложение ВЧ мощности, как через индуктивный, так и через емкостной каналы позволяет плавно управлять основными параметрами разряда, что необходимо при практических применениях разряда. В связи с этим закономерно встает вопрос об организации и исследовании новой модификации ВЧ разряда, а именно гибридного ВЧ разряда, возбуждение которого

осуществляется системой токов и зарядов, генерируемых на внешней поверхности источника плазмы.

Диссертация посвящена экспериментальному исследованию и численному моделированию физических процессов в гибридном ВЧ разряда низкого давления. Это позволяет считать тему диссертационной работы актуальной.

Цель работы

Основные задачи диссертационной работы:

- изучение роли емкостного и индуктивного каналов в поддержании гибридного ВЧ разряда низкого давления;
- Изучение процессов во внешней цепи гибридного ВЧ разряда при мощностях ВЧ генератора 10-300 Вт, давлениях аргона 5-100 мТор;
- изучение влияния параметров внешней цепи на параметры плазмы и энергозатрат в гибридный ВЧ разряд при мощностях ВЧ генератора 10-300 Вт, давлениях аргона 5-100 мТор;
- разработка самосогласованной модели гибридного ВЧ разряда низкого давления и численное моделирование физических процессов в гибридном ВЧ разряде низкого давления.

Научная новизна работы

- Впервые экспериментально изучены режимы горения новой модификации ВЧ разряда, а именно гибридного ВЧ разряда низкого давления при различных параметрах внешней цепи. Впервые экспериментально и с помощью численного моделирования показано, что изменение величины разделительной емкости, включенной в емкостную ветвь гибридного ВЧ разряда, позволяет плавно регулировать параметры плазмы разряда.
- Впервые экспериментально показано, что изменение давления аргона приводит к перераспределению вклада индуктивного и емкостного каналов в поглощение ВЧ мощности.
- Впервые разработана математическая самосогласованная модель гибридного ВЧ разряда, позволяющая рассчитать основные параметры плазмы, напряжения и токи, текущие во внешней цепи разряда на основании известных мощности ВЧ генератора, значения разделительной емкости, индуктивности антенны, давления и геометрических параметров источника плазмы.

Практическая ценность работы

Полученные результаты могут служить основой для объяснения физических свойств индуктивного и гибридного ВЧ разрядов низкого давления, построения полной физической модели разрядов. Кроме того, результаты могут служить научной базой при конструировании и выборе оптимальных режимов технологических источников плазмы низкого давления нового поколения.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

- Результаты исследования соотношения между энерговкладом в плазму через емкостной и индуктивный каналы гибридного ВЧ разряда при различных значениях разделительной емкости, мощности ВЧ генератора и давлениях аргона.
- Результаты исследования процессов во внешней цепи гибридного ВЧ разряда при различных значениях разделительной емкости, мощности ВЧ генератора и давлениях аргона.
- Результаты исследования параметров плазмы (концентрации и эффективной температуры электронов) гибридного ВЧ разряда при различных значениях разделительной емкости, мощности ВЧ генератора и давлениях аргона.
- самосогласованная модель гибридного ВЧ разряда низкого давления и результаты численного моделирования физических процессов в гибридном ВЧ разряде низкого давления.

Апробация диссертации

Основные результаты работы обсуждались на семинарах кафедры физической электроники физического факультета МГУ и докладывались на следующих конференциях:

1. VI International Conference Plasma Physics and Plasma Technology. Minsk, Belarus. 2009.
2. XXXVIII международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС. 2011.
3. Международная конференция «Физика высокочастотных разрядов». 2011, Казань.
4. Всероссийская конференция по физике низкотемпературной плазмы, Петрозаводск 2011.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 4 статьях и 6 тезисах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Первая глава носит вводный характер и содержит обзор литературы, вторая глава содержит описание установки и основных использованных экспериментальных методов. Третья и четвертая главы оригинальны. В целом диссертация содержит 126 страниц, включая 104 рисунков и библиографию из 83 наименований.

Содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

Во введении сформулированы основные цели и задачи диссертации, представлены актуальность данных исследований, научная новизна и практическая

ценность, перечислены защищаемые положения и кратко изложено содержание всех глав диссертации.

В первой главе представлен обзор литературы по теме диссертации.

Первая часть главы посвящена рассмотрению источников плазмы на основе емкостного ВЧ разряда и основных физических особенностей разряда [3-6]. Особое внимание уделено работам [5,6], где приведены результаты исследования приэлектродных слоев пространственного заряда. Рассмотрены работы [3, 4], посвященные изучению механизмов поглощения ВЧ мощности. Рассмотрены пути улучшения свойств промышленных емкостных плазменных реакторов.

Вторая часть обзора посвящена рассмотрению источников плазмы низкого давления на основе индуктивного ВЧ разряда и основных физических особенностей разряда [1, 2, 4]. Рассмотрены закономерности скинирования, основные механизмы поглощения ВЧ мощности [1, 2, 4, 7]. Особое внимание уделено рассмотрению работ [1, 2], где анализируется роль емкостной составляющей в поддержании разряда.

В работах [1, 2] показано, что наличие емкостной составляющей разряда приводит при малых мощностях ВЧ генератора к увеличению энергозатрат в плазму через индуктивный канал, а наличие индуктивного канала разряда влияет на приэлектродные скачки квазистационарного потенциала. Из обзора литературы следует, что взаимное влияние каналов проявляется в появлении ряда самосогласованных эффектов, анализ которых позволяет глубже понять механизмы физических процессов, происходящих в емкостном и индуктивном разряде. Кроме того, появляется возможность плавного управления основными параметрами разряда, которое может найти практическое применение. Основываясь на выводах, сделанных на основании обзора литературы, в конце первой главы сформулирована цель диссертации.

Вторая глава содержит описание условий экспериментов и методики измерений.

Гибридный ВЧ разряд поджигался в цилиндрическом источнике плазмы (Рис. 1), диаметр и высота которого составляли 15см. Узел ввода ВЧ мощности был выполнен в виде параллельно соединенных спиральной антенны и обкладок конденсатора. По спиральной антенне, расположенной на боковой поверхности источника плазмы, тек ток I_i . Параллельно антенне были подключены обкладки конденсатора, расположенные на торцевых фланцах источника плазмы. Между антенной и обкладками конденсатора была включена разделительная емкость C , значения которой изменялись в диапазоне 10-300пФ. Обкладки конденсатора вместе с разделительной емкостью формировали емкостную ветвь разряда. В емкостной цепи узла ввода ВЧ мощности тек ток I_c . На концах антенны между точками А и В с помощью ВЧ генератора создавалось ВЧ напряжение амплитуды V .

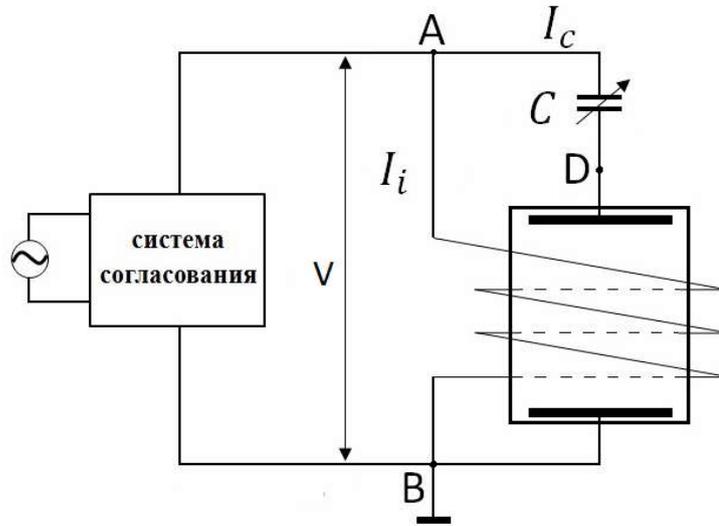


Рис. 1. Схема гибридного ВЧ разряда.

В общем случае величина ВЧ мощности, поглощаемой плазмой, определяется выражением [7]:

$$P_{pl} = \frac{L\omega}{4} \int_0^R r \left[\varepsilon_{\perp}'' |E_r|^2 + \varepsilon_{\perp}'' |E_{\varphi}|^2 + \varepsilon_{\parallel}'' |E_z|^2 + g'' (E_{\varphi} E_r^* - E_r E_{\varphi}^*) \right] dr, \quad (1)$$

где E_{φ} , E_r , E_z азимутальная, радиальная и продольная компоненты ВЧ электрического поля в плазме, L -длина, ε_{\perp}'' , $\varepsilon_{\parallel}''$, g'' – мнимые части компонентов тензора диэлектрической проницаемости плазмы.

В индуктивном разряде ВЧ электрические поля пропорциональны амплитуде тока, текущего по антенне I_0^i , поэтому уравнение (1) можно переписать в виде:

$$P_{pl} = \frac{1}{2} R_{pl}^i I_0^i{}^2, \quad (2)$$

где коэффициент пропорциональности между вложенной мощностью и квадратом тока, текущего через антенну, имеет размерность сопротивления и зависит только от свойств плазмы. Величина R_{pl}^i названа эквивалентным сопротивлением плазмы индуктивного разряда.

В случае гибридного разряда ВЧ поле в плазме E представляет собой суперпозицию вихревого E_v и потенциального E_p полей:

$$E = E_v + E_p. \quad (3)$$

Вихревое поле определяется величиной тока \tilde{I}_i , текущего через индуктор, а потенциальное поле – напряжением \tilde{U}_c , приложенным к обкладкам конденсатора.

В случае параллельного подсоединения индуктора и обкладок конденсатора через разделительную емкость C напряжение \tilde{U}_c , приложенное к обкладкам конденсатора, определяется формулой:

$$\tilde{U}_c = \tilde{U} - \frac{\tilde{I}_c}{i\omega C} = \tilde{I}_i \left(Z_i - \frac{1}{i\omega C} \frac{Z_i}{Z_c} \right) \quad (4)$$

Здесь Z_i, Z_c – импеданс индуктивной и емкостной ветвей разряда соответственно.

Таким образом, электрическое поле, приложенное к обкладкам конденсатора, а, следовательно, и суммарное электрическое поле \mathbf{E} оказывается пропорциональным току, текущему через антенну. Это означает, что при рассмотрении гибридного разряда, также как и в случае чисто индуктивного разряда, из под знака интеграла (1) можно вынести квадрат амплитуды тока, текущего через антенну I_0^i :

$$P_{pl} = \frac{1}{2} R_{pl}^h I_0^i{}^2 \quad (5)$$

Множитель R_{pl}^h , стоящий перед $I_0^i{}^2$, имеет размерность сопротивления. Его естественно назвать эквивалентным сопротивлением гибридного ВЧ разряда. Также как в случае чисто индуктивного разряда, эквивалентное сопротивление гибридного разряда является мерой способности плазмы поглощать ВЧ мощность.

Необходимо отметить, что в отличие от чисто индуктивного разряда эквивалентное сопротивление плазмы гибридного разряда зависит не только от закономерностей проникновения ВЧ полей в плазму и механизма поглощения мощности, но и от параметров внешней цепи разряда. Последнее физически связано с тем, что параметры внешней цепи (реактивные сопротивления антенны и разделительной емкости) существенно влияют на относительную роль каждого из каналов в поддержании гибридного разряда.

При условии, когда нагрузка согласована с генератором, активная ВЧ мощность P_{Gen} , отдаваемая генератором во внешнюю цепь гибридного ВЧ разряда, также как в случае чисто индуктивного ВЧ разряда, распределяется между двумя активными нагрузками, а именно: часть мощности идет на нагрев индуктора, а часть мощности поглощается плазмой. В связи с этим для нахождения мощности, вложенной в плазму P_{pl} , проводилось измерение мощности ВЧ генератора и напряжения на выходе из системы согласования без и при наличии разряда [8].

Для нахождения импедансов индуктивного и емкостного каналов Z_i, Z_c в процессе экспериментов измерялись временные зависимости напряжений напряжения на выходе из системы согласования \tilde{V} и напряжения \tilde{V}_{el} , приложенного к

обкладкам конденсатора, временные зависимости токов \tilde{I}_i , \tilde{I}_c , текущих через индуктивный и емкостной каналы.

Для нахождения величины ВЧ мощности, поступающей в разряд, через емкостной канал P_c , временные зависимости \tilde{V}_{el} и \tilde{I}_c перемножались и интегрировались по периоду ВЧ поля.

Эквивалентное сопротивление гибридного ВЧ разряда определялось по формуле (5) на основании измеренных величин мощности, поглощенной плазмой, и амплитуды тока, текущего через антенну.

Концентрация и энергетическое распределение электронов определялось зондовым методом. Для этого в центральном сечении источника вблизи его оси располагался цилиндрический зонд длиной 5мм и диаметром 0.3мм. Энергетическое распределение электронов определялось по зависимости электронного тока на зонд от потенциала зонда с помощью метода регуляризации А. Н. Тихонова [9].

Параллельно с зондовыми измерениями были выполнены пространственные измерения свечения плазмы. Отношение интенсивности ионных и атомарных линий аргона $\eta = I_{ArII} / I_{ArI}$ ($ArII - 4198 \text{ \AA}$, $ArI - 4200 \text{ \AA}$) было использовано для нахождения эффективной температуры быстрых электронов.

В заключение главы описана методика измерения ВЧ токов с помощью «пояса Роговского».

Эксперименты проводились в разряде в аргоне в диапазоне давления 5 – 100мТор при мощностях ВЧ генератора 10-300Вт, работающего на частоте 13.56МГц.

В третьей главе диссертации представлены результаты экспериментального изучения особенности физических процессов в гибридном ВЧ разряде. Гибридный ВЧ разряд является модификацией известных форм высокочастотного разряда. Прежде всего, в диссертации рассмотрено, как соотносятся свойства гибридного, емкостного и индуктивного разрядов. Для сравнения характеристик плазмы различных модификаций гибридного ВЧ разряда использовались спектральные измерения. Измерение пространственных распределений отношения интенсивности ионных и атомарных линий аргона η , измеренных в различных формах ВЧ разряда, показали, что η достигает максимальных значений в емкостном разряде, где существует избыток быстрых электронов (Рис.2). Они возникают при торможении электронов пучков, формирующихся в приэлектродных слоях пространственного заряда, а так же в результате стохастического нагрева электронов. Механизм рождения быстрых электронов проявляет себя в росте отношения η при приближении к электродам, к которым подводится ВЧ напряжение. Наименьшие значения η характерны для индуктивного ВЧ разряда, где существует дефицит быстрых электронов, вызванный неупругими столкновениями электронов с атомами аргона. Значения η в случае гибридного разряда занимают промежуточное значение между величинами, характерными для индуктивного и емкостного ВЧ разряда. В случае разделительной емкости 13пФ рост отношения интенсивностей линий $\eta = I_{ArII} / I_{ArI}$, характеризующий рост числа быстрых электронов наблюдается только

у пассивного электрода, у активного электрода значения η близки к существующим в основном объеме разряда. При значениях $C = 300$ пФ значения η выше, причем рост η наблюдается как у пассивного, так и у активного электродов. Рост разделительной емкости C , с одной стороны, приводит к росту η , а, с другой стороны, сопровождается падением интенсивности свечения плазмы. Это свидетельствует о росте числа быстрых электронов и уменьшении плотности плазмы.

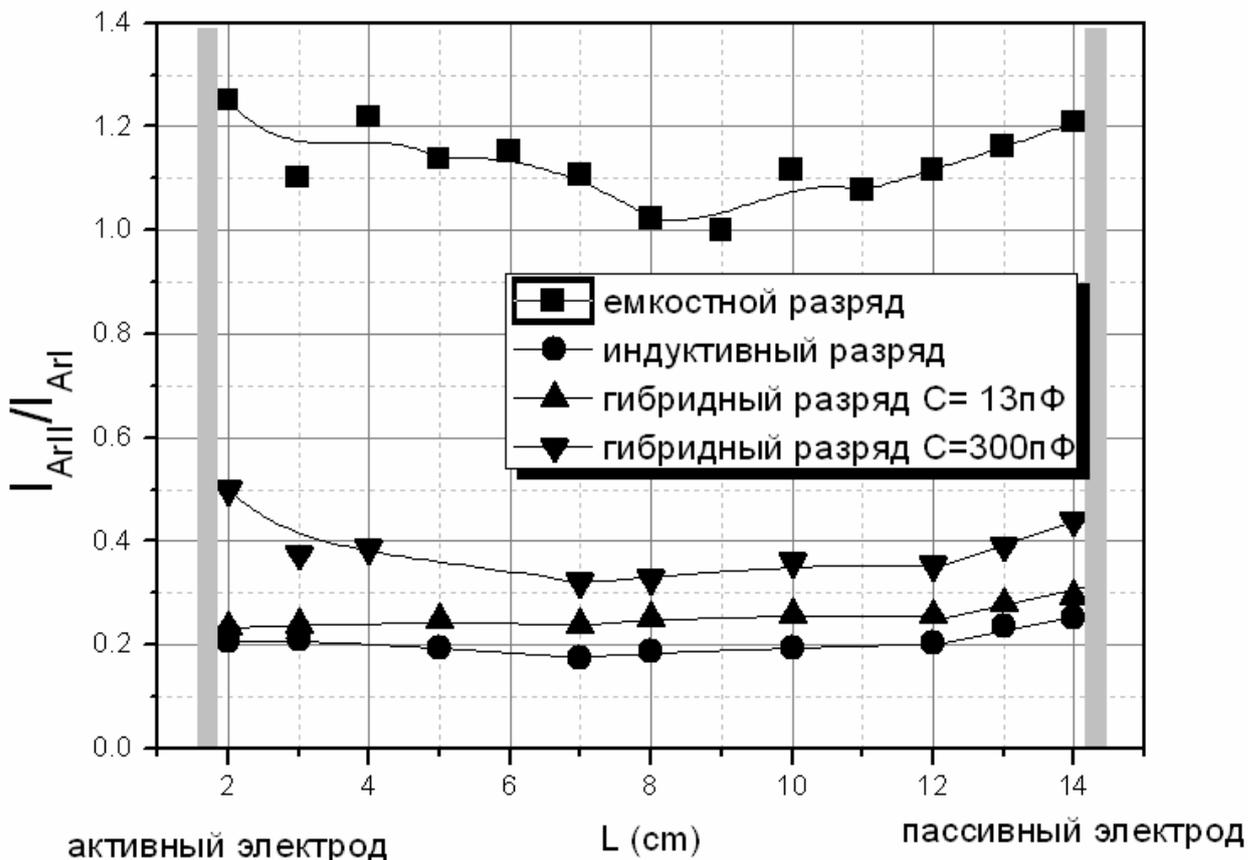


Рис.2. Пространственные распределения отношения интенсивности ионных и атомарных линий аргона, измеренных в различных формах ВЧ разряда. Давление аргона 7 мТор. L – расстояние от внешней поверхности верхнего фланца.

В гибридном ВЧ разряде мощность поступает в плазму по двум каналам: емкостному и индуктивному. Очевидно, что соотношение долей мощности, поступающей в разряд через указанные каналы, должно оказывать определяющее влияние на свойства разряда.

На рис.3. показана типичная зависимость доли мощности P_i/P_{pl} , P_c/P_{pl} , поступающей в разряд через индуктивный и емкостной каналы от мощности ВЧ генератора при различных значениях разделительной емкости при давлении аргона 16 мТор.

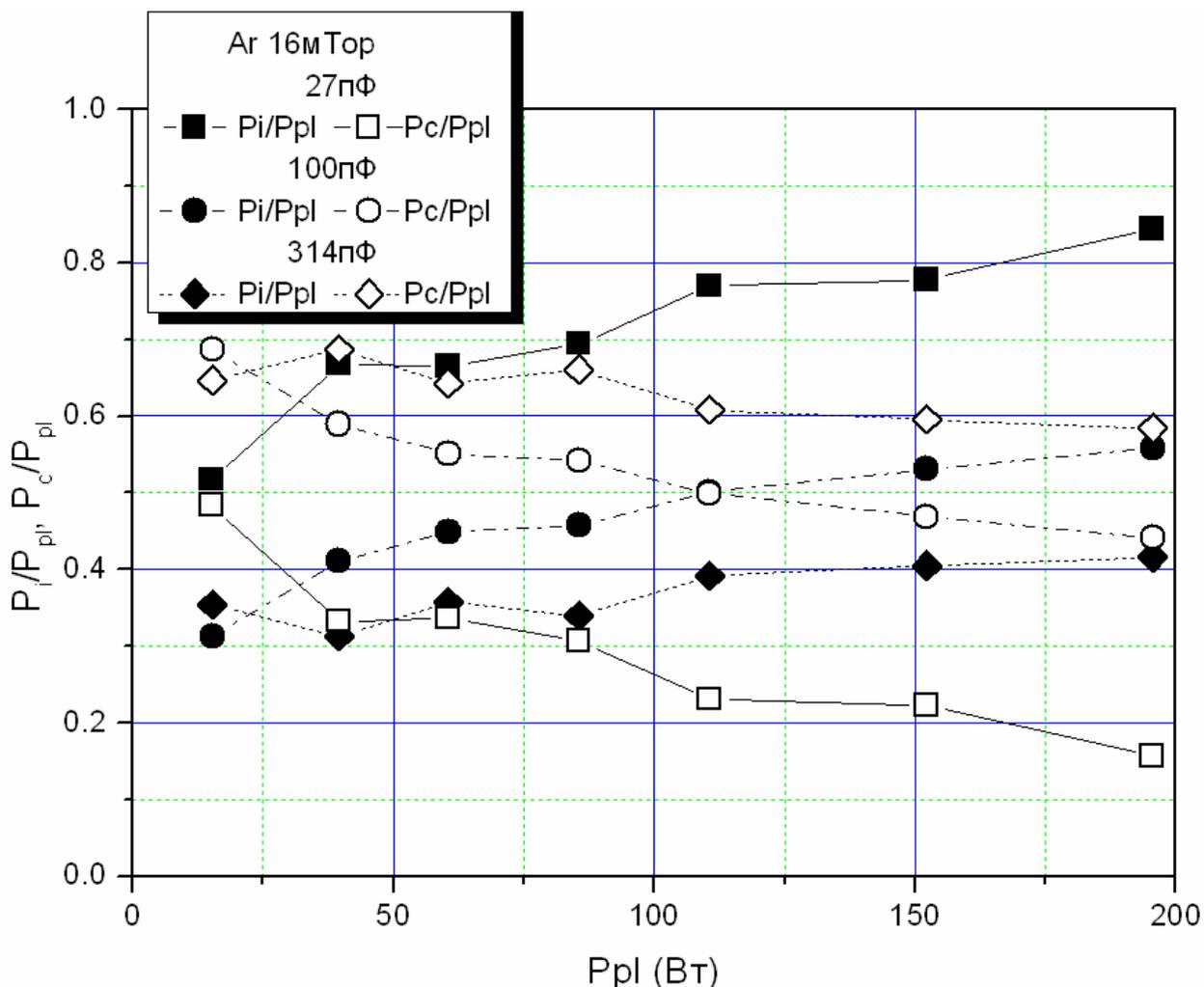


Рис.3. Зависимость доли мощности P_i/P_{pl} (закрашенные значки), P_c/P_{pl} (открытые значки), поступающей в разряд через индуктивный и емкостной каналы от мощности, вложенной в плазму

Как видно, при малых значениях мощности, вложенной в плазму, преобладает вклад мощности через емкостной канал. Затем при некотором значении $P_{pl} = P_{pl}^*$ вклад мощности через оба канала сравнивается, при более высоких значениях P_{pl} основная доля мощности поступает в разряд через индуктивный канал. Необходимо отметить небольшие отличия от сказанного, наблюдаемые при мощностях порядка 10Вт и ниже при давлении аргона 78мТор. Здесь вклад мощности через емкостной канал с ростом P_{pl} возрастает. Это по-видимому, связано с тем, что при малых P_{pl} индуктивный канал не успевает сформироваться, и, по сути дела, ВЧ мощность вкладывается в разряд по двум емкостным каналам. Один из них сформирован обкладками конденсатора, а другой – витками индуктора. В целом с ростом емкости

С происходит смещение величины P_{pl}^* в область более высоких P_{pl} . При значении разделительной емкости 13пФ и давлениях аргона менее 78мТор вклад емкостной составляющей в поддержание разряда при рассмотренных значениях P_{pl} незначителен. Увеличение С приводит к усилению роли емкостной составляющей не только при $P_{pl} \leq P_{pl}^*$, но и при $P_{pl} > P_{pl}^*$.

Выполненные эксперименты выявили интересную закономерность в изменении соотношения между долями ВЧ мощности, поступающими в разряд через индуктивный и емкостной каналы при изменении давления. При значении разделительной емкости $C=13\text{пФ}$ при всех рассмотренных значениях P_{pl} ВЧ мощность поступает в разряд главным образом через индуктивный канал при условии, что давление аргона меньше 78мТор. При давлении 78мТор, однако, даже при $C=13\text{пФ}$ роль емкостного канала становится существенной, т.к. через него в разряд поступает не менее 20% всей поглощенной мощности. В случае разделительного конденсатора $C=27\text{пФ}$ наблюдается немонотонная зависимость $P_c / P_{pl}(p)$. Хуже всего мощность вкладывается через емкостной канал при давлении $P^* \sim 23\text{мТор}$. При уменьшении и увеличении давления относительно P^* роль емкостного канала повышается. При значениях разделительной емкости более 27пФ зависимость P_c / P_{pl} от давления выражена слабо.

Из формул (1), (4), (5) видно, что энерговклад в плазму гибридного разряда определяется основными параметрами внешней цепи и плазмы: концентрацией и энергетическим распределением электронов, определяющими проводимость плазмы. В связи с этим далее в диссертации были подробно исследованы указанные выше характеристики.

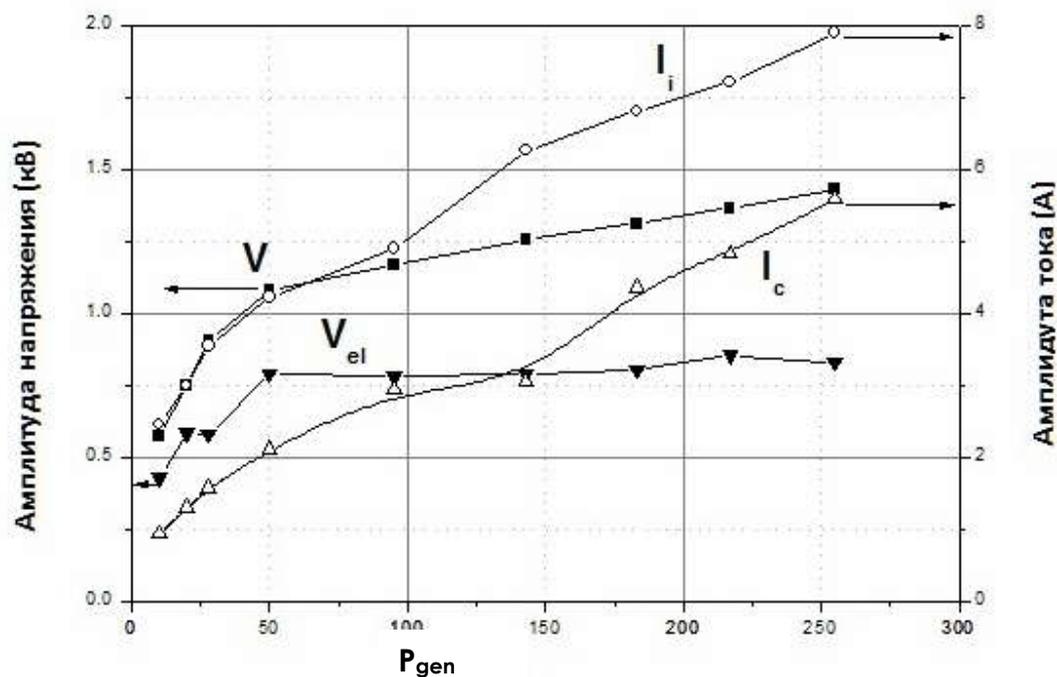


Рис. 4. Зависимости величин V , V_{el} , I_i и I_c от мощности ВЧ генератора P_{gen}

На рис.4 показаны зависимости величин напряжения на выходе из системы согласования V , напряжения между электродами V_{el} , токов, текущих через антенну I_i и емкостной канал I_c от мощности ВЧ генератора P_{gen} . Из рисунка видно, что напряжение на выходе из системы согласования V и ток антенны I_i возрастают с увеличением мощности ВЧ генератора, причем скорость роста указанных величин замедляется при условии, что мощность ВЧ генератора P_{gen} превышает 50Вт, т.е. там, где преобладает вклад ВЧ мощности через индуктивный канал. Напряжение V_{el} , приложенное к обкладкам конденсатора, при $P_{gen} < 50$ Вт растет, а затем насыщается.

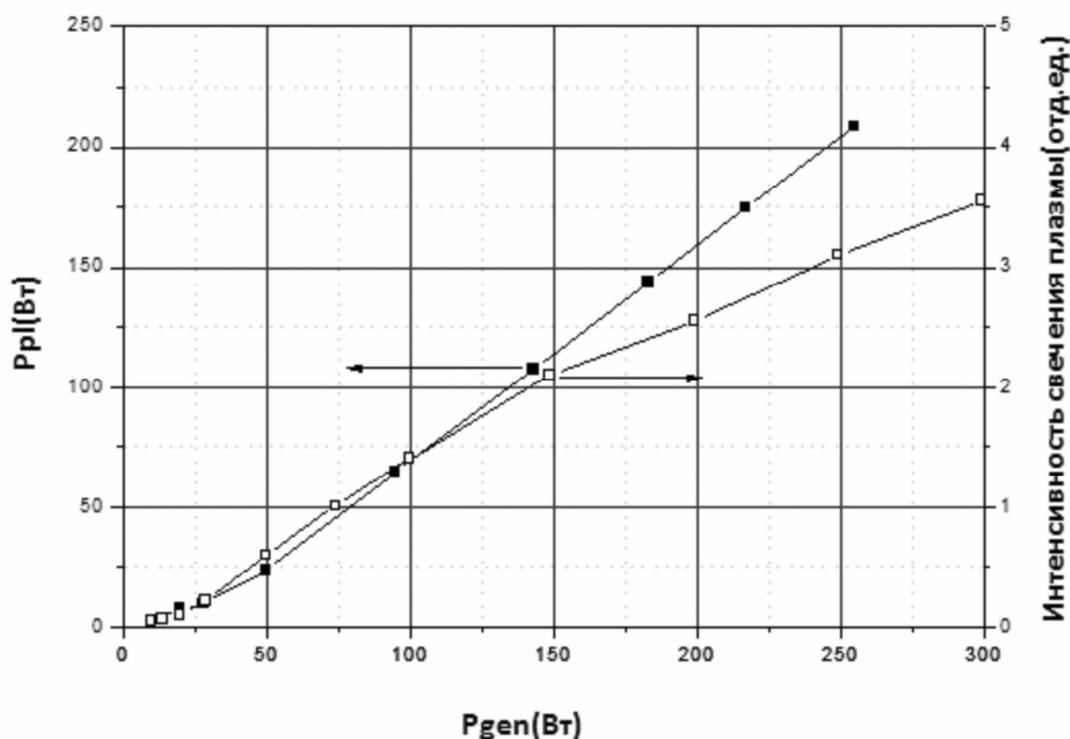


Рис. 5. Зависимости интенсивности свечения плазмы и ВЧ мощности, поступающей в разряд, от величины P_{gen} .

На рис.5 представлены зависимости интенсивности свечения плазмы и ВЧ мощности, поступающей в разряд, от величины P_{gen} . Как видно при значениях $P_{gen} > 50$ Вт ВЧ мощность, вложенная в плазму, и интенсивность свечения плазмы резко возрастают. Измерения показали, что температура быстрых электронов при $P_{gen} > 50$ Вт в пределах погрешности эксперимента не изменяется. В связи с этим рост интенсивности свечения плазмы естественно связать с ростом концентрации электронов в разряде. Очевидно, что рост плотности плазмы приводит к увеличению проводимости плазмы, росту тока, текущего через емкостной канал (см. Рис.4), увеличению падения напряжения на разделительном конденсаторе и насыщению зависимости $V_{el}(P_{gen})$. Значения напряжения, приложенного к обкладкам конденсатора, тем меньше, чем меньше величина разделительной емкости C . Эксперименты показали существование еще одного интересного эффекта, связанного с падением напряжения на разделительном конденсаторе. Генерация высших гармоник тока в приэлектродных слоях пространственного заряда сопровождается при малых значениях емкости разделительного конденсатора (10 – 30 пФ) появлением высших гармоник в спектре напряжения, подводимого к обкладкам конденсатора, и усилением ангармонизма тока. При $C \sim 10$ пФ оказывается, что основная частота напряжения, приложенного к индуктору, составляет 13.6 МГц, в то

время как основная частота напряжения, приложенного к обкладкам конденсатора, составляет 27.2МГц.

Известно, что в емкостном разряде при наличии разделительной емкости, замыкающей электроды по постоянному току, формируется отрицательное постоянное самосмещение активного электрода относительно заземленного пассивного электрода. Измерения, выполненные в настоящей работе в экспериментах с емкостным разрядом при использовании разделительных емкостей с номиналами, аналогичным использованным при изучении гибридного ВЧ разряда, подтвердили известные из литературы результаты.

Иная картина наблюдается при изучении самосмещения активного электрода в экспериментах с гибридным ВЧ разрядом (см. Рис.6). При разделительной емкости 100пФ, также как и в емкостном разряде, самосмещение активного электрода отрицательно, однако, величины постоянного потенциала по абсолютной величине существенно ниже, чем в емкостном ВЧ разряде. При разделительной емкости 50пФ самосмещение активного электрода отрицательно только при малых вложенных в плазму ВЧ мощностях. По мере роста P_{pl} , постоянная составляющая потенциала активного электрода относительно земли проходит через 0 и становится положительной. При еще меньших разделительных емкостях постоянный потенциал активного электрода положителен при всех рассмотренных значениях P_{pl} . Положительное смещение нагруженного электрода относительно земли возможно при условии, что емкость его приэлектродного слоя больше, чем емкость у заземленного электрода [6]. Выполненные спектральные измерения подтвердили, что толщина слоя у активного электрода меньше, чем у заземленного, что необходимо для выполнения указанного выше соотношения емкостей.

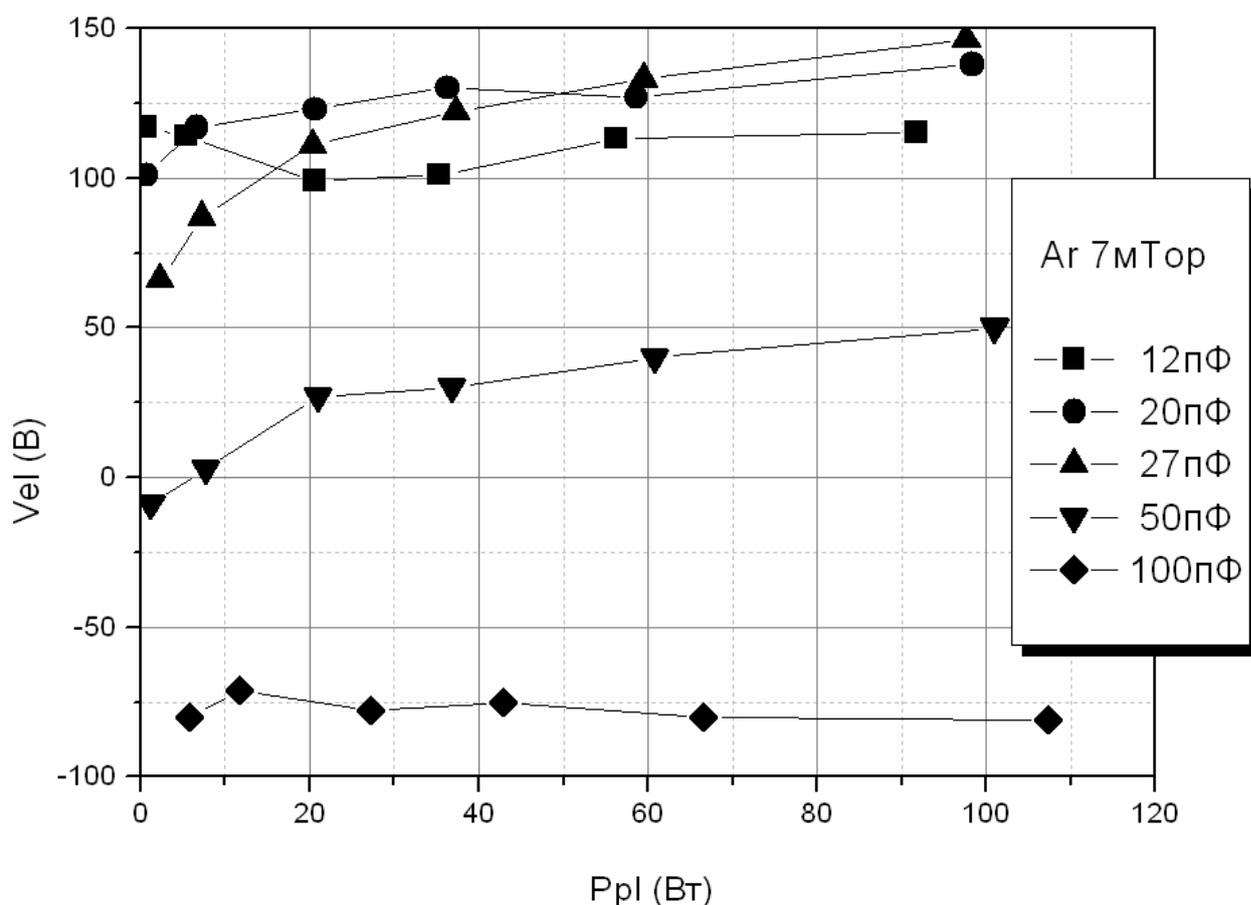


Рис.6 Зависимость постоянного смещения активного электрода относительно заземленного пассивного электрода. Гибридный разряд. 7мТор.

Таким образом, результаты экспериментального исследования гибридного ВЧ разряда показали, что при малых мощностях ВЧ генератора вложение в разряд мощности происходит главным образом через емкостной канал. По мере роста мощности ВЧ генератора увеличивается вложение мощности через индуктивный канал, повышается плотность электронов и ток, текущий через емкостной канал. Это приводит к увеличению падения потенциала на разделительной емкости и частичному запираению емкостного канала. При значениях разделительной емкости 50пФ и ниже толщина приэлектродного слоя пространственного заряда у электродов убывает с ростом вложенной в плазму мощности, самосмещение активного электрода становится положительным. При значениях разделительной емкости менее 50пФ происходит интенсивная генерация высших гармоник в емкостном канале разряда. Повышение величины разделительной емкости приводит к уменьшению плотности электронов, росту эффективной температуры электронов и увеличению эффективности вложения ВЧ мощности за счет увеличения относительной роли емкостного канала разряда. Изменение давления аргона приводит к перераспределению вклада индуктивного и емкостного каналов в поглощение ВЧ мощности. Наиболее эффективно ВЧ мощность вкладывается через индуктивный канал при давлении порядка 20мТор. При давлениях аргона менее

10мТор и более 70мТор вклад емкостного канала в поглощение ВЧ мощности увеличивается.

Четвертая глава посвящена математическому моделированию физических процессов в гибридном ВЧ разряде. Для нахождения объяснения особенностей поведения гибридного ВЧ разряда, обнаруженных экспериментально, была разработана самосогласованная модель разряда, позволяющая рассчитать его параметры, усредненные по объему разряда, зная величину ВЧ мощности, отдаваемой ВЧ генератором во внешнюю цепь, параметры внешней цепи, а также геометрические размеры источника плазмы. При формулировке модели предполагалось, что в состав плазмы входят: атомы аргона, концентрация которых определяется заданным давлением газа; медленные электроны, энергетическое распределение которых является максвелловским; быстрые монокинетичные электроны; ионы аргона.

Предполагалось, что емкостная ветвь разряда является симметричной, при этом падение постоянного потенциала в приэлектродном слое U_{sh} равняется половине амплитуды приложенного к электродам ВЧ напряжения V_{el} , $U_{sh} = V_{el}/2$; стенки источника плазмы находятся под отрицательным потенциалом ϕ относительно плазмы; столкновения ионов с электродами приводит к эмиссии электронов, вероятность рождения электрона при столкновении иона с поверхностью электрода равняется γ ; электроны, эмитированные с поверхности электродов, и рожденные в результате ионизации аргона электронами в объеме приэлектродных слоев, являются быстрыми. Энергия быстрых электронов ε_f определяется падением постоянного потенциала в слое, т.е. $\varepsilon_f = eU_{sh}$; все электроны, рожденные в объеме, не занятом слоем, являются медленными, максвелловскими.

Самосогласованная модель гибридного ВЧ разряда основана на уравнениях баланса числа ионов, медленных и быстрых электронов, мощности и уравнении квазинейтральности.

Уравнение баланса ионов фиксирует равенство числа ионов, рожденных в зоне ионизации объемом V , числу ионов, ушедших на электроды суммарной площадью $2S_{flange}$ и стенки газоразрядной камеры площади $S_{lateral}$:

$$\left(n_0 n_{sl} Z_{ion}^{sl} + n_0 n_{fst} Z_{ion}^{fst} \right) V = n_+ v_+ (2S_{flange} + S_{lateral}), \quad (6)$$

где n_0 , n_{sl} , n_{fst} , n_+ – концентрация нейтралов, медленных и быстрых электронов и ионов, Z_{ion}^{sl} , Z_{ion}^{fst} – скорость ионизации аргона медленными и быстрыми электронами, v_+ – скорость ионов.

Уравнение баланса медленных электронов фиксирует равенство числа электронов, рожденных в объеме V источника плазмы за вычетом объема, занятого

слоями пространственного заряда $2V_{sheath}$, числу электронов, ушедших на электроды и стенки газоразрядной камеры:

$$\begin{aligned} & (n_o n_{sl} Z_{ion}^{sl} + n_o n_{fst} Z_{ion}^{fst}) (V - 2V_{sh}) = \\ & = \frac{1}{4} n_{sl} v_e S_{lateral} \exp\left(-\frac{e\phi}{kT_e}\right) + \frac{1}{4} n_{sl} v_e (2S_{flanges}) \exp\left(-\frac{eU_{sh}}{kT_e}\right), \end{aligned} \quad (7)$$

где v_e – средняя скорость электронов, T_e – температура электронов.

Уравнение баланса быстрых электронов фиксирует равенство числа электронов, рожденных на электродах в результате ион-электронной эмиссии и в результате ионизации атомов аргона в объеме, занятом слоями пространственного заряда $2V_{sheath}$, числу электронов, ушедших на электроды и стенки газоразрядной камеры:

$$\begin{aligned} & \gamma n_+ v_+ + 2S_{flange} + n_o n_{fst} Z_{ion}^{fst} 2V_{sh} + n_o n_{sl} Z_{ion}^{sl} 2V_{sh} = \\ & = n_{fst} v_{fst} (2S_{flange} + S_{lateral}), \end{aligned} \quad (8)$$

где v_{fst} – скорость быстрых электронов.

Уравнение баланса мощности:

$$\begin{aligned} & \frac{P_{pl}}{e} = n_+ v_+ [2S_{flange} U_{sh} + S_{lateral} \phi] + \\ & + \frac{T_e}{2} n_e v_e \left(e^{-\frac{e\phi}{kT_e}} S_{lateral} + e^{-\frac{eU_{sh}}{kT_e}} 2S_{flange} \right) + n_{fst} v_{fst} S_{lateral} (U_{sh} - \phi) + \\ & + U_i n_o \left[(1 + R_c^{sl}) n_e Z_{ion}^{sl} + (1 + R_c^{fst}) n_{fst} Z_{ion}^{fst} \right] V \end{aligned} \quad (9)$$

фиксирует равенство вкладываемой в плазму мощности и мощности, выносимой на ее стенки ионами, медленными и быстрыми электронами, а также мощности, затраченной на ионизацию и возбуждение частиц в объеме. В формуле (9) U_i – потенциал ионизации, R_c^{sl} , R_c^{fst} – удельные затраты энергии на излучение атомов в результате их возбуждения медленными и быстрыми электронами; P_{pl} – ВЧ мощность, вкладываемая в плазму.

Условие квазинейтральности имеет стандартный вид:

$$n_{sl} + n_{fst} = n_+. \quad (10)$$

В диссертации при расчете скорости ионизации и удельных энергозатрат на

излучение учитывались только прямая ионизация и возбуждение.

Толщина слоя d_{sheath} рассчитывалась на основе равенства потока ионов, уходящих на электрод, рассчитанному по формуле Бома, потоку, рассчитанному по формуле Чайльда-Ленгмюра:

$$en_+ \mathbf{v}_+ = \frac{1}{9\pi} \sqrt{\frac{2e}{M}} \frac{U^{\frac{3}{2}}}{d_{sheath}^2}, \quad (11)$$

где U – падение постоянного потенциала в слое, M – масса ионов.

Рассмотрим связь между параметрами плазмы и мощностью, вложенной в плазму, на примере гибридного ВЧ разряда, горящего в аргоне при давлениях 1 – 100 мТор. Очевидно, что для формулировки самосогласованной модели гибридного разряда систему уравнений (6) – (11) необходимо дополнить уравнениями, описывающими поглощение ВЧ мощности плазмой и процессы во внешней цепи разряда:

$$P_{pl} = \frac{1}{2} (I_i^2 R_{pl}^i + I_c^2 R_c), \quad (12)$$

связывающее мощность, вложенную плазму, с амплитудами токов, текущими через индуктивный и емкостной канала I_i , I_c , активным сопротивлением плазмы R_c и эквивалентным сопротивлением индуктивного канала, а также уравнение, связывающее R_c , с параметрами плазмы:

$$R_c = \frac{m(\omega^2 + \nu^2)}{e^2 n_e \nu} \frac{l}{\pi r^2}, \quad (13)$$

где e , m – заряд и масса электрона, ω – рабочая частота, ν – электронная частота столкновений, l , r – длина и радиус источника плазмы.

Выражения для токов, текущих через индуктивный и емкостной каналы, были получены на основании эквивалентной схемы разряда, полученной в предположении о независимости индуктивного и емкостного каналов.

Расчеты показали, что при рассмотренных значениях мощности ВЧ генератора концентрация плазмы пропорциональна вложенной мощности, однако коэффициент пропорциональности убывает с ростом приэлектродного падения потенциала U_{sh} . Обозначим символом α отношение вложенной мощности к концентрации ионов

$\alpha = \frac{P_{pl}}{n_e}$. Физической причиной уменьшения α с ростом U_{sh} является увеличение

потока энергии, выносимого из разряда ионами, что, в свою очередь, приводит к понижению плотности плазмы.

Необходимо отметить, что при малых U_{sh} решения системы уравнений (6) – (12) перестают существовать. Анализ показывает, что проблема состоит в отсутствии решений уравнения (7). Действительно при малых значениях U_{sh}

слагаемое $\frac{1}{4} n_{sl} \mathbf{v}_e (2S_{flanges}) \exp\left(-\frac{eU_{sh}}{kT_e}\right)$ становится больше левой части уравнения.

Физически это означает, что в силу интенсивного ухода электронов на электроды, не удастся уравнивать уход электронов и ионов из объема разряда. Отсутствие решений системы уравнений (6) – (12) при малых U_{sh} означает невозможность горения разряда в рамках описанной выше модели.

Численное моделирование показало, что гибридный разряд при малых вложенных мощностях поддерживается вкладом мощности через емкостной канал. Увеличение мощности приводит к увеличению напряжения горения и тока, текущего через антенну. Как следствие возрастает энерговыделительная способность через индуктивный канал. Растет концентрация электронов, падает активное сопротивление плазмы и емкостное сопротивление приэлектродных слоев. В результате возрастает падение напряжения на разделительной емкости и уменьшается амплитуда ВЧ напряжения, подводимого к электродам емкостного канала. При этом квазистационарное падение потенциала вблизи электродов уменьшается. Рост величины разделительной емкости, сопровождающийся ростом ВЧ напряжения между электродами емкостного канала, приводит к увеличению потока энергии, выносимого из разряда ионами, что, в свою очередь, приводит к понижению плотности плазмы. Рост величины разделительной емкости, сопровождающийся понижением плотности плазмы, приводит к повышению активного сопротивления плазмы, повышению вклада ВЧ мощности через емкостной канал и эффективности поглощения ВЧ мощности.

Основные результаты и выводы

1. На основе экспериментальных исследований и численного моделирования выполнен детальный анализ динамики физических процессов в новой модификации ВЧ разряда, а именно, гибридном ВЧ разряде, возбуждаемом индуктивным и емкостным способом. Показано, что при малых значениях вложенной мощности, когда плотность плазмы мала, эффективность поглощения ВЧ мощности, поступающей в разряд через индуктивный канал мала, в результате мощность поступает в разряд главным образом через емкостной канал. Рост вложенной в плазму мощности приводит к увеличению напряжения горения разряда и росту тока, текущего через антенну, увеличению доли мощности, поступающей в разряд через индуктивный канал. Рост энерговыдела через индуктивный канал приводит к увеличению концентрации электронов, понижению активного сопротивления плазмы, уменьшению толщины приэлектродных слоев пространственного заряда и падению емкостного сопротивления слоев. Ток, текущий через емкостной канал растет, при этом повышается падение напряжения на разделительной емкости, включенной в емкостной канал разряда, что приводит к частичному запирающему емкостного канала. При

малых значениях разделительной емкости при условии преобладающего вложения ВЧ мощности через индуктивный канал толщина приэлектродного слоя положительного заряда у активного электрода уменьшается по сравнению с толщиной слоя у пассивного электрода и самосмещение активного электрода становится положительным.

2. Показано, что изменение величины разделительной емкости, включенной в емкостную ветвь гибридного ВЧ разряда, позволяет плавно регулировать параметры плазмы разряда. Повышение величины разделительной емкости приводит к увеличению приэлектродного падения потенциала, уменьшению плотности электронов вследствие увеличения энергии, выносимой ионами из разряда, росту эффективной температуры электронов и увеличению эффективности вложения ВЧ мощности за счет увеличения относительной роли емкостного канала разряда.
3. Показано, что изменение давления аргона приводит к перераспределению вклада индуктивного и емкостного каналов в поглощение ВЧ мощности. Наиболее эффективно ВЧ мощность вкладывается через индуктивный канал при давлении порядка 20 мТор, т.к. энерговклад через емкостной канал понижен вследствие более низких, чем при других рассмотренных давлениях значений активного сопротивления плазмы. При давлениях аргона менее 10 мТор и более 70 мТор вклад емкостного канала увеличивается вследствие роста активного сопротивления плазмы.
4. Впервые разработана математическая самосогласованная модель гибридного ВЧ разряда, позволяющая рассчитать основные параметры плазмы, напряжения и токи, текущие во внешней цепи разряда на основании известных мощности ВЧ генератора, значения разделительной емкости, индуктивности антенны, давления и геометрических параметров источника плазмы. Численные расчеты, выполненные на основании математической модели разряда позволили объяснить наблюдавшиеся экспериментально особенности разряда.

Список цитируемой литературы

1. *Кралькина Е. А.* Индуктивный высокочастотный разряд низкого давления и возможности оптимизации источников плазмы на его основе. // УФН, том 178, №5, с.519 – 540, (2008).
2. *Кралькина Е. А.* Особенности энерговклада в пространственно ограниченные ВЧ индуктивные источники плазмы низкого давления. // Диссертация на соискание ученой степени д. ф.-м. н. Москва, 2008.
3. *Райзер Ю. П., Шнейдер М. Н., Яценко Н. А.* Высокочастотный емкостный разряд. // М.: Изд. МФТИ, 1995, 320с.
4. *Lieberman M. A., Lichtenberg A. J.* Principles of plasma discharges and materials processing, second edition. // John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005, 757.
5. *Савинов В. П.* Граничные эффекты емкостного высокочастотного разряда. // Диссертация на соискание ученой степени д. ф.-м. н. Москва, 2001.

6. Kohler K., Coburn J. W., Horne D. E., Kay E., Keller J. H. Plasma potentials of 13.56 MHz rf argon glow discharges in a planar system. // J. Appl. Phys. 57(1), 1985, 59-66.
7. Гинзбург В.Л., Рухадзе А.А. Волны в магнитоактивной плазме. Наука, 1970.
8. Godyak V. A., Piejak R. B. In situ simultaneous radio frequency discharge power measurements. // J. Vac. Sci. Technol. A8(5), 3833-3837 (1990)
9. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. // М.: Наука, 1974, 223с.

Список публикаций по теме диссертации

1. А.Ф. Александров, К.В. Вавилин, Е.А. Кралькина, В.Б. Павлов, А.А. Рухадзе, В.П.Савинов, Ч. Чжао, В.Г. Якунин. Экспериментальное изучение закономерностей энерговыделения в гибридном высокочастотном разряде низкого давления при изменении мощности высокочастотного генератора и давления аргона. // Вестник Московского университета. Серия 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 2010. №4, стр. 71-75.
2. К.В.Вавилин, М.А.Гоморев, Е.А.Кралькина, П.А.Неклюдова, В.Б.Павлов, Ч.Чжао. Изучение закономерностей энерговыклада в гибридный вч разряд низкого давления. // Вестник Казанского технологического университета, №13, 2011, стр.7-11.
3. К.В.Вавилин, М.А.Гоморев, Е.А.Кралькина, П.А.Неклюдова, В.Б.Павлов, Ч.Чжао. Влияние внешних параметров на особенности высокочастотного гибридного разряда низкого давления. // Вестник Московского университета. Серия 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 2012. №1, С. 97-100.
4. К.В.Вавилин, М.А.Гоморев, Е.А.Кралькина, П.А.Неклюдова, В.Б.Павлов, Ч.Чжао. Экспериментальное изучение параметров плазмы гибридного ВЧ разряда низкого давления. // Вестник Московского университета. Серия 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 2012. №1, с. 101-105.
5. A.F. Alexandrov, K.V. Vavilin, E.A. Kralkina, V.B. Pavlov, A.A. Rukhadze, V.P. Savinov, Chen Zhao. Study of the inductive RF discharge with the capacitive component. // VI International Conference Plasma Physics and Plasma Technology. Volume 1, p. 106. Minsk, Belarus. 2009.
6. A.F. Alexandrov, K.V. Vavilin, E.A. Kralkina, V.B. Pavlov, A.A. Rukhadze, V.P. Savinov, Chen Zhao. Physical model of RF plasma source located in the external magnetic field. // VI International Conference Plasma Physics and Plasma Technology. Volume 1, p. 110. Minsk, Belarus. 2009.
7. А.Ф. Александров, К.В. Вавилин, Е.А. Кралькина, В.Б. Павлов, А.А. Рухадзе, В.П.Савинов, Чэнь Чжао, В.Г.Якунин. Влияние внешней цепи разряда на энерговыклад в гибридный ВЧ разряд низкого давления. XXXVIII международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС. 2011. стр.352.
8. К.В. Вавилин, М.А. Гоморев, Е.А. Кралькина, П.А. Неклюдова, В.Б. Павлов, А.К. Петров, А.В. Турковская, Чэнь Чжао. Закономерности энерговыклада в индуктивный ВЧ разряд при переходе от нелокального к локальному режиму

горения. // XXXVIII международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС. 2011. стр.353.

9. *К.В. Вавилин, М.А. Гоморев, Е.А. Кралькина, П.А. Неклюдова, В.Б. Павлов, А.К. Петров, А.В. Турковская, Чэнь Чжао.* Изучение закономерностей энерговыклада в гибридный ВЧ разряд низкого давления. // Международная конференция «Физика высокочастотных разрядов». 2011, Казань, стр. 87.
10. *К.В.Вавилин, М.А.Гоморев, Е.А.Кралькина, П.А.Неклюдова, В.Б.Павлов, Ч.Чжао.* Роль емкостного канала в поддержании гибридного ВЧ разряда низкого давления. // Всероссийская конференция по физике низкотемпературной плазмы ФНТП-2011. Петрозаводск, 2011.