

На правах рукописи

**Ахмедова Ирада Фаик кызы**

**Влияние емкостной составляющей на характеристики  
индуктивного ВЧ разряда низкого давления**

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва 2008

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

Научные руководители: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Александров Андрей Федорович  
кандидат физико-математических наук,  
Кралькина Елена Александровна

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Синкевич Олег Арсеньевич  
кандидат физико-математических наук,  
доцент  
Арсенин Алексей Владимирович

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

Защита состоится 18 декабря 2008 г. в 14-00 на заседании Диссертационного совета Д. 501.001.66 в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ, физический факультет, аудитория 5-19.

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

Автореферат разослан «18» ноября 2008г.

Ученый секретарь  
доктор физико-математических наук

Ершов А.П.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

В настоящее время индуктивный ВЧ разряд низкого давления широко применяется в промышленных плазменных технологиях благодаря своим свойствам: высокой концентрации электронов, достигаемой при относительно невысоком уровне ВЧ мощности, небольшой температуре электронов, а, следовательно, невысокому потенциалу плазмы относительно стенок, ограничивающих разряд, отсутствию контакта плазмы с металлическими электродами, возможностью использования в качестве рабочих химически активных газов. Очевидно, что развитие плазменных технологий неизбежно приводит к повышению требований к возможностям и параметрам источников плазмы, основанных на индуктивном ВЧ разряде. Усовершенствование таких источников плазмы может быть выполнено только на основе детального понимания физических процессов, происходящих в индуктивном разряде.

Индуктивный ВЧ разряд известен уже более ста лет. За долгие годы его исследования накоплен огромный экспериментальный материал, построены теоретические модели разряда, исследованы закономерности проникновения ВЧ полей в плазму и механизмы поглощения ВЧ мощности. Однако в последние десятилетия было показано, что большинство экспериментальных работ, посвященных исследованию индуктивного ВЧ разряда низкого давления, содержит систематическую погрешность, связанную с некорректным учетом потерь мощности в индукторе, поддерживающим разряд. Как оказалось, величина мощности, поглощаемая плазмой разряда при низких давлениях не тождественна мощности, отдаваемой ВЧ генератором во внешнюю цепь, а делится между активным сопротивлением внешней цепи и плазмой. ВЧ мощность поступает в плазму по двум каналам: индуктивному, существующему благодаря току, текущему по индуктору или антенне, и емкостному, существующему благодаря наличию емкостной связи между антенной и плазмой. Взаимное влияние каналов, а также зависимость импеданса плазмы, передающего способность поглощать ВЧ мощность, от ее параметров может привести к появлению ряда самосогласованных эффектов, анализ которых позволяет глубже понять физические процессы, происходящие в разряде. В связи с этим закономерен интерес к изучению особенностей энергозаклада в индуктивный ВЧ разряд низкого давления, особенно при наличии значительной емкости между индуктором и плазмой.

Диссертация посвящена экспериментальному исследованию особенностей разряда, возникающих при горении индуктивного ВЧ разряда, обладающего емкостной составляющей, в режимах, при которых существенны потери мощности во внешней цепи разряда, а также

математическому моделированию поведения разряда. В связи с этим тема диссертационной работы представляется актуальной.

### **Цель работы**

Основные задачи диссертационной работы:

- экспериментальное исследование особенностей режимов горения индуктивного ВЧ разряда, при которых существенно перераспределение мощности между плазмой и внешней цепью разряда;
- математическое моделирование особенностей режимов горения индуктивного ВЧ разряда, при которых существенно перераспределение мощности между плазмой и внешней цепью разряда;
- изучение влияния емкостной составляющей индуктивного разряда на ввод мощности через индуктивный канал и режимы горения такого ВЧ разряда.
- обобщение самосогласованной модели индуктивного ВЧ разряда низкого давления на случай индуктивного ВЧ разряда с независимым емкостным каналом;
- математическое моделирование режимов горения индуктивного ВЧ разряда, обладающего независимой емкостной компонентой.

### **Научная новизна работы.**

- Экспериментально изучены режимы горения индуктивного ВЧ разряда низкого давления, при которых существенны потери мощности во внешней цепи разряда. Показано, что при изменении мощности ВЧ генератора или величины внешнего магнитного поля происходит перераспределение мощности между плазмой и активным сопротивлением внешней цепи, проявляющееся в насыщении плотности плазмы при увеличении мощности ВЧ генератора, немонотонном характере изменении параметров плазмы при изменении внешнего магнитного поля, гистерезисе концентрации и эффективной температуры электронов при увеличении и уменьшении величин мощности ВЧ генератора и индукции внешнего магнитного поля. Показано, что особенности перераспределения мощности при изменении внешних параметров разряда связаны с изменением способности плазмы поглощать ВЧ мощность, которая немонотонно зависит от плотности плазмы и величины внешнего магнитного поля. Установлено, что физическая причина вышеуказанного при отсутствии магнитного поля состоит в резком сужении области проникновения ВЧ полей в плазму при высокой концентрации электронов. При наличии внешнего магнитного поля немонотонность связана с

существованием резонансов возбуждения связанных между собой геликонов и косых Ленгмюровских волн..

- Экспериментально исследовано влияние емкостной составляющей на параметры ВЧ индуктивного разряда. Показано, что наличие емкостного канала приводит к изменению доли мощности, поступающей в плазму через индуктивный канал. Это, в свою очередь, приводит к изменению условий перехода индуктивного разряда из моды с низкой плотностью плазмы в моду с высокой плотностью, сглаживанию немонотонной зависимости плотности плазмы от величины внешнего магнитного поля и исчезновению гистерезиса.
- Обобщена самосогласованная модель ВЧ индуктивного разряда на случай разряда с независимой емкостной компонентой. Выполнено математическое моделирование поведения разряда в широком диапазоне параметров разряда и величин мощности, подводимых к плазме через индуктивный и емкостной каналы. Выявлены закономерности влияния емкостной составляющей на долю мощности, поступающую в плазму через индуктивный канал. Показано, что они определяется связью эквивалентного сопротивления плазмы с параметрами плазмы (плотностью и эффективной температурой электронов, частотой столкновений электронов с нейтралами) и величиной внешнего магнитного поля.

### **Практическая ценность работы**

Научная ценность состоит в том, что полученные результаты могут служить основой для объяснения физических свойств индуктивного ВЧ разряда низкого давления, обладающего емкостной компонентой, построения полной физической модели такого разряда. И таким образом, результаты могут служить научной базой при конструировании и выборе оптимальных режимов технологических источников плазмы низкого давления.

### **Апробация диссертации.**

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

1. Тезисы докладов XXX международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС., Россия, февраль 24-28, 2003.
2. Ломоносовские чтения, МГУ, Физический факультет, апрель 18–25, 2003
3. III Международный симпозиум “Термохимические процессы в аэродинамике плазмы”. Петербург, Россия, июль 2003.

4. IV International Conference Plasma Physics and Plasma Technology. Minsk, Belarus, September 15-19, 2003
5. Российская конференция по Физической электронике, Махачкала, Россия, сентябрь 23-26, 2003.
6. V International Conference Plasma Physics and Plasma Technology. Minsk, Belarus, September 18-22, 2006.
7. XXVIII International Conference on Phenomena in Ionized Gases July 15 - 20 2007, Prague, Czech Republic

### Публикации.

Основные результаты диссертации опубликованы в 9 статьях и 12 тезисах, список которых приведен в конце автореферата.

### Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырёх 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 115 страниц, включая 62 рисунка и библиографию из 96 наименований.

### Содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырёх 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 теоретических и экспериментальных работ посвященный исследованию физических свойств индуктивного высокочастотного разряда низкого давления.

Величины ВЧ мощности, поглощаемая плазмой ндуктивного разряда, определяется выражением:

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

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

Интегрирование ведется по всему объему плазмы. В индуктивном разряде ВЧ электрические поля пропорциональны току, текущему в антенне, поэтому уравнение (1) можно переписать в виде:

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

где коэффициент пропорциональности  $R_{pl}$  между вложенной мощностью и квадратом тока через антенну имеет размерность сопротивления и зависит только от свойств плазмы. В литературе множитель  $R_{pl}$  принято называть эквивалентным сопротивлением плазмы. В работах А.Ф.Александрова и др. показано, что физический смысл эквивалентного сопротивления плазмы состоит в том, что оно является мерой способности плазмы поглощать ВЧ мощность. Его величина зависит как от характера проникновения полей в плазму, так и от механизма поглощения мощности, т.е. определяется основными фундаментальными свойствами плазмы индуктивного разряда. На кафедре физической электроники физического факультета МГУ были выполнены систематические исследования зависимости эквивалентного сопротивления плазмы от ее параметров и внешних параметров разряда при низких давлениях (10 мТор и меньше). Поглощение ВЧ мощности растет с ростом концентрации электронов, с другой стороны, глубина скин-слоя, определяющая ширину области поглощения ВЧ мощности, убывает с ростом  $n_e$ . Вследствие этого зависимость  $R_{pl}$  от концентрации электронов является немонотонной, т.е. способность плазмы поглощать ВЧ мощность в области высоких  $n_e$  убывает благодаря экранировке ВЧ полей. В области давлений нейтрального газа порядка 10 мТор вклад в поглощение ВЧ мощности вносят как столкновительный, так и черенковский механизмы. Понижение давления приводит к усилению роли черенковского механизма поглощения ВЧ мощности.

Наложение внешнего магнитного поля на плазму индуктивного ВЧ разряда может привести к возбуждению двух связанных между собой волн: геликона и косої ленгмюровской волны. При значениях магнитного поля, соответствующих областям резонансного возбуждения волн, ВЧ мощность эффективно поглощается плазмой. Это отражается в появлении локальных максимумов в зависимости эквивалентного сопротивления от величины внешнего магнитного поля. Увеличение плотности плазмы при фиксированном магнитном поле приводит к понижению значений эквивалентного сопротивления в силу экранировки ВЧ электрических полей при выходе плазмы из резонанса. В области резонанса при низких давлениях доминирующим механизмом диссипации является черенковское поглощение квазипродольной косої ленгмюровской волны.

В индуктивном ВЧ разряде мощности генератора делится между двумя нагрузками: плазмой и антенной, обладающей активным сопротивлением  $R_{ant}$ . При этом выражение для баланса мощности во внешней цепи генератора принимает вид:

$$P_{Gen} = P_{Ant} + P_{Pl} \quad (3)$$

$$P_{Gen} = \frac{1}{2} I^2 (R_{Ant} + R_{Pl}) \quad (4)$$

где  $I$  – ток, текущий через антенну,  $R_{ant}$  – сопротивление антенны, а  $R_{pl}$  – эквивалентное сопротивление плазмы.

Обзор работ, посвященных исследованию эквивалентного сопротивления плазмы, показывает, что абсолютные значения  $R_{pl}$  при отсутствии магнитного поля и давлениях менее 10 мТор не превосходят 1.5 Ом. Наложение на разряд внешнего магнитного поля, величина которого соответствует областям резонансного возбуждения геликонов и косых ленгмюровских волн, приводит к повышению эквивалентного сопротивления до 10-20 Ом, однако, при отсутствии резонанса значения эквивалентного сопротивления существенно ниже. Обзор экспериментальных работ, посвященных исследованию эффективности ввода ВЧ мощности в плазму индуктивного разряда, показывает, что эффективное сопротивление внешней цепи  $R_{ant}$ , измеренное в различных постановках эксперимента, составляет величину 0.2-3 Ом. Таким образом оказывается, что ввести ВЧ мощность в плазму индуктивного ВЧ разряда без потерь практически невозможно. Впервые на это указал В. Годяк в середине 90х годов XX века.

Очевидно, что при условии

$$R_{pl} \leq R_{ant} \quad (5)$$

поведение индуктивного ВЧ разряда кардинально изменяется. Параметры плазмы определяются мощностью, вложенной в плазму  $P_{pl}$ . Однако, при выполнении неравенства (3)  $P_{pl}$  зависит не только от мощности ВЧ генератора, но и от величины эквивалентного сопротивления плазмы, которое в свою очередь зависит от параметров плазмы и условий ее поддержания. В работах А.Ф. Александрова и др. на основании математического моделирования были изучены режимы индуктивного ВЧ разряда, для которых выполняется неравенство (3) и предсказано существование эффектов, связанных с перераспределением мощности между плазмой и внешней цепью разряда. Экспериментально указанные выше режимы разряда изучены не были.

Известно, что в индуктивном ВЧ разряде существует канал ввода ВЧ мощности в плазму, связанный с наличием паразитных емкостей между витками антенны, а также между антенной и плазмой. В настоящее время в литературе принята точка зрения, что индуктивный разряд поджигается и горит при малых мощностях за счет потенциальных полей, существующих между витками индуктора. По мере роста мощности ВЧ генератора растет ток через антенну  $I$ , и по достижению  $I$  значений, необходимых для существования индуктивного режима, разряд переходит



в моду, которая поддерживается вихревыми полями. Наличие паразитных емкостей между антенной и плазмой сопровождается, во-первых, изменением тока, текущего через антенну, а, во-вторых, изменением параметров плазмы, в свою очередь определяющих эквивалентное сопротивление плазмы и долю мощности, поступающую в плазму через индуктивный канал. Обзор литературы показал, что в настоящее время отсутствует анализ влияния емкостной составляющей на свойства индуктивного ВЧ разряда и величину мощности, поступающей в разряд через индуктивный канал.

В конце первой главы сформулирована цель диссертации.

**Вторая глава** содержит описание условий экспериментов и методики измерений.

При экспериментальных исследованиях использовались цилиндрические источники плазмы длиной от 5см до 20см и радиусом от 5см до 25см, закрытые с торцов диэлектрическими фланцами. На внешней диэлектрической части поверхности источников располагались водоохлаждаемые антенны. С помощью системы электромагнитов в источниках плазмы создавалось магнитное поле от 0 до 20мТл. Давление менялось в диапазоне от 0.5мТор до 100мТор.

Для возбуждения и поддержания индуктивного ВЧ разряда в источниках плазмы применялись торцевые (рис. 1а) и боковые (рис. 1б) спиральные антенны.

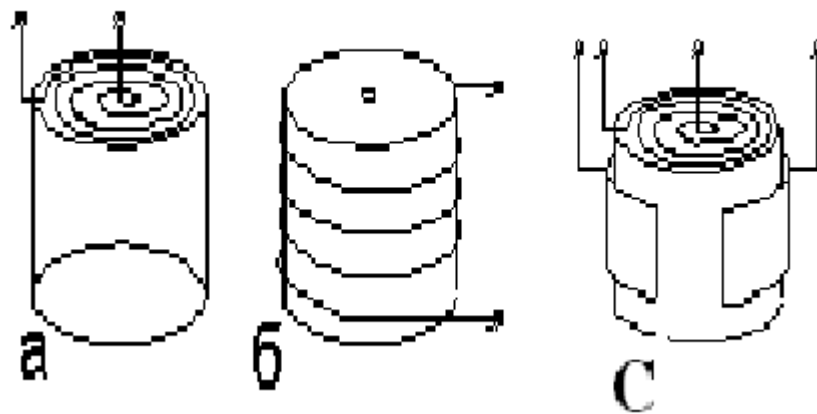


Рис.1. Типы использованных антенн.

Для изучения влияния емкостной связи между антенной и плазмой на характеристики индуктивного разряда на поверхности источников плазмы дополнительно к спирали размещались обкладки конденсатора (см. рис.1с). Рассматривалось два случая – расположение обкладок на

внешней и внутренней поверхности источника плазмы. Наличие обкладок конденсатора на поверхности источника плазмы позволяло организовать контролируемый емкостной канал ввода мощности так, что индуктивная связь между антенной и плазмой оставалась неизменной.

Для возбуждения и поддержания чисто индуктивного разряда в источниках плазмы концы антенны через систему согласования и измеритель мощности подключались к ВЧ генератору с рабочей частотой 13.56МГц.

Для изучения роли емкостной составляющей в первой серии экспериментов обкладки конденсатора, расположенные на поверхности источника плазмы, через отдельную систему согласования подключались ко второму ВЧ генератору, мощность которого можно было изменять независимо от генератора, питающего индуктор. В ряде экспериментов при расположении обкладок конденсатора внутри разряда они подключались к источнику постоянного тока.

Во второй серии экспериментов для моделирования реального индуктивного ВЧ разряда, обладающего емкостной компонентой (*далее* гибридного ВЧ разряда), индуктор и конденсатор, соединенные параллельно, подключались к одному ВЧ генератору. Для того чтобы индуктор не замыкал «емкостную» цепь по постоянному току, между концами антенны и выводами, подключенными к обкладкам конденсатора, включались конденсаторы с емкостью 300пФ. В процессе экспериментов измерялись токи, текущие через антенну и конденсатор, а также напряжение на выходе из системы согласования. Мгновенные значения токов и напряжений, измеренные в «емкостной» цепи, интегрировались по времени для расчета мощности, выделяемой в емкостном канале  $P_c$ . Полная мощность, выделяемая в плазме в случае чисто индуктивного и гибридного разрядов, определялась как разница между выходной мощностью ВЧ генератора и потерями мощности во внешней цепи.

В заключение главы описаны применявшиеся в работе методики измерений внешних и внутренних параметров разряда: метод зондов Ленгмюра, методика измерения пространственного распределения концентрации плазмы и эффективной температуры электронов по отношению интенсивности спектральных линий, методика измерения ВЧ токов «поясом Роговского».

**В третьей главе** диссертации экспериментально изучено влияние потерь мощности во внешней цепи разряда на параметры индуктивного ВЧ разряда. При проведении экспериментов использовались антенны с эффективным сопротивлением 1–4Ома. Таким образом, в экспериментах, как правило, выполнялось неравенство  $R_{pl} \leq R_{ant}$ .

Цель первой серии экспериментов состояла в выявлении особенностей поведения индуктивного ВЧ разряда как целого при изменении величины внешнего магнитного поля. Для этого измерялись зависимости зондового ионного тока насыщения  $i_p$ , и/или интенсивности  $Int$  интегрального свечения плазмы от величины магнитного поля  $B$  при фиксированной мощности ВЧ генератора и от мощности ВЧ генератора  $P_{gen}$  при фиксированных значениях магнитного поля  $B$ .

Эксперименты показали, что при давлениях газа менее 10мТор, зависимости  $i_p$  и  $Int$  от величины внешнего магнитного поля, полученные в источниках плазмы разного размера, оснащенных спиральными антеннами, расположенными на их боковой или торцевой поверхности, имеют общую закономерность. Это – немонотонная зависимость измеренных величин от индукции магнитного поля. Наличие локальных максимумов зависимостей  $i_p(B)$ ,  $Int(B)$  является общей чертой индуктивных ВЧ разрядов низкого давления, однако, положение и количество локальных максимумов  $i_p(B)$ ,  $Int(B)$  существенно зависит от условий экспериментов. При давлении 10мТор и выше максимумы, как правило, сглаживаются.

Необходимо отметить, что в ряде случаев при работе с торцевой антенной был зафиксирован гистерезис  $i_p$ ,  $Int$  при увеличении и уменьшении магнитного поля. Появление гистерезиса было также обнаружено при изучении зависимостей  $i_p$ ,  $Int$  от мощности ВЧ генератора при наложении на индуктивный ВЧ разряд внешнего магнитного поля.

Более подробные зондовые и спектральные измерения, выполненные при давлениях менее 10мТор в источнике плазмы диаметром и длиной 15см, оснащенный торцевой спиральной антенной, показали, что при изменении величины внешнего магнитного поля  $B$  на индуктивный ВЧ разряд наблюдается немонотонное изменение концентрации плазмы. Рассмотрим типичную зависимость концентрации и эффективной температуры электронов от величины внешнего магнитного поля, полученную при давлении аргона 2мТор и мощности ВЧ генератора 200Вт. В отсутствии магнитного поля значения  $n_e$  близки к  $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ . По мере роста магнитного поля в диапазоне 0 – 1.2мТл плотность плазмы монотонно растет и достигает значения  $8.3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Затем концентрация электронов начинает убывать и при магнитном поле 1.8мТл происходит срыв разряда. Несмотря на значительные изменения плотности плазмы, эффективная температура электронов с магнитным полем изменяется слабо. В отсутствии магнитного поля эффективная температура электронов близка к 4эВ, а при наличии магнитного поля изменяется в диапазоне 5-6эВ.

Одной из причин увеличения концентрации электронов с ростом магнитного поля в чисто индуктивном разряде может быть снижение подвижности электронов поперек магнитного поля, уменьшающее уход электронов на боковые стенки источника плазмы. Однако, уменьшение

концентрации электронов с ростом магнитного поля, а тем более срыв разряда, объяснить снижением подвижности электронов не удастся. Очевидно, что существует как минимум еще один фактор, влияющий на свойства разряда. Таким фактором может быть перераспределение мощности между антенной и плазмой при изменении внешнего магнитного поля. В связи с этим были определены величины ВЧ мощности, поглощенные плазмой при различных величинах магнитных полей. Это было сделано в экспериментах с чисто индуктивным разрядом на основании измерений тока  $I$ , текущего через антенну, при увеличении внешнего магнитного поля. Измерения показали, что поджиг разряда приводит к небольшому уменьшению тока текущего через антенну, а дальнейшее увеличение магнитного поля приводит к росту разницы между токами, текущими через антенну при наличии разряда и без него, что свидетельствует о росте эквивалентного сопротивления плазмы и соответственно доли мощности, поглощенной плазмой. После срыва разряда значения тока становятся такими же, как и до поджига разряда.

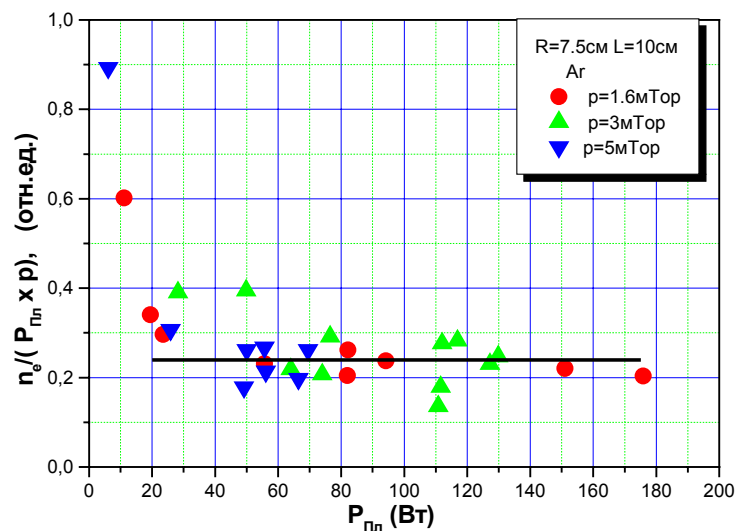
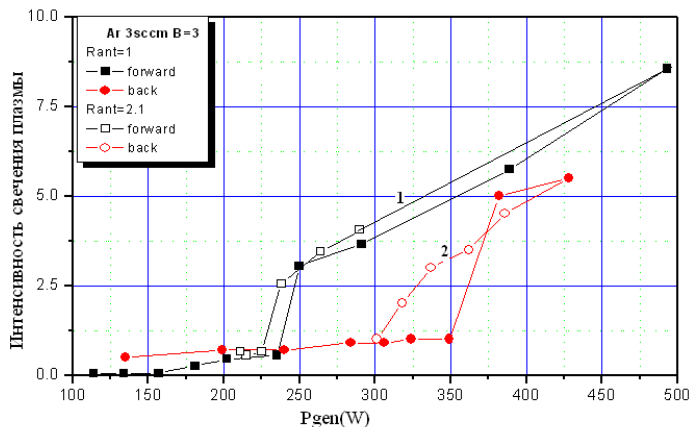


Рис.2. Зависимость  $n_e / (P_{пл} \times p)$  от мощности, поглощенной плазмой.

На рис.2 собраны все экспериментальные данные, представленные в виде зависимости  $n_e / (P_{пл} \cdot p)$  от мощности, поглощенной плазмой. Здесь  $p$  – давление аргона в разрядной камере. Можно видеть, что при условии, когда в плазму вкладывается мощность, превышающая 40Вт, все точки в пределах погрешности эксперимента ложатся на прямую, параллельную оси абсцисс. Это означает, что средняя по объему концентрация электронов в плазме индуктивного ВЧ разряда пропорциональна вложенной в плазму мощности, а особенности изменения плотности плазмы с изменением магнитного поля связаны с перераспределением мощности ВЧ генератора между

активным эффективным сопротивлением антенны и эквивалентным сопротивлением плазмы. Рост отношения  $n_e / (P_{пл} \cdot p)$  в области малых (<40Вт) мощностей, вложенных в плазму, связан, по-видимому, с наличием емкостной компоненты разряда. Таким образом, приведенные выше данные позволяют сделать вывод, что изменение концентрации электронов с ростом магнитного поля объясняются перераспределением ВЧ мощности между двумя активными нагрузками: антенной и плазмой.

В следующей серии экспериментов изучались свойства индуктивного разряда, возбуждаемого антеннами с различным эффективным сопротивлением. Для этого эффективное сопротивление исходной антенны искусственно повышалось с помощью дополнительного сопротивления. Изменение характеристик разряда при увеличении сопротивления антенны дало возможность в прямом эксперименте зафиксировать сужение области существования разряда (по магнитному полю) вследствие роста потерь мощности во внешней цепи. Наиболее интересные результаты были получены при изучении перехода разряда из *E*- в *H*-моду при использовании антенн с различным сопротивлением (см. рис.3). Как видно в чисто индуктивном разряде, с ростом потерь мощности во внешней цепи (ростом  $R_{ant}$ ) происходит смещение положения перехода разряда из *E*- в *H*-моду в область больших мощностей ВЧ генератора. Кроме того, в случае «высокоомной» антенны в переходной области появляется гистерезис. Оценки величины мощности, поглощенной плазмой, по значениям тока, текущего через антенну показали, что при наличии гистерезиса при одной и той же мощности ВЧ генератора существуют два режима: в первом случае подавляющая часть мощности расходуется в антенне и только малая часть идет на поддержание плазмы, а во втором случае – основная часть мощности выделяется в плазме, что позволяет разряду гореть в моде с высокой концентрацией электронов. Аналогичный результат



был получен при введении дополнительной мощности в разряд через канал постоянного тока(рис.4)

Рис.3. Зависимость интенсивности свечения плазмы от мощности генератора. Результаты, полученные при увеличении мощности генератора помечены заполненными значками, при уменьшении мощности генератора – полыми значками. 2 – случай «высокоомной» антенны.

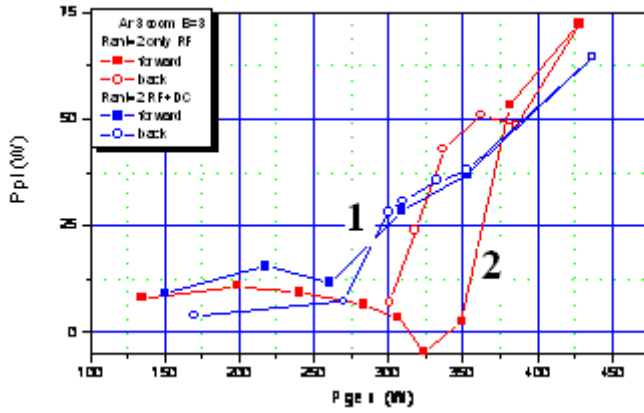


Рис.4. Зависимость доли мощности, поступающей в разряд через индуктивный разряд от мощности ВЧ генератора, питающего антенну, при увеличении (квадраты) и уменьшении (кружки) мощности. 1 – разряд с независимым каналом постоянного тока, 2 – чисто индуктивный разряд

Сравнение полученных экспериментальных данных с результатами измерений эквивалентного сопротивления плазмы, его теоретическими значениями и результатами математического моделирования позволяет сделать вывод, что наблюдавшаяся в экспериментах немонотонная зависимость эквивалентного сопротивления от величины магнитного поля связана с резонансным характером поглощения ВЧ мощности плазмой вследствие возбуждения связанных между собой геликонов и косых ленгмюровских волн. Выход из области резонанса вследствие нарушения неравенства:

$$\omega = \frac{\pi^2 c^2 \Omega_e}{L^2 \omega_{Le}^2} \ll \Omega_e \quad (6)$$

сопровождается резким падением эквивалентного сопротивления, доли мощности, поглощенной плазмой и соответственно плотности плазмы. В случае, если мощность, поглощаемая плазмой, оказывается недостаточной для поддержания разряда происходит срыв разряда. В выражении(6)  $L$  – длина источника плазмы,  $c$  – скорость света,  $\Omega_e$ ,  $\omega_{Le}$  - циклотронная и ленгмюровская частоты.

Результаты математического моделирования, показали, что условиями появления гистерезиса являются малость сопротивления плазмы по сравнению с сопротивлением антенны, а также существование немонотонной зависимости эквивалентного сопротивления плазмы от концентрации электронов. Неудивительно при этом, что рост сопротивления антенны привел к появлению гистерезиса.

**Четвертая глава** диссертации посвящена исследованию влияния емкостной составляющей на свойства индуктивного ВЧ разряда. Для того чтобы разобраться во влиянии емкостной составляющей разряда на зависимость параметров плазмы от магнитного поля, и в частности на срывы разряда, серия описанных в Главе 3 экспериментов с чисто индуктивным разрядом была

дополнена экспериментами с разрядом с независимыми индуктивным и емкостным каналами и гибридным разрядом.

На рис.5 показаны зависимости тока ионов аргона от магнитного поля, полученные с помощью источника ионов, в котором были реализованы чисто индуктивный разряд, разряд с независимыми индуктивным и емкостным каналами и гибридный разряд. Как видно, при условии возбуждения чисто индуктивного разряда последний существует в ограниченной по магнитному полю области, а именно в диапазоне от 0.5 до 1.6 мТл. При наличии независимого емкостного канала разряд поджигается без внешнего магнитного поля, а в области срыва чисто индуктивного разряда разряд не гаснет, а переходит в моду, характерную для чисто емкостного разряда. Область перехода становится тем более плавной, чем выше величина ВЧ мощности, вкладываемой в плазму через емкостной канал, и чем выше давление аргона.

Известно, что при низких давлениях емкостной разряд загорается в  $\gamma$ -режиме, для которого характерны формирование квазистационарных приэлектродных скачков потенциала и генерация пучков быстрых электронов, эффективно ионизирующих рабочий газ. Появление быстрых электронов в индуктивном разряде с емкостной компонентой приводит к дополнительной ионизации аргона, увеличению плотности плазмы по сравнению с чисто индуктивным разрядом и наблюдавшемуся росту ионного тока. Изменение плотности плазмы и энергетического распределения электронов приводят к изменению эквивалентного сопротивления плазмы, что должно проявляться в изменении доли мощности, поступающей в разряд через индуктивный канал. Действительно, измерения показали, что в переходных областях величины тока, текущего через антенну, отличаются от полученных в чисто индуктивном разряде. Это указывает на влияние емкостной составляющей разряда на величину мощности, поступающую в разряд через индуктивный канал.

Существенное влияние емкостной составляющей на свойства индуктивного разряда было зафиксировано при исследовании перехода разряда из моды с низкой плотностью плазмы (*E*-моды) в моду с высокой плотностью (*H*-моду) при увеличении мощности ВЧ генератора при постоянном значении магнитного поля. В случае если в разряд дополнительно вводится мощность через независимый канал происходит смещение области перехода разряда из моды с низкой плотностью плазмы в моду с высокой плотностью в область меньших мощностей ВЧ генератора, питающего индуктор, увеличение величины мощности, вкладываемой в разряд через индуктивный канал, а также исчезновение гистерезиса (см. рис.4). Как отмечалось выше, появление емкостного

канала ввода мощности, а, следовательно, быстрых электронов в разряде сопровождается ростом плотности плазмы. Это приводит к росту эквивалентного сопротивления плазмы и исчезновению гистерезиса.

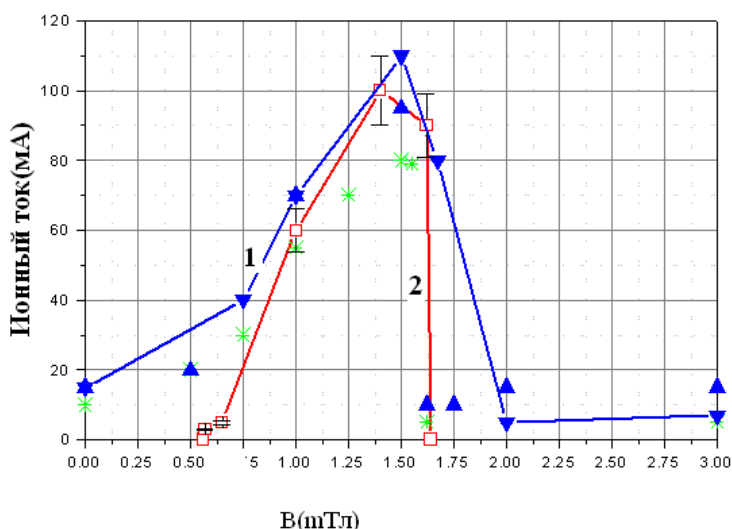


Рис.5. Зависимость тока пучка ионов от величины магнитного поля. 1 кривая – независимый емкостной канал (треугольники вершиной вверх и вниз – мощность ВЧ генератора, питающего емкостной канал, равна 60 и 200Вт соответственно). 2 кривая - чисто индуктивный разряд. Зеленые звездочки – гибридный разряд. Источник ионов радиуса 5см и длины 10см, аргон, расход 10scсм.

В заключение обзора экспериментальных результатов показано, что при рассмотренных условиях экспериментов влияние независимого емкостного канала на интенсивность свечения разряда при его горении в *H*-режиме мало.

Для того чтобы разобраться в физических причинах обнаруженных закономерностей в работе выполнено математическое моделирование индуктивного ВЧ разряда с независимой емкостной компонентой. Прежде всего, в диссертации была обобщена ранее разработанная на кафедре физической электроники самосогласованная модель ВЧ индуктивного разряда на случай разряда с независимой емкостной компонентой. Основное отличие системы уравнений, описывающей разряд с емкостной компонентой от системы уравнений баланса для индуктивного разряда, кроется в уравнении баланса мощности, фиксирующем равенство мощности, вложенной в разряд, сумме потерь. Последние определяются уносом мощности на стенки газоразрядной камеры источника плазмы ионами и электронами, а также потерями на ионизацию и излучение в объеме источника. При наличии независимого емкостного канала вблизи обкладок конденсатора формируются слои пространственного заряда, в котором происходит падение квазистационарного потенциала  $V_s$ . Это приводит к увеличению мощности, выносимой ионами на стенки. Кроме того, в случае индуктивного разряда с независимой емкостной компонентой мощность, поглощаемая плазмой, складывается из мощности, вложенной через индуктивный  $P_{pl}^{ind}$  и емкостной каналы  $P_{pl}^{cap}$ .



Результаты математического моделирования разряда с независимой емкостной компонентой, позволили прояснить физические причины эффектов, наблюдавшихся экспериментально.

Расчеты показали (см. рис.6), что мощность, вкладываемая через индуктивный канал, зависит от величины мощности, вкладываемой через емкостной канал. При небольших значениях  $P_{Gen}^{ind}$  мощность, вкладываемая через индуктивный канал  $P^{ind}$ , растет с ростом  $P_{Gen}^{cap}$ , затем приближается к значениям, имеющим место при отсутствии емкостной составляющей, и, наконец, становится меньше, чем в чисто емкостном разряде. Уменьшение мощности  $P^{ind}$  в области высоких значений  $P_{Gen}^{ind}$  тем сильнее, чем выше  $P_{Gen}^{cap}$ .

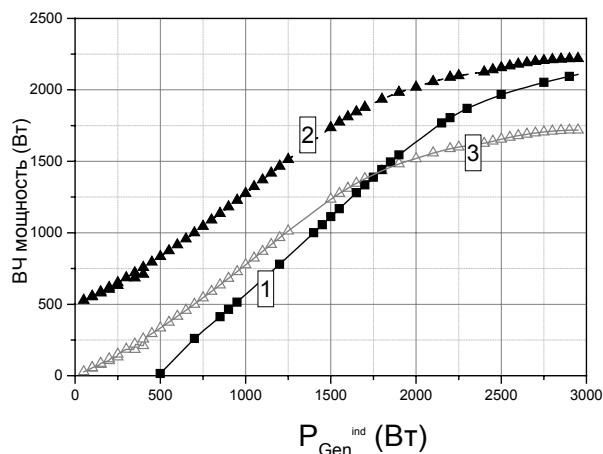


Рис.6. Зависимость полной вложенной в плазму мощности от мощности «индуктивного» ВЧ генератора в чисто индуктивном разряде (кривая 1) и в разряде с независимой емкостной компонентой (кривая 2).  $P_{cap} = 500$ Вт. Кривая 3 — доля мощности, поступающей в разряд через индуктивный канал.

Физическая причина указанного выше характера влияния емкостного канала на долю мощности, поступающую в плазму через индуктивный канал, состоит в немонотонной зависимости эквивалентного сопротивления плазмы от концентрации электронов. Ввод дополнительной мощности через независимый канал приводит к увеличению плотности плазмы и изменению эквивалентного сопротивления плазмы. Если результирующая плотность плазмы ниже величины, при которой эквивалентное сопротивление достигает максимума, происходит увеличение эквивалентного сопротивления и доли мощности, поступающей в плазму через индуктивный канал. Это объясняет наблюдавшееся экспериментально смещение положения перехода разряда из моды с низкой плотностью плазмы в моду с высокой плотностью и исчезновении гистерезиса. Увеличение за счет вклада мощности через емкостной канал концентрации электронов выше величины, при которой эквивалентное сопротивление достигает максимума, приводит к уменьшению вклада ВЧ мощности в плазму через индуктивный канал. В

связи с этим физически не оправдано принятое в литературе сопоставление мод индуктивного ВЧ разряда с низкой и высокой концентрацией электронов с модами, поддерживаемыми только потенциальными и только вихревыми ВЧ полями.

### **Основные результаты и выводы**

1. Экспериментально показано, что при наличии потерь мощности во внешней цепи индуктивного ВЧ разряда при давлениях менее  $10\text{ мТор}$  существует немонотонная зависимость концентрации электронов от величины внешнего магнитного поля. При работе с торцевой антенной зафиксированы срывы разряда при достижении критического значения магнитного поля. Показано, что величина критического магнитного поля зависит от сопротивления антенны (величины потерь мощности во внешней цепи), давления и мощности ВЧ генератора.
2. На основании математического моделирования разряда, использующего уравнения баланса ионов, электронов, тяжелых нейтральных частиц, мощности и условие квазинейтральности, показано, что указанные эффекты являются следствием самосогласованного перераспределения мощности между активным сопротивлением внешней цепи и плазмой, связанного с изменением ее способности поглощать ВЧ мощность. Последняя характеризуется эквивалентным сопротивлением плазмы. Немонотонный характер изменения эквивалентного сопротивления с увеличением магнитного поля определяется существованием резонансов возбуждения связанных между собой геликоноподобной и косо́й ленгмюровской волн. Выход из условия резонанса сопровождается резким понижением эквивалентного сопротивления плазмы, доли мощности, поступающей в плазму. Последнее может приводить к срыву разряда.
3. Впервые экспериментально показано, что увеличение сопротивления антенны (потерь мощности во внешней цепи) приводит к появлению гистерезиса зависимости интенсивности свечения плазмы, зондового ионного тока насыщения от величины мощности ВЧ генератора. Показано, что в области гистерезиса при одной и той же мощности ВЧ генератора существуют по крайней мере две моды разряда: в моде с низкой концентрацией электронов основная доля мощности выделяется в антенне, а в моде с высокой концентрацией – в плазме. Наложение внешнего магнитного поля (более  $1\text{ мТл}$ ) на индуктивный ВЧ разряд низкого давления способствует появлению гистерезиса зависимости интенсивности свечения плазмы, зондового ионного тока насыщения от величины мощности ВЧ генератора и индукции внешнего магнитного поля. Экспериментальные результаты находятся в качественном

согласии с результатами математического моделирования, которые указывают на появление гистерезиса при условиях нелинейной зависимости эквивалентного сопротивления плазмы от концентрации электронов и его малости по сравнению с сопротивлением антенны.

4. Впервые экспериментально исследовано влияние емкостной составляющей на величину ВЧ мощности, поступающей в плазму через индуктивный канал. Обнаружено, что при наличии независимого емкостного канала ввода мощности происходит изменение доли мощности, поступающей в плазму через индуктивный канал. Это проявляется в смещении положения перехода разряда из моды с низкой плотностью плазмы в моду с высокой плотностью, в более плавной зависимости параметров плазмы от мощности ВЧ генератора в переходной моде, исчезновении гистерезиса, сглаживании зависимости ионного тока от магнитного поля.
5. Впервые выполнено математическое моделирование индуктивного ВЧ разряда с независимой емкостной компонентой, которое показало, что наличие дополнительного канала ввода мощности, сопровождающееся к росту концентрации электронов выше величины, характерной для чисто индуктивного разряда, приводит к увеличению вклада ВЧ мощности через индуктивный канал при условии, что плотность плазмы ниже величины, при которой эквивалентное сопротивление достигает максимума. Это является физической причиной наблюдавшегося экспериментально смещения положения перехода разряда из моды с низкой плотностью плазмы в моду с высокой плотностью, более плавного перехода из моды разряда с низкой плотностью в моду с высокой плотностью и исчезновения гистерезиса. Увеличение за счет вклада мощности через емкостной канал концентрации электронов выше величины, при которой эквивалентное сопротивление достигает максимума, приводит к уменьшению вклада ВЧ мощности через индуктивный канал.

#### **Список публикаций по теме диссертации.**

1. *A.F.Alexandrov, G.E.Bougrov, I.K. Kerimova, S.K. Kondranin, E.A.Kralkina, V.B. Pavlov, V.J. Plaksin, A.A. Rukhadze, K.V. Vavilin.* The Inductive Discharge Plasma Parameters Calculation in Conditions of External Magnetic Field. Proceedings of the 30-th International (Zvenigorod) Conference of Plasma Physics and Controlled Fusion. Zvenigorod, Russia, February 24-28, 2003. Contributed papers, T3.
2. *A.F.Alexandrov, G.E.Bougrov, I.K. Kerimova, S.K. Kondranin, E.A.Kralkina, V.B. Pavlov, V.J. Plaksin, A.A. Rukhadze, K.V. Vavilin.* An Absorption of RF Power by Inductive Discharge Plasma Placed in

External Magnetic Field Experimental Study. Proceedings of the 30-th International (Zvenigorod) Conference of Plasma Physics and Controlled Fusion. Zvenigorod, Russia, February 24-28, 2003. Contributed papers, T4.

3. *A.F.Alexandrov, G.E.Bougrov, I.K. Kerimova, S.K. Kondranin, E.A.Kralkina, V.B. Pavlov, V.J. Plaksin, A.A. Rukhadze, K.V. Vavilin.* Self-consistent model of RF inductive plasma source located in the external magnetic field. Lomonosov Readings, MSU, Physical Faculty, April 18–25, 2003, Annotation, pp. 90–92.
4. *A.F.Alexandrov, G.E.Bougrov, I.K. Kerimova, S.K. Kondranin, E.A.Kralkina, V.B. Pavlov, V.J. Plaksin, A.A. Rukhadze, K.V. Vavilin.* RF discharge at medium and high pressure and its possibilities for material surface modification. III International Symposium Thermo Chemical Processes in Plasma Aerodynamics. St. Petersburg, Russia, July 2003.
5. *А.Ф. Александров, Г.Э. Бугров, К.В. Вавилин И.К. Керимова, С.Г. Кондранин, Е.А. Кралькина, В.Б. Павлов, В.Ю. Плаксин, А.А. Рухадзе.* The Self-Consistent Model of “Helicon” Plasma Source. IV International Conference Plasma Physics and Plasma Technology. Minsk, Belarus, September 15-19, 2003. Contributed papers 1.33.
6. *А.Ф. Александров, Г.Э. Бугров, К.В. Вавилин И.К. Керимова, С.Г. Кондранин, Е.А. Кралькина, В.Б. Павлов, В.Ю. Плаксин, А.А. Рухадзе.* Comparative Analysis of Different Surface Modifications Methods. IV International Conference Plasma Physics and Plasma Technology Minsk, Belarus, September 15-19, 2003. Contributed papers 4.24.
7. *А.Ф. Александров, Г.Э. Бугров, К.В. Вавилин И.К. Керимова, С.Г. Кондранин, Е.А. Кралькина, В.Б. Павлов, В.Ю. Плаксин, А.А. Рухадзе.* The efficiency of RF power lead in low pressure discharge. Russian conference of Physical Electronics Mahachkala, Russia, September 23-26, 2003. Contributed papers, 95-98.
8. *A.F. Aleksandrov, G.E. Bugrov, I.F. Kerimova, S.G. Kondranin, V.B. Pavlov, V.Yu. Plaksin, A.A.Rukhadze, K.V.Vavilin.* Self-consistent model of RF inductive plasma/ion source located in the external magnetic field. Journal of Russian Laser Research, 2003, v.24, No 4, pp. 301-321.
9. *А.Ф.Александров, Г.Э.Бугров, К.В.Вавилин И.К.Керимова, С.Г.Кондранин, Е.А. Кралькина, В.Б.Павлов, В.Ю.Плаксин, А.А.Рухадзе.* Самосогласованная модель ВЧ индуктивного источника плазмы, помещенного во внешнее магнитное поле. *Физика плазмы*, 2004, том 30, №5, стр 434-449.

10. *А.Ф. Александров, Г.Э. Бугров, К.В. Вавилин, И.Ф. Керимова, Е.А. Кралькина, В.Б. Павлов, В.Ю. Плаксин, А.А. Рухадзе.* Исследование индуктивного ВЧ разряда, как самосогласованной системы. I. Особенности, наблюдавшиеся при экспериментальном исследовании индуктивного ВЧ разряда, помещенного во внешнее магнитное поле. Прикладная физика, 2005, №4, стр. 70 – 74.
11. *А.Ф. Александров, Г.Э. Бугров, К.В. Вавилин, И.Ф. Керимова, Е.А. Кралькина, В.Б. Павлов, В.Ю. Плаксин, А.А. Рухадзе.* Исследование индуктивного ВЧ разряда, как самосогласованной системы. II. Исследование параметров плазмы и эффективности поглощения ВЧ мощности плазмой индуктивного ВЧ разряда низкого давления. Прикладная физика, 2005, № 5, стр. 72 – 78.
12. *А.Ф.Александров, Г.Э.Бугров, К.В.Вавилин, И.Ф.Керимова, Е.А. Кралькина, В.Б.Павлов, В.Ю.Плаксин, А.А.Рухадзе, В.П.Савинов.* Исследование индуктивного ВЧ разряда, как самосогласованной системы. III. Исследование влияния емкостной составляющей на параметры плазмы индуктивного ВЧ разряда низкого давления. Прикладная физика, 2006, № 1 стр. 36 – 42.
13. *А.Ф. Александров, Г.Э. Бугров, К.В. Вавилин, И.Ф. Керимова, Е.А. Кралькина, В.Б. Павлов, В.Ю. Плаксин, А.А. Рухадзе.* Исследование индуктивного ВЧ разряда, как самосогласованной системы. IV. Результаты исследования эквивалентного сопротивления индуктивного ВЧ разряда низкого давления без магнитного поля. Прикладная физика, 2006, № 2 стр. 41 – 46.
14. *А.Ф. Александров, Г.Э. Бугров, К.В. Вавилин, И.Ф. Керимова, Е.А. Кралькина, В.Б. Павлов, В.Ю. Плаксин, А.А. Рухадзе.* Исследование индуктивного ВЧ разряда, как самосогласованной системы. V. Результаты исследования эквивалентного сопротивления индуктивного ВЧ разряда низкого давления при наличии внешнего магнитного поля. Прикладная физика, 2006, № 4 стр. 54 – 59.
15. *А.Ф. Александров, Г.Э. Бугров, К.В. Вавилин, И.Ф. Керимова, Е.А. Кралькина, В.Б. Павлов, В.Ю. Плаксин, А.А. Рухадзе.* Исследование индуктивного ВЧ разряда, как самосогласованной системы. VI. Математическое моделирование индуктивного ВЧ разряда (самосогласованная модель). Прикладная физика, 2006, № 5 стр. 33 – 38.
16. *А.Ф. Александров, Г.Э. Бугров, К.В. Вавилин, И.Ф. Керимова, Е.А. Кралькина, В.Б. Павлов, В.Ю. Плаксин, А.А. Рухадзе, В.П. Савинов.* Исследование индуктивного ВЧ разряда, как самосогласованной системы. VII. Математическое моделирование индуктивного ВЧ разряда с емкостной компонентой (самосогласованная модель). Прикладная физика, 2006, № 5 стр. 39 – 46.

17. *A.F. Aleksandrov, I.F. Kerimova, E.A. Kralkina, V.B. Pavlov, A.A. Rukhadze, and V.P. Savinov.* Influence of the capacitive component on the parameters of the low pressure RF inductive discharge. V International Conference Plasma Physics and Plasma Technology. Minsk, Belarus, September 18-22, 2006. Contributed papers v.1 pp.7 – 10
18. *A.F. Aleksandrov, I.F. Kerimova, E.A. Kralkina, V.B. Pavlov, A.A. Rukhadze, and V.P. Savinov.* Study of the histeresis of the RF inductive discharge plasma density dependence on the RF generator power. V International Conference Plasma Physics and Plasma Technology. Minsk, Belarus, September 18-22, 2006. Contributed papers v.1 pp.70 – 73.
19. *A.F. Alexandrov, K.V. Vavilin, I.F. Kerimova, E.A. Kralkina, V.B. Pavlov, A.A. Rukhadze, V.P. Savinov.* The role of the capacitive component in the low pressure RF inductive discharge. XXVIII International Conference on Phenomena in Ionized Gases July 15 - 20 2007, Prague, Czech Republic, 5P09-10.
20. *A.F. Alexandrov, K.V. Vavilin, I.F. Kerimova, E.A. Kralkina, V.B. Pavlov, A.A. Rukhadze, V.P. Savinov.* One more mechanism leading to the hysteresis of the RF inductive discharge transition from low to high density mode. XXVIII International Conference on Phenomena in Ionized Gases July 15 - 20 2007, Prague, Czech Republic, 5P09-11.
21. *А.Ф.Александров, К.В.Вавилин, И.Ф.Керимова, Е.А.Кралькина, В.Б.Павлов, Н.Н.Плахотный, А.А.Рухадзе, В.П.Савинов.* Влияние сопротивления антенны на переход индуктивного ВЧ разряда из моды с низкой концентрацией электронов в моду с высокой концентрацией. Тезисы докладов XXXY Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, с.331, 2008.