

*На правах рукописи*

Визгалов Игорь Викторович

**ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ  
ПРИ ПЛАЗМЕННО-ПОВЕРХНОСТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ**

01.04.08 - физика плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ**  
на соискание ученой степени доктора  
физико-математических наук

Автор



Москва 2017

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

Официальные оппоненты:

Сон Эдуард  
Евгеньевич доктор физико-математических наук, академик РАН, руководитель Научно-исследовательского Центра электрофизических и теплофизических процессов Объединённого института высоких температур РАН;

Метель Александр  
Сергеевич доктор физико-математических наук, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»;

Завьялов Михаил  
Александрович доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник ФГУП "Всероссийский электротехнический институт им. В.И. Ленина".

Ведущая организация: Институт Общей Физики РАН им. А.М. Прохорова.

Защита состоится «25» апреля 2018 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.130.05 на базе Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» по адресу: 115409 Москва, Каширское шоссе, д. 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» и на сайте:  
<http://ods.mephi.ru>.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Учёный секретарь диссертационного совета Д 212.130.05, д.ф.-м.н.



Р.С. Стариков

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность работы

Взаимодействие плазмы с контактной поверхностью электродов и стенок является важнейшим аспектом физики газовых разрядов и плазмы, поскольку в лабораторных условиях плазма, как правило, генерируется с помощью электрических разрядов в газах или парах конденсированного вещества и ограничена контактной поверхностью стенок или электродов. Плазменно-поверхностное взаимодействие (ППВ) изучается уже много лет и выделилось в самостоятельный раздел физики плазмы. При решении фундаментальных и прикладных задач, связанных с ППВ используются модельные представления и методы, развитые во многих разделах современной физики, таких как физика плазмы и физика твердого тела, радиационная и химическая физика. Вопросы, связанные с плазменно-поверхностным обменом энергией, импульсом, веществом и электрическими зарядами, имеют принципиальное значение для таких областей физики плазмы как термоядерные [1, 2] и аэро-космические исследования [3], плазменная электроника [4] и плазменные технологии [5,6].

Структура и динамика дебаевских слоев объемного заряда (СОЗ), возникающих при контакте плазмы с поверхностью конденсированного вещества, является предметом особенно интенсивных исследований, поскольку именно они в значительной мере определяют работу газоразрядных устройств, а также влияют на энергетические спектры падающих на поверхность ионов и эрозионные процессы на контактной поверхности. Широкий диапазон экспериментальных условий и синэргетика многих нелинейных процессов в плазме, в контактирующем с ней конденсированном веществе и граничных СОЗ приводят к большому многообразию взаимосвязанных эффектов на границе плазмы и твердого тела - в плазменно-поверхностном контакте (ППК).

При рассмотрении ППВ в изначально стационарных условиях обычно предполагается, что между плазмой и поверхностью также устанавливается некоторое равновесное и стационарное распределение электрического потенциала. Для электродной системы плазменно-поверхностные обменные процессы в значительной мере определяют вольт-амперную характеристику (ВАХ) контактных слоев, обычно нелинейную. Зондовая методика диагностики плазмы, как правило, опирается на ВАХ именно контактного слоя для поверхности зонда [7].

Падение потенциала в контактных слоях и соответствующие им токи задаются как параметрами плазмы и свойствами контактной поверхности, так и внешней частью замкнутой цепи, включающей источники электродвижущей силы (ЭДС), резисторы, фильтры с конденсаторами и индуктивностями.

Довольно часто экспериментальные условия складываются таким образом, что распределение потенциала между плазмой и контактной поверхностью оказывается неустойчивым. При этом параметры плазмы, контактной поверхности и электрического поля в СОЗ претерпевают быстрые переходы между различными устойчивыми состояниями или возникают автоколебания. Причем, в возбуждаемых автоколебаниях могут наблюдаться неустойчивые предельные циклы. Такие неустойчивости обычно связаны с особенностями эмиссионных характеристик контактных поверхностей.

В литературе основное внимание уделяется исследованию вторичной эмиссии холодных катодов в газовых разрядах под действием потоков ионов, быстрых и метастабильных нейтральных частиц, а также в результате фотоэмиссии [8]. ВАХ разряда с учетом этих типов эмиссии имеет монотонный растущий вид, подавляющий развитие флуктуаций в разрядной цепи. Однако при достижении некоторой предельной плотности ионного тока может возникать термоэмиссионная неустойчивость с появлением участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС) на ВАХ, что сопровождается дугообразованием и филаментацией плазменного канала. Исследованию этих процессов посвящена обширная литература.

Вторичная электрон-электронная эмиссия (ВЭЭЭ) катодов обычно не рассматривается, поскольку в стационарных условиях количество высокоэнергетичных электронов в плазменном канале разряда, которые могут преодолеть тормозящее поле в прикатодном слое и вызвать вторичную эмиссию, пренебрежимо мало. При проведении зондовых измерений ВЭЭЭ приводит к существенным затруднениям при интерпретации ВАХ и должна отсутствовать, либо подавлена. В высокочастотных разрядах ВЭЭЭ играет определенную роль, обычно отрицательную. Например, мультипакторные разряды нарушают нормальную работу высокочастотных ускорителей, перегружают ВЧ генераторы, ухудшают их согласование, перегревают электроды и фидерные линии.

В диссертации показывается, что в плазменно-физических системах с источниками питания постоянного тока при определенных условиях может развиваться автоколебательная высокочастотная

неустойчивость по механизму ВЭЭЭ. При этом ВЧ автоколебания изменяют весь комплекс обменных процессов плазменно-поверхностного взаимодействия и могут играть принципиальную роль в технологических разрядных системах низкого давления, а также в мощных плазменных установках, например, в периферийной плазме токамака.

### **Цели работы**

1. Исследовать механизмы положительной обратной связи, ответственные за генерацию электромагнитных колебаний при неустойчивом плазменно-поверхностном взаимодействии по вторично-эмиссионному механизму.

2. Определить условия перехода от устойчивого режима протекания тока между плазмой и контактной поверхностью к неустойчивому режиму.

3. Экспериментально реализовать автоколебательные режимы для верификации предлагаемых физических механизмов и математических моделей развития вторично-эмиссионной неустойчивости.

4. Сформулировать базовые принципы методов подавления вторично-эмиссионной неустойчивости.

5. Предложить направления практического использования вторично-эмиссионной неустойчивости.

**Для достижения поставленной цели решены следующие задачи.**

1. Разработаны специализированные коллекторные и диагностические системы для возбуждения и наблюдения автоколебательной неустойчивости плазменно-поверхностного взаимодействия по вторично-эмиссионному механизму при образовании на контактной поверхности тонких диэлектрических покрытий.

2. На основе представления плазменно-поверхностного контакта как динамической системы разработаны основы математической модели автоколебательной неустойчивости плазменно-поверхностного контакта, которая положена в основу описания переходов от устойчивого к неустойчивому режиму взаимодействия.

3. На основе линеаризованной модели разработана параметрическая диаграмма устойчивости протекания тока через плазменно-поверхностный контакт с повышенной вторично-эмиссионной способностью. На диаграмме определены сепаратрисы бифуркационных переходов между различными состояниями динамической системы.

Сформулированы принципы стабилизации неустойчивости и управления параметрами электромагнитных автоколебаний.

4. Проведена систематизация наблюдаемых устойчивых и автоколебательных состояний в согласии с разработанной диаграммой устойчивости. Показано, что при развитии вторично-эмиссионной неустойчивости наиболее характерен релаксационный тип автоколебаний.

5. Проведено численное моделирование основных типов автоколебаний с учетом нелинейного ограничения амплитуды на участках ВАХ с положительным дифференциальным сопротивлением.

6. Экспериментально выявлены режимы возникновения высоковольтных релаксационных и хаотических автоколебаний.

7. Предложена модель индуцированной потери эмиссионной пленкой диэлектрических свойств при повышенной мощности радиационного воздействия со стороны плазмы на контактную поверхность.

8. Предложены и реализованы автоколебательные методы нагрева и ускорения плазменных и ионных потоков.

9. Исследованы условия возбуждения вторично-эмиссионной неустойчивости в униполярном режиме без внешнего источника ЭДС в цепи контактной поверхности.

10. Выявлены закономерности диспергирования контактной поверхности и мобилизации пылевых частиц в условиях развития вторично-эмиссионной автоколебательной неустойчивости.

**Научная новизна результатов работы заключается в следующем.**

1. Экспериментально обнаружена высокочастотная вторично-эмиссионная неустойчивость при взаимодействии неравновесной плазмы с высокоэмиссионной поверхностью в присутствии тонких диэлектрических слоев.

2. Разработаны физические основы нового типа газового разряда низкого давления с повышенной удельной мощностью – автоколебательного вторично-эмиссионного разряда (АВЭР). Он сопровождается автогенерацией мощных электромагнитных колебаний в разрядной цепи и сочетает свойства пучково-плазменного и высокочастотного разрядов. АВЭР использует только источники питания постоянного тока, для его поддержания не требуются ВЧ фидеры и устройства согласования. АВЭР может быть реализован в несамостоятельном или самостоятельном режимах.

3. Впервые проведена систематизация устойчивых и неустойчивых по зарядовому обмену состояний плазменно-поверхностного контакта. Предложена диаграмма устойчивости плазменно-поверхностного контакта с повышенной вторично-эмиссионной способностью, обладающей N-образной вольт-амперной характеристикой.

4. Впервые получена и исследована самостоятельная сильноточная форма высокочастотного автоколебательного разряда с возбуждением геликонных автоколебаний. Они возбуждаются внутри охлаждаемого металлического резонатора без внешнего источника ВЧ мощности, антенных и фидерных систем.

5. Впервые экспериментально показано, что контактная поверхность в автоколебательном режиме взаимодействия с плазмой может приобретать мгновенный потенциал, в сотни и тысячи раз превышающий стационарный плавающий потенциал.

6. Предсказана и экспериментально продемонстрирована возможность возбуждения за счет энергии неравновесного плазменного потока автоколебаний в униполярном автоколебательном вторично-эмиссионном разряде (УАВЭР) без внешнего источника ЭДС.

7. Показано, что в режиме АВЭР выход вторично-эмиссионных электронов усиливается многократно по сравнению со стационарным режимом катода в тлеющих разрядах, поскольку в низковольтной фазе автоколебаний его эмиссия определяется не только ион-электронной, но и энергетически более эффективной электрон-электронной эмиссией.

8. Показано, что переход плазменно-поверхностного взаимодействия в автоколебательный режим приводит к повышению уровня распыления, увеличению глубины внедрения ионов и атомов отдачи, усилению импульсного нагрева как плазмы, так и контактной поверхности.

9. Показано, что АВЭР может приводить к возникновению вторичных паразитных ВЧ-разрядов в тневых областях установки, в том числе в униполярном режиме.

### **Практическая ценность результатов работы**

1. Обнаружен, описан и исследован новый тип разряда низкого давления с повышенной удельной мощностью - АВЭР, который может быть реализован в режиме несамостоятельного или самостоятельного разряда. АВЭР использует только источники питания постоянного тока, но сочетает свойства разрядов с постоянным, высокочастотным и частотно-

импульсным питанием, что расширяет возможности его практического использования по сравнению с обычными пучково-плазменными разрядами-

2. АВЭР может выступать в качестве генератора высоковольтных релаксационных импульсов с крутыми фронтами, а также генератора мощных высокочастотных электромагнитных автоколебаний широкого диапазона перестраиваемых частот для внешней нагрузки, в том числе для резонансного ускорения ионов и для возбуждения вторичных разрядов.

3. АВЭР позволяет объединить в одном устройстве газоразрядную камеру с импульсной или резонансной ускорительной системами для получения высокоэнергетических ионных потоков применительно к портативным имплантерам и нейтронным генераторам.

4. Высокоэффективные генераторы плазмы на основе геликонного АВЭР позволяют создавать производительные устройства для ионно-плазменной технологии и плазменных ракетных двигателей, значительно упростив конструкцию и подняв удельную мощность геликонного разряда по сравнению с антенным методом введения ВЧ мощности от внешнего источника.

5. Плазменно-пучковые разряды с возможностью перехода к автоколебательным режимам могут использоваться в качестве имитатора пристеночной плазмы в термоядерных реакторах с магнитным удержанием. Они позволяют изучать не только внедрение атомных частиц и эрозию контактной поверхности при облучении интенсивными ионными потоками с широким энергетическим спектром, но и аномальные переносы в плазменном канале, связанные с бифуркационными переходами между состояниями плазменно-поверхностной динамической системы.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Плазменно-поверхностный контакт при наличии надтепловой электронной группы и высокой вторично-электронной эмиссионной способности переходит в режим неустойчивого зарядового обмена с генерацией высокочастотных электромагнитных колебаний в контактной цепи.

2. В основе механизма высокой скорости обратной связи при возбуждении вторично-эмиссионной неустойчивости плазменно-поверхностного контакта лежат инжекционно-эмиссионные процессы в туннельно-тонкой диэлектрической пленке на проводящей контактной поверхности.



3. Анализ устойчивости плазменно-поверхностной контактной системы с N-образной ВАХ по вторично-эмиссионному механизму может быть проведен на основе представлений об эквивалентной замкнутой цепи с источниками ЭДС, активными и реактивными сопротивлениями.

4. Методы численного моделирования позволяют воспроизводить основные амплитудно-частотные характеристики экспериментально наблюдаемых автоколебаний.

5. В процессе развития неустойчивости плазменно-поверхностного контакта самосогласованным образом изменяются параметры контактной плазмы, что создает условия для возникновения инерционной нелинейности с переходом в режим генерации хаотических автоколебаний.

6. Автоколебательная неустойчивость изменяет весь комплекс энерго-массового обмена, включая внедрение в контактную поверхность ионов с широким энергетическим спектром, ее распыление, тепловые нагрузки, электродиспергирование.

7. При повышении разрядной мощности срыв генерации автоколебаний может происходить не по механизму образования перегретых катодных точек и дугообразования с резким падением напряжения и ростом тока, а по механизму генерации высоковольтных импульсов напряжения. В его основе лежит кратковременный и обратимый процесс потери поверхностной диэлектрической пленкой высокой вторично-эмиссионной способности.

8. Положение о том, что автоколебательный вторично-эмиссионный разряд является особой формой самостоятельного сильноточного разряда низкого давления.

9. Пучково-плазменный разряд представляет наиболее широкие возможности для экспериментального моделирования переходов между устойчивыми и неустойчивыми состояниями плазменно-поверхностного контакта по сравнению с другими типами разрядов низкого давления.

## **Апробация работы**

Результаты работы были представлены на следующих Международных и Российских конференциях.

11 Всесоюзный семинар по физике и технике интенсивных источников ионов и ионных пучков ( Киев, 1991), 8 Всесоюзная конференция по низкотемпературной плазме (Минск, 1991), 20<sup>th</sup> International Conference on Phenomena in Ionized Gases, Piza (Italy 1991), 18<sup>th</sup> European Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics ( Berlin 1991), 22<sup>nd</sup> European Conf. on

Controlled Fusion and Plasma Physics (Bournemouth,1995), 4<sup>th</sup> Japan-CIS workshop on interaction of fuel particles with fusion materials (IFPFM-4) (Obninsk, Russia 1995), 8 Всероссийская Конференция по физике газового разряда (Рязань, 1996), 23<sup>rd</sup> Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics (Kiev, 1996), XXII International conf. On phenomena in Ionized Gases (Toulouse, France, 1997), XXVII Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС (2000 г.), XI конференция по физике газового разряда (Рязань 2002), XXX Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС (2003), 30<sup>th</sup> EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics (St Petersburg, Russia 2003), XVI Международная конференция "Взаимодействие ионов с поверхностью (Звенигород, ВИП-2003)", IV Российский семинар "Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды" (Москва, МИФИ 2003), 16<sup>th</sup> Intern.Conf. on plasma-surface interaction in fusion devices ( PSI16, 2004), 31 Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС(2004), XI Всероссийская конференция по диагностике высокотемпературной плазмы (Троицк. 2005), 17<sup>th</sup> Inter. Conf. Ion-Surface Interactions (ISI-2005), 28<sup>th</sup> International Conference on Phenomena in Ionized Gases (Prague, Czech Republic 2007), 14 Научно-техническая конференция «Вакуумная наука и техника»(Судак 2007), 34 Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС ( 2007), International Conference on Plasma Physics (Fukuoka, Japan, 2008), Международная конференция "Физика высокочастотных разрядов" (Казань 2011), XXМеждународная конференция "Взаимодействие ионов с поверхностью"(Звенигород 2011), Всероссийская конференция по физике высокотемпературной плазмы ДВП-14 (Звенигород, 2011), 20<sup>th</sup> International Conference on Plasma Surface interaction (2012, Aachen, Germany), XXXIX Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС(2012), 39<sup>th</sup> EPS Conference & 16<sup>th</sup> Int. Congress on Plasma Physics (Stockholm, Sweden, 2012), XVI конференция «Взаимодействие плазмы с поверхностью»(2013), Всероссийская конференция "Физика низкотемпературной плазмы" (Казань, 2014), International Conference on Plasma Surface Interaction (Japan, 2014), XLI Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС (2014), XXII Международная конференция "Взаимодействие ионов с поверхностью (ВИП-2015)", XLIII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС (2016).

## **Личный вклад автора**

Автором поставлены и выполнены с его участием все представленные в диссертации экспериментальные работы, проведены все теоретические и методические разработки по интерпретации экспериментальных результатов, сформулированы и экспериментально опробованы предложения по практическому использованию автоколебательных разрядных режимов.

## **Достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных результатов подтверждается экспериментальными наблюдениями неустойчивых режимов плазменно-поверхностного взаимодействия и соответствием наблюдаемых характеристик автоколебаний (переменных токов и напряжений, фазовых траекторий, фурье-спектров) численным расчетам на основе теоретических моделей. Изменение внешних управляющих параметров приводит к прогнозируемому переходу от стационарного состояния плазменно-поверхностного контакта к его неустойчивому состоянию с предсказуемой топологией фазовых траекторий.

## **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 97 работ, в том числе 29 статей в рецензируемых научных журналах, входящих в Перечень ВАК и в базы WEB of Science, Scopus.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 317 страницах, содержит 83 рисунка и список литературы из 199 наименований.

## **Краткое содержание диссертации**

**Во введении** обсуждается актуальность проблемы неустойчивости протекания тока через контакт между неравновесной плазмой и материальной поверхностью с повышенной вторично-эмиссионной способностью. Рассматриваются ее принципиальные отличия от эмиссионных неустойчивостей, связанных с ростом термоэмиссии при перегреве контактной поверхности и лежащих в основе дуговых неустойчивостей. Отмечается, что термо- и вторично-эмиссионные

неустойчивости имеют участки ВАХ с отрицательным дифференциальным сопротивлением  $dU/dI$  (ОДС), приводящие, соответственно, к *S*- и *N*-образным ВАХ.

При графическом изображении ВАХ газовых разрядов по абсциссе обычно откладывают ток, поскольку, как правило, ВАХ разряда неоднозначна по напряжению и однозначна по току. Здесь и далее считается, что в графическом представлении ВАХ ППК напряжение является аргументом и откладывается по оси абсцисс, а ток как функция - по оси ординат. Такое расположение осей принято в зондовой диагностике и при описании работы электронных приборов. Соответственно, неоднозначные по напряжению ВАХ имеют *S*-образный вид, присущий многим газоразрядным устройствам, таким как дуговые плазмотроны, разрядники и тиратроны.

Термоэмиссионные неустойчивости с *S*-образной формой ВАХ в силу инерционности нагрева материальной поверхности имеют относительно низкую скорость обратной связи на падающем участке ВАХ. Напротив, рассматриваемая в работе неустойчивость с *N*-образной ВАХ имеет очень высокую скорость обратной связи, поскольку в ее основе лежит малоинерционная ВЭЭЭ. Она проявляется при относительно низких температурах контактной поверхности по сравнению с первой. Таким образом, условия возникновения и характер проявления неустойчивостей с *S*- и *N*-образными ВАХ совершенно отличны. В то время как эффектам, связанным с термоэмиссионной неустойчивостью и взрывоэмиссионным явлениям, посвящена обширная литература, например, [1,8,9], неустойчивость по механизму ВЭЭЭ в до настоящего времени исследовалась, в основном, в связи с мультипакторными разрядами, нарушающими работу ускорительных структур в условиях высокого вакуума и наличия мощного внешнего ВЧ источника питания [10,11]. Тем не менее, вторично-эмиссионная неустойчивость (ВЭН) в автоколебательном режиме при постоянном источнике смещения (АВЭН) способна в значительной степени изменять все параметры плазменно-поверхностного взаимодействия и может выступать в качестве триггерного механизма для развития глобальных неустойчивых режимов в крупных плазменно-физических системах. Вопросы практического использования этого типа неустойчивости в научной литературе не освещались.

В основе рассматриваемой неустойчивости ППК между сильнонеравновесной плазмой и поверхностью с повышенной вторично-эмиссионной способностью. Под сильной неравновесностью плазмы понимается не просто превышение электронной температуры над ионной, а наличие в функции распределения электронов по энергии (ФРЭЭ)

высокоэнергетичной группы с характерной энергией, превышающей 50 эВ. Электроны с такой энергией способны вызывать ВЭЭЭ с коэффициентом  $\sigma > 1$ . Отметим, что ВЭЭЭ может играть заметную роль только в разрядах низкого давления, когда СОЗ можно считать бесстолкновительным. В данной работе вторично-эмиссионная способность ППК считается повышенной, если его ВАХ становится немонотонной по напряжению (неоднозначной по току), приобретая N-образный характер. Таким образом, рассматриваемые неустойчивые взаимодействия в ППК дополняют термоэмиссионные неустойчивости, лежащие в основе дуговых эффектов при возникновении S-образной ВАХ с неоднозначным характером по напряжению.

**В первой главе** рассмотрено современное состояние исследований по электронной эмиссии и холодным катодам с повышенной вторично-эмиссионной способностью применительно к газовым разрядам низкого давления. Обсуждаются представления о механизмах повышенной вторичной электронной эмиссии в присутствии тонких диэлектрических слоев и диэлектрических включений на контактной поверхности, их влияние на электрическую прочность ускорительных и разрядных межэлектродных зазоров. Отмечается, что эффект аномальной электронной эмиссии Молтера, обладающий большим последствием (десятки и сотни секунд) в его классической интерпретации не может объяснить наблюдаемую высокочастотную автогенерацию при развитии вторично-эмиссионной неустойчивости, когда наблюдаемое характерное время обратной связи составляет менее 5нс. Описаны физические условия и процессы, приводящие к появлению N-образной ВАХ плазменно-поверхностного контакта, рассматриваются различные механизмы увеличения выхода вторично-эмиссионных электронов в тонкопленочных диэлектрических структурах с учетом зонной структуры, полевого усиления эмиссии, эффекта “горячих” электронов.

Отмечается, что условия для возникновения высокочастотной автоколебательной вторично-эмиссионной неустойчивости могут проявляться в самых разнообразных экспериментальных ситуациях, когда в неравновесной плазме газового разряда низкого давления присутствует достаточно высокоэнергетичная группа электронов. Такие группы электронов могут появляться в разных типах тлеющего разряда (высоковольтных, магнетронных, пеннинговских, с полым катодом), в высокочастотных разрядах, в пучково-плазменных разрядах, в некоторых типах плазменных двигателей и ускорителей заряженных частиц.

Особенно существенное влияние рассматриваемая неустойчивость может иметь в периферийной плазме магнитных систем удержания горячей

плазмы. Все необходимые условия для ее развития возникают благодаря следующим факторам:

а) широкому применению материалов, образующих прочные высокоэмиссионные по вторичному механизму оксидные пленки;

б) присутствию в контактной плазме высокоэнергетичных (надтепловых) электронов;

в) значительной локальной неамбиполярности токов в периферийной зоне контакта плазмы с материальной поверхностью.

ППР с отрицательно смещенной коллекторной пластиной представляет собой наиболее удобную модельную физическую систему для изучения неустойчивого токового обмена в ППК с повышенной вторично-эмиссионной способностью. Пучково-плазменная разрядная система способна выходить как на режимы дугообразования и филаментации токового канала с S-образной ВАХ контактной поверхности, так и на высокочастотную неустойчивость по вторично-эмиссионному механизму при N-образной ВАХ. Такие режимы достаточно просто реализуются на пучково-плазменной установке ПР-2.

В первой главе наиболее подробно рассмотрены физические процессы в пучково-плазменных разрядах. Это связано с тем, что ППП представляет основной способ генерации неравновесной плазмы на экспериментальной установке ПР-2. Кроме того, коллективное взаимодействие модулированных электронных пучков, инжектируемых контактной поверхностью в плазму, составляет главный механизм ее дополнительного нагрева и изменения параметров в процессе развития вторично-эмиссионной неустойчивости. Как будет показано, неустойчивое плазменно-поверхностное взаимодействие может приводить к возникновению самостоятельного автоколебательного разряда, поддерживающегося без первичного электронного пучка. Обсуждаются также некоторые области применения ППП, в которых могут использоваться и автоколебательные режимы.

В иерархии характерных времен и частот различных механизмов пучково-плазменного взаимодействия в разрядном канале и эмиссионных процессов на контактной поверхности, влияющих на обратные связи в развитии неустойчивости токового обмена, можно выделить следующие процессы. К самым быстрым процессам порядка  $10^{-13}$  с следует отнести выход вторичных электронов из приповерхностного контактирующего с плазмой слоя конденсированного вещества. Прохождение электронами СОЗ между плазмой и поверхностью составляет порядка  $10^{-10}$  -  $10^{-11}$  с. Плазменные колебания в разрядном канале – порядка  $10^{-10}$  с. Характерное время продольного пролета плазменного канала надтепловыми

электронами, способными вызвать вторичную эмиссию, –  $10^{-7}$  с. Ионное время пролета канала составляет характерное время запаздывания изменения плотности плазмы перед контактом в ответ на инжекцию в плазму эмиссионных электронов и по порядку величины соответствует  $10^{-5}$  с. К еще более медленным процессам, участвующим в обратной связи, следует отнести нагрев и остывание контактной поверхности, а также газодинамические процессы, связанные с перераспределением плотности рабочего газа при усилении или ослаблении ионного потока через диафрагмы дифференциальной откачки (миллисекунды - секунды). Осаждение и распыление поверхностных покрытий, изменяющих эмиссионные свойства контактной поверхности, также можно отнести к медленным процессам.

**Во второй главе** описываются экспериментальная установка с пучково-плазменным разрядом (ППР) в продольном магнитном поле ПР-2 и средства диагностики, использованные в экспериментах. Схема установки представлена на рисунке 1.

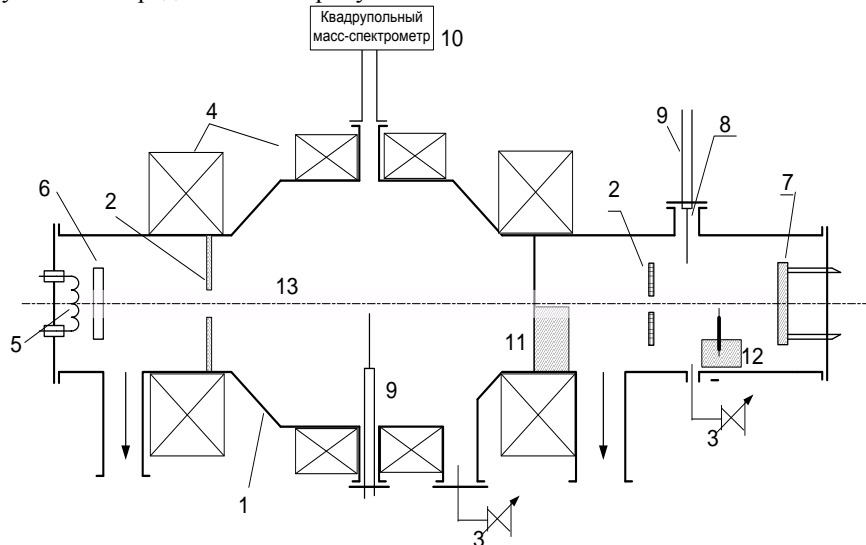


Рисунок 1- Схема установки ПР-2:

1– Вакуумная камера, 2– Диафрагмы, 3– Система газонапуска, 4– Катушки магнитного поля, 5– Катод , 6– Анод, 7– Коллекторное устройство, 8– Шлюзовое устройство №1, 9– Ленгмюровский зонд, 10– Шлюзовое устройство №2, 11– Масс анализатор, 12- Сканирующий зонд Ленгмюра, 13– Плазменный шнур.

В настоящее время ПР-2 используется в основном в качестве генератора плазменных потоков при моделировании особенностей плазменно-поверхностного взаимодействия в периферийной зоне токамаков. На ней можно проводить исследования поведения материалов при интенсивном ионном и электронном облучении, при высоких тепловых нагрузках. Поэтому она оснащена не только мощной электронной пушкой, но и набором охлаждаемых коллекторных устройств с возможностью установки под облучение плазменным потоком образцов различных материалов. Коллекторные устройства имеют высоковольтные керамические и фторопластовые изоляторы для подачи смещения, за счет чего можно изменять энергию ионной бомбардировки.

Основным способом генерации продольного плазменного потока является ППР с автономным режимом работы электронной пушки. В некоторых случаях может использоваться плазменный режим пушки, когда вблизи поверхности термокатода формируется плазменный анод.

Иногда этот режим называют дугой низкого давления с накаливаемым (интегрально горячим) катодом. Этот режим характеризуется большим эмиссионным током (десятки и сотни ампер) и малым ускоряющим напряжением (десятки вольт).

**В третьей главе** рассмотрены основные определения и методы исследования динамических автоколебательных систем, развитые в рамках радиофизики для описания поведения цепей, содержащих нелинейные элементы с N-образной ВАХ [12,13]. Эти методы применены для анализа поведения упрощенной модели динамической системы ППК, включая условия потери устойчивости протекания тока и возбуждения автоколебаний.

Для такого анализа удобно выделить внешнюю и внутреннюю части замкнутой электрической цепи. Во внешней части могут содержаться источники ЭДС, специально устанавливаемые сосредоточенные активные и реактивные элементы, а также паразитные распределенные реактивные и активные компоненты. Внутренняя часть цепи содержит плазменно-поверхностные контакты и плазменный канал, которые сводятся к нелинейным активным и реактивным сопротивлениям.

На рисунке 2 в упрощенном виде показаны два типа ППК, на ВАХ которых имеются участки отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС). Нелинейное сопротивление  $R_S$  соответствует контактной поверхности с термоэмиссионной неустойчивостью и S-образной ВАХ,  $R_N$  соответствует режиму вторично-эмиссионной неустойчивости и N-образной ВАХ.



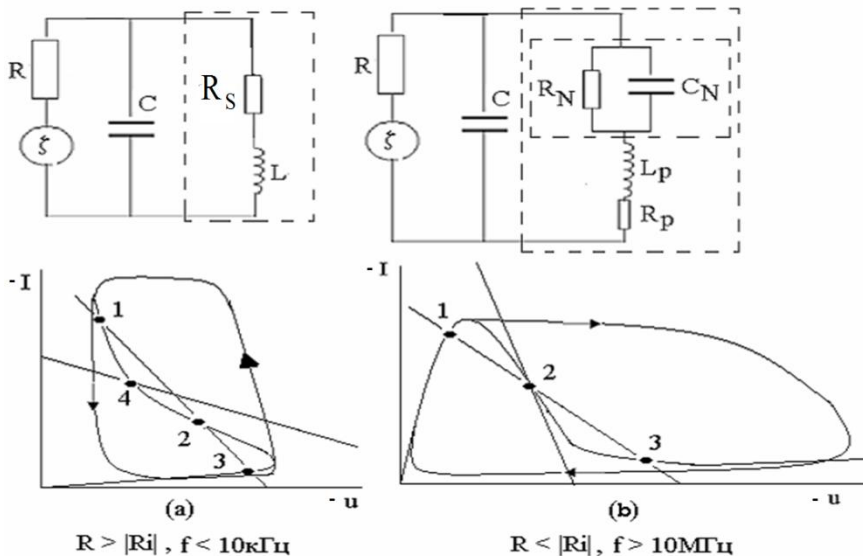


Рисунок 2 - Два принципиально разных типа неустойчивости зарядового обмена плазменно-поверхностного контакта с S- и N-образными ВАХ. Отрезки прямых - нагрузочные характеристики источника смещения ( $\xi$ ,  $R$  - его ЭДС и выходное сопротивление,  $R_i = dU/dI$  - дифференциальное сопротивление в особой точке), замкнутые кривые - фазовые траектории. Стрелкой указано направление перемещения изображающей точки фазовой траектории.

а) с термоэмиссионным механизмом неустойчивости и S-образной ВАХ, соответствующей нелинейному сопротивлению  $R_S(u)$ ,  $L$  - индуктивность цепи; 1,3 - устойчивые и 2 - неустойчивая рабочие точки, точка 4 может быть устойчивой и неустойчивой.

б) со вторично-эмиссионным механизмом неустойчивости и N-образной ВАХ, с соответствующим нелинейными сопротивлением  $R_N(u)$  и емкостью плазменного поверхностного слоя  $C_N(u)$ ,  $L_P$ ,  $R_P$  - суммарные индуктивность и сопротивление плазменного канала и внешней части ВЧ-цепи; точка 2 может быть устойчивой и неустойчивой, 1,3 - устойчивые рабочие точки.

Для последней принципиальным является необходимость введения в модель емкости  $C_N$ , шунтирующей  $R_N$  по высокой частоте, поскольку скорость обратной связи по ВЭЭЭ на много порядков превышает скорость развития термоэмиссионной неустойчивости, и могут возбуждаться очень высокочастотные автоколебания (сотни МГц). Разумеется, плазменный канал имеет и второй контакт с материальной поверхностью, а замкнутый

токовый контур может иметь и внешние элементы цепи. Динамическая система в упрощенной схеме получает энергию от источника ЭДС  $\zeta$ , ее диссипация происходит в активных сопротивлениях.

Анализ колебаний тока и напряжения в ППК удобно проводить с помощью графического представления траектории на фазовой плоскости [12]. Первый тип ППК с S-образной ВАХ может работать как ключевой элемент (переход между точками 3 и 1). Генерация автоколебаний возможна вокруг рабочей точки типа 4. Она не может быть ни высокочастотной (в силу тепловой инерции контактного пятна), ни энергетически эффективной (в силу больших потерь на нагрев сопротивления  $R$ ). Совершенно другая ситуация возникает при первичном анализе второго типа ВАХ с ОДС. Генерация автоколебаний вокруг рабочей точки может быть и высокочастотной, и высоковольтной, и энергетически высокоэффективной. Плазменный канал (разрядный шнур) в пределе небольших частот проявляет в основном активные и индуктивные свойства. При повышении частот автогенерации он также может проявлять свойства резонатора с распределенными свойствами, а к чисто электромагнитной индуктивности может добавляться инерционность электронного компонента. В диапазоне очень высоких частот СВЧ диапазона плазменно-поверхностный контакт проявляет свойства нелинейного элемента с распределенными активными и реактивными параметрами, включая индуктивные.

В третьей главе приводится описание простейшей математической модели вторично-эмиссионной плазменно-поверхностной неустойчивости, результаты численных расчетов осциллограмм токов, напряжений и соответствующих фазовых траекторий для ВЧ-автоколебательных режимов взаимодействия коллекторной пластины с разрядным каналом ППК.

На первом этапе рассмотрения модели считается, что мгновенная ВАХ контакта не изменяется с развитием неустойчивости, в частности, не зависит от ее предыстории, т.е. определяется исключительно параметрами первичного ППК и энергетическими зависимостями коэффициентов вторичной эмиссии. Приводится модельное интегральное выражение для расчета мгновенной N-образной ВАХ, которое качественно правильно отражает появление участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Физический прототип такой динамической системы - дифференциальный коллектор, когда в заземленном малоэмиссионном коллекторе-диафрагме имеется небольшое отверстие с расположенным за ним высокоэмиссионным торцевым зондом. Влиянием зонда на основной

ППР в средней части установки между диафрагмами и поток частиц на ППК в первом приближении можно пренебречь.

В расчетной эквивалентной схеме ППК с N-образной ВАХ по сравнению с рисунком 2б пренебрегается выходной емкостью источника питания, а также сопротивлением и индуктивностью плазменного шнура. Упрощение связано с предположением, что все особенности протекания тока через плазму и два контакта с поверхностью сводятся к общей нелинейной мгновенной ВАХ, описываемой нелинейным сопротивлением  $R_N(U)$  (описывает конвективный перенос зарядов через ППК) и нелинейной емкости  $C_N(U)$  (учитывает только токи смещения). Это позволяет на первом этапе оставить только две динамические переменные и проводить анализ поведения системы на двумерной фазовой плоскости  $(U, I)$ . В более сложных моделях характеристики контактов и плазменного канала следует учитывать отдельно. Это, разумеется, увеличивает количество динамических переменных, значительно усложняя анализ устойчивости и расчеты эволюции динамической системы.

Для описания разрядной цепи необходимо также ввести индуктивность  $L$ ,  $\zeta$  - источник ЭДС и некоторое эффективное сопротивление  $R$ , представляющее сумму внутреннего сопротивления источника питания и внешней индуктивности а, при необходимости, и специально введенного сопротивления нагрузки или балласта. При проведении экспериментов все эти параметры могут изменяться и подбираться в широких пределах.

Обобщенные внутренние характеристики ППК  $R_N(U)$ ,  $C_N(U)$  могут изменяться косвенным образом через параметры первичного пучка, состав и плотность рабочего газа, конструкцию коллекторного узла и материал контактной поверхности. Определенную роль на их косвенную регулировку может оказывать магнитное поле - улучшение поперечного удержания увеличивает плотность плазмы ППР, влияя на  $I_N(U)$  и  $C_N(U)$ .

Динамические переменные  $I(t)$  и  $U(t)$  и их производные связаны уравнениями Кирхгофа для полного напряжения замкнутой цепи и точки ветвления тока:

$$\zeta = U + IR + L \frac{dI}{dt}, \quad (1)$$

$$I = I_N(U) + \varepsilon_0 \frac{dE}{dt} S, \quad (2)$$

Через произведение  $\varepsilon_0 ES$  выражен поверхностный заряд на обращенной к плазме поверхности. Пренебрегая вихревой составляющей

электрического поля, которая становится заметной только в СВЧ диапазоне частот, связь между  $E$  и  $U$  можно найти, используя уравнение Пуассона.

Если принять для упрощения, что положительный потенциал плазменного канала имеет малую величину по сравнению со смещением контактной поверхности,  $dE/dt$  можно связать с измеряемой величиной  $dU/dt$ . Поменяв для удобства знаки токов и напряжений, чтобы перевести  $N$ -образную часть ВАХ и нагрузочную характеристику источника питания в первый квадрант переменных  $(U, I)$ , систему уравнений (1-2), можно преобразовать к виду:

$$\frac{dU}{dt} = B \cdot (U)^{\frac{3}{4}} \cdot (I - I_N(U)), \quad (3)$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{\zeta - U - IR}{L}, \quad (4)$$

$$B = 0.8 \cdot 10^{10} \cdot M^{\frac{-1}{4}} \cdot S^{-1} \cdot J_+^{\frac{-1}{2}}, \quad (5)$$

где  $M$ -масса иона в а.е.,  $J_+$  - плотность ионного тока насыщения в  $A/cm^2$ ,  $S$ -площадь контактной поверхности в  $cm^2$ .

Размерный коэффициент скорости нарастания потенциала поверхности  $B$  включает фундаментальные константы и выражается через непосредственно измеряемые величины, в значительной мере определяющие основные особенности плазменно-поверхностного взаимодействия - площадь, ионный ток, ионную массу. Из полученного выражения (3) следует, что скорость изменения падения потенциала в СОЗ может быть очень большой и увеличиваться с ростом абсолютной величины отрицательного напряжения на контактной поверхности, так как с напряжением быстро падает емкость контакта  $C_N(u) = 1/Bu^{3/4}$ . Если учесть, что при достаточно большой индуктивности в цепи формируются импульсы с напряжением порядка 1кВ (весьма умеренное значение для экспериментально наблюдаемых осцилляций), то можно сделать оценку: при плотности ионного тока ионов водорода на уровне  $10^{-2} A/cm^2$ , а также с учетом того, что плотность эмиссионного тока в области экстремума  $N$ -образной ВАХ обычно превышает  $1 A/cm^2$ , скорость нарастания напряжения на контактной поверхности может превышать значения  $10^{12} Vc^{-1}$  или  $10^3 V/нс$ . В реальных экспериментах хорошо видно, что передний фронт импульса укрупняется до напряжений в несколько кВ. При дальнейшем росте напряжения генерируемого импульса значительно

возрастает вторичная ион-электронная эмиссия, а также возможны паразитные разряды, что снижает темп зарядки  $C_N$ . Паразитные емкости и утечки тока (например, по системе охлаждения) также снижают темп зарядки, однако при некоторых специальных условиях, обсуждаемых ниже, действительно наблюдалось формирование импульсов с темпом нарастания напряжения на переднем фронте порядка  $10^3$  В/нс.

К математической модели контактной динамической системы, описываемой системой (3-4), можно применить методику линеаризации при малых отклонениях динамических переменных от особых точек равновесия (точек пересечения ВАХ и нагрузочной характеристики источника питания). В качестве управляющих параметров использованы две величины, по размерности соответствующие частотам. Первая отражает свойства нелинейного контакта  $\omega_c = 1/R_i C_N$  ( $R_i$  - дифференциальное сопротивление,  $C_N$  - дифференциальная емкость контактной поверхности в окрестности особой точки). Вторая относится к остальной части разрядной цепи  $\omega_L = R/L$ . Для рассматриваемой математической модели  $\omega_c$  может быть как положительной, так и отрицательной для особых точек на падающем участке ВАХ,  $\omega_L$  - только положительной. Выражение для корней характеристического уравнения принимает следующий вид:

$$s_{1,2} = \frac{1}{2} \left[ -(\omega_c + \omega_L) \pm \sqrt{(\omega_L - \omega_c)^2 - 4\omega_o^2} \right]. \quad (6)$$

Диаграмма устойчивости располагается в двух квадрантах плоскости параметров  $(\omega_c, \omega_L)$ , показанной на рисунке 3.  $\omega_o$  соответствует некоторой собственной частоте  $\omega_o^2 = 1/LC_N$ , которая уже зависит от комбинации внешних и внутренних реактивных параметров, от точки пересечения нагрузочной характеристики и ВАХ контакта ( $C_N$  контакта подсчитывается через напряжение в особой точке неустойчивого равновесия). На диаграмме параметров естественным образом выделяются границы, при пересечении которых происходит бифуркация - принципиальное топологическое изменение фазового портрета поведения плазменно-поверхностного контакта как динамической системы.

Режимы с неустойчивой рабочей точкой могут возникать только в левом квадранте, когда особая точка находится на падающем участке ВАХ. При

$$\omega_L > \omega_o^2 / \omega_c \quad (7)$$

реализуется триггерный бистабильный режим с возможностью переключений между низковольтным сильноточным и высоковольтным слаботочным состояниями.

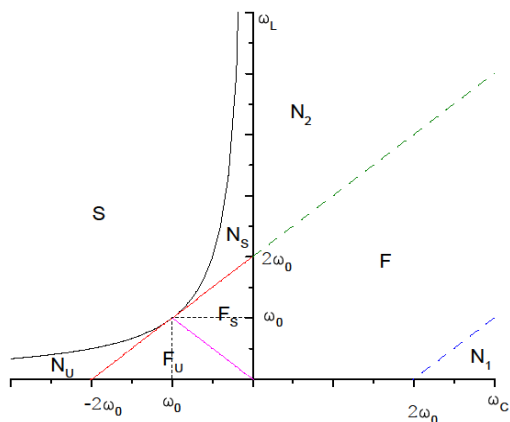


Рисунок 3 - Границы переходов между устойчивыми и неустойчивыми режимами плазменно-поверхностного контакта с N-образной ВАХ.

Эта область диаграммы соответствует особой точке типа седло S (saddle). В этом случае нагрузочная характеристика имеет три точки пересечения с ВАХ, причем именно средняя на N-спаде является неустойчивой. Сам ППК проявляет эффект памяти. Например, кратковременные увеличения и уменьшения ЭДС могут приводить к переключениям из низковольтного состояния в высоковольтное и наоборот. Подобные переключения могут производить кратковременные снижения и увеличения ускоряющего напряжения в электронной пушке ППР. Причем, в обратной последовательности: снижение ускоряющего напряжения уменьшит максимум ВАХ ниже нагрузочной характеристики, ППК переключится в высоковольтное состояние, которое сохранится при возвращении ускоряющего напряжения пушки к исходному состоянию. При кратковременном увеличении ускоряющего напряжения можно получить обратный переход в низковольтное состояние.

При обратном неравенстве, несмотря на ОДС ВАХ, теоретически возможны как неустойчивые, так и устойчивые автоколебательные состояния. Дополнительным необходимым условием развития

автоколебаний является положительная действительная часть характеристического корня:

$$\omega_L < |\omega_c|, \text{ или } L/C_N > R/R_i. \quad (8)$$

В другом представлении это условие можно сформулировать как  $\rho > (R/R_i)^{1/2}$ , где  $\rho = (L/C_N)^{1/2}$  - характеристическое сопротивление контура.

При условии

$$\omega_L < 2\omega_o + \omega_c \quad (9)$$

появляется мнимая часть корня характеристического уравнения. Отрезок прямой  $\omega_L = 2\omega_o - |\omega_c|$  в левом квадранте разделяет неустойчивые режимы с особыми точками типа неустойчивый узел и неустойчивый фокус -  $N_u$  (unstable node) и  $F_u$  (unstable focus), а также устойчивые режимы типа узел и фокус  $N_s$  (stable node) и  $F_s$  (stable focus).

Диаграмма позволяет провести быстрое определение типа особой (рабочей) точки ППК и предсказать начальный характер эволюции малого отклонения в пределах линейного участка ВАХ. В экспериментах с ППР при наличии N-образной ВАХ коллекторной системы и при попадании особой точки на падающий участок ВАХ наиболее характерны режимы, которые соответствуют областям S и  $N_u$ . Триггерный режим реализуется при наличии в цепи маломощного источника ЭДС с большим выходным сопротивлением R, а режим релаксационных автоколебаний проявляется для мощных источников с малым выходным сопротивлением. Поскольку в силу ограниченности падающего участка ВАХ развитие автоколебательной неустойчивости из окрестности неустойчивого узла с подпиткой энергии от источника питания не может продолжаться бесконечно, наступает ограничение при выходе фазовой траектории на растущий участок ВАХ - на крутую  $\sigma$ -ветвь со стороны низких напряжений или на очень пологую  $\gamma$ -ветвь со стороны больших отрицательных напряжений.

Возникающие релаксационные автоколебания можно представить циклическим движением изображающей точки по часовой стрелке вокруг особой точки по устойчивому и вытянутому вдоль  $\gamma$ -ветви предельному циклу. Максимальная величина импульса напряжения в релаксационном режиме определяется формой ВАХ и, в очень сильной степени, величиной индуктивности. Как правило, фазовая траектория релаксационных автоколебаний несимметрична и вытянута от особой точки в сторону очень больших отрицательных напряжений по отношению к положению особой точки, а временная развертка соответствует возникновению коротких высоковольтных импульсов при постоянной составляющей смещения всего порядка -100В (рисунок 4).

Отметим, что ВАХ плазменно-поверхностного контакта имеет в некотором смысле уникальную форму по сравнению с известными приборами с N-

образной ВАХ, например, туннельными диодами. Она имеет очень протяженный падающий участок (сотни вольт против сотен милливольт), а токи могут достигать десятков ампер против десятков миллиампер. Кроме того, его вторая восходящая  $\gamma$ -ветвь уходит в высоковольтную область при очень малом значении тока по сравнению с эмиссионным током в начале N-спада, тогда как на ВАХ туннельного диода вторая восходящая ветвь соответствует открытому состоянию обычного диода и быстро возрастает, что ограничивает амплитуду автоколебаний по напряжению (меньше 1В). Это означает, что при генерации релаксационных колебаний в ППК диссипация энергии мала, и в нем может быть индуцировано очень большое напряжение (десятки кВ). Кроме того, на заднем фронте импульса при разрядке  $C_N$  можно получить смену знака тока и напряжения. В этом случае контактная поверхность во время действия положительного импульса играет роль анода, а стенка и заземленные диафрагмы, соответственно, катода. Это ведет к усилению поперечного переноса и уширению плазменного канала.

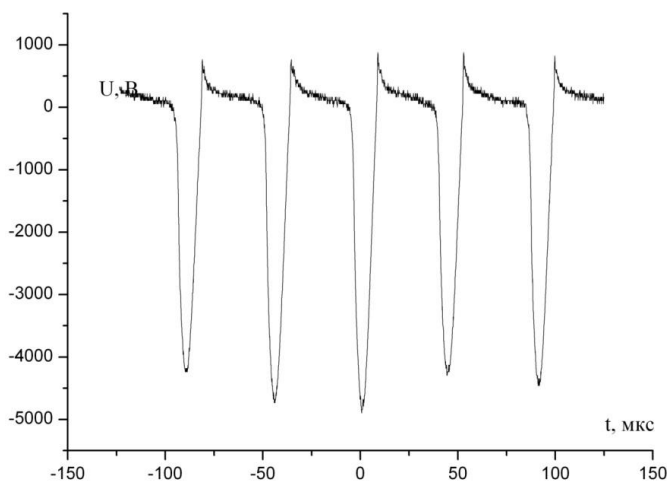


Рисунок 4 - Пример экспериментальной осциллограммы напряжения контактной пластины с использованием внешней индуктивности (10 мГн) в установившемся режиме (на предельном цикле).

Результаты численного моделирования автоколебаний с использованием уравнений (3-4) с учетом измеряемых параметров



приведены на рисунке 5. Для удобства ввода-вывода данных знаки токов и напряжений изменены на противоположные. Использовано упрощенное кусочно-линейное представление N-образной ВАХ, соответствующее измеряемым экстремумам. На первом графике показана фазовая траектория, ниже представлены временные развертки напряжения и тока. Сравнение рисунков 4 и 6 показывает хорошее совпадение расчетов по упрощенной модели с экспериментально наблюдаемыми проявлениями вторично-эмиссионной неустойчивости плазменно-поверхностного взаимодействия по частоте и амплитуде автоколебаний.

Отличия в форме связаны с тем, что математическая модель динамической системы ППК оказывается значительно проще физического прототипа. На это указывает появление небольшой модуляции автоколебаний и смена знака напряжения контактной поверхности на заднем фронте релаксационных импульсов.

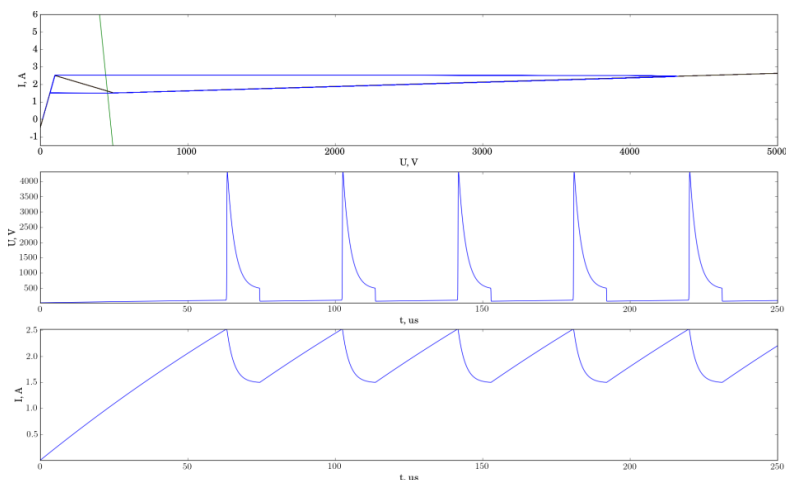


Рисунок 5 - Модельные представления фазовой траектории и временных зависимостей тока и напряжения на контактной поверхности при наличии внешней индуктивности 10 мГн.

Далее в третьей главе подробно рассматриваются возможности реализации устойчивых и неустойчивых режимов плазменно-поверхностного взаимодействия в соответствии с диаграммой устойчивости, когда намеренно изменяются управляющие параметры. Обсуждается применение релаксационных автоколебаний при

повышенной внешней индуктивности для имплантации ионов, а также возможности возбуждения высокочастотных квазигармонических электромагнитных колебаний, например, для дополнительного нагрева плазмы или резонансного ускорения ионов.

Рассматривается метод автоколебательного зонда для диагностики сильно неравновесной плазмы. Форма фазовой траектории релаксационных автоколебаний позволяет восстанавливать форму мгновенной ВАХ зонда. В обычном методе зонда Ленгмюра повышенная ВЭЭЭ под действием быстрого электронного компонента препятствует проведению корректных измерений ионного тока насыщения. В предлагаемом методе она используется для быстрой развертки напряжения зонда в автоколебательном режиме до высоких напряжений отрицательного смещения, когда исключается бомбардировка поверхности зонда электронами из плазмы. Поскольку максимум напряжения в импульсе соответствует пересечению  $\gamma$ -ветви ВАХ, по экспериментальным фазовым траектории высоковольтных релаксационных автоколебаний с разными индуктивностями можно восстановить  $\gamma$ -ветвь, т.е. ионный ток с точностью до эффективного коэффициента ВИЭЭ  $\gamma$ . По скорости изменения напряжения можно определить плотность ионного тока в чистом виде, используя соотношения (3-5), что позволяет уточнять величину  $\gamma$ .

Следует заметить, что при развитии релаксационных автоколебаний накопление энергии индуктивностью происходит очень эффективно, если малы активные потери на участке  $\sigma$ -ветви. Это достигается, если  $\sigma$ -ветвь проходит максимально близко к оси тока и с минимальным дифференциальным сопротивлением, когда ВЭЭЭ существенно превышает единицу. Кроме того, необходимо использовать мощный источник питания с малым внутренним сопротивлением. При этом в низковольтной фазе через ускорение ионов на поверхность и инжекцию в плазму вторичных электронов затрачивается относительно малая мощность (обычно менее 10%). Отметим, что коллекторная пластина при этом испытывает значительный нагрев первичными электронами пучка из плазмы, поскольку в низковольтной отрицательной и, тем более, положительной фазе автоколебаний она становится стоком плазменных электронов.

Падение напряжения на активных элементах цепи в низковольтной фазе можно сделать в десятки раз ниже значения ЭДС источника смещения, если особую точку по напряжению установить вблизи высоковольтной границы N-спада ВАХ. В высоковольтной фазе

автоколебаний накопленная энергия сообщается преимущественно ионному потоку (с учетом малого коэффициента вторичной ион-электронной эмиссии). Автоколебательная неустойчивость ППК может служить эффективным средством трансформации мощности источника низковольтного смещения в мощность ионной бомбардировки контактной поверхности с ускоряющим напряжением в десятки раз выше значения ЭДС. При этом ионная бомбардировка происходит короткими импульсами с быстрым изменением ускоряющего ионы напряжения, энергии бомбардировки и глубины торможения. Соответственно, распыление, внедрение и ионный нагрев контактной поверхности в режиме коротких импульсов с быстрым перемещением фронта ионного воздействия может очень сильно отличаться от стационарного режима работы ППК даже без учета влияния автоколебательного режима на параметры плазменного шнура.

Таким образом, в условиях развития автоколебательной вторично-эмиссионной неустойчивости кардинально изменяется энергетический спектр и полная мощность воздействующих на контактную поверхность ионов. При этом само ионное воздействие оказывается сильно модулированным, и можно говорить о его временной компрессии.

**В четвертой главе** рассматривается возможности использования АВЭР для увеличения плотности генерируемой плазмы и получения высоковольтных релаксационных импульсов. Для мощных АВЭР характерно, что высокоэнергетичная группа электронов, необходимая для возникновения участка ОДС на ВАХ ППК, формируется и поддерживается преимущественно за счет собственной высокой вторичной эмиссии. Быстрые электроны, эмитированные ППК в плазменный канал, с некоторой задержкой имеют возможность вернуться назад после рассеяния в коллективных и элементарных взаимодействиях, а также после отражения от магнитных пробок или катода пушки. Если фаза подхода таких электронов к осциллирующей поверхности оказывается благоприятной для бомбардировки и поддержания эмиссии, то их вклад в поддержание АВЭР может стать определяющим. Здесь можно проследить некоторую аналогию с высокочастотным мультипакторным разрядом. С учетом сказанного выделяются самостоятельный АВЭР, когда для его существования необходим первичный пучок, генерирующий ППР с быстрой электронной группой в ФРЭЭ, и самостоятельный АВЭР, который сам себя обеспечивает быстрыми электронами. Роль единственного катода разрядной системы в самостоятельном АВЭР выполняет контактная пластина, отрицательно смещенная по постоянной составляющей осциллирующего напряжения.

В АВЭР появляются дополнительные обратные связи, характерные времена которых остаются более длительными по сравнению с периодом основных автоколебаний. Экспериментально задержанное влияние на ВАХ проявляется не только в замедлении установления амплитуды автоколебаний, но и в их модуляциях, часто с переходом к состоянию динамического хаоса.

Наиболее быстрое влияние на автоколебания оказывает самосогласованное изменение энергетического распределения и тока быстрых электронов, поступающих на контактную поверхность. Оно проявляется за времена порядка 1 нс и приводит к увеличению тока в локальном максимуме ВАХ и, соответственно, к уменьшению как абсолютного значения ОДС на падающем участке ВАХ, так дифференциального сопротивления на его  $\sigma$ -ветви. Происходит задержанное по времени изменение (вытягивание вдоль оси токов) ВАХ  $I_M(U)$  контакта, которая ранее в модельных расчетах считалась неизменной. Это, в свою очередь, приводит к нарастанию амплитуды автоколебаний, параллельно нарастает отбираемая от источника ЭДС средняя мощность, что прогрессивно увеличивает вкладываемую в разрядную плазму мощность и количество бомбардирующих поверхность высокоэнергетических ионов. Рабочая точка смещается по нагрузочной характеристике источника питания в сторону малых напряжений. Такое смещение характеризуется ростом постоянной составляющей тока, обеспечиваемой источником смещения. С ростом максимума ВАХ при неизменной нагрузочной характеристике может произойти переход особой точки из неустойчивого положения на N-спаде в устойчивое положение на растущей  $\sigma$ -ветви с очень малым положительным дифференциальным сопротивлением. На параметрической диаграмме (рис.3) это соответствует перекидыванию особой точки в зону устойчивого узла.

На некоторое время автоколебания резко обрываются, при этом прекращается поступление в плазменный канал дополнительных высокоэнергетических электронов с контактной поверхности. После некоторой задержки, связанной со временем ухода из плазменного канала дополнительной группы быстрых электронов, нарабатываемых в автоколебаниях, особая точка опять смещается на падающий участок ВАХ исходного ППР. Происходит обратная бифуркация в зону неустойчивого фокуса или узла (в состояние квазигармонических или релаксационных автоколебаний). Следует новая вспышка автоколебаний. В фазовом портрете автоколебаний теперь нельзя выделить устойчивый предельный цикл, и поведение динамической системы приобретает более сложный, зачастую стохастический характер.

Отметим, что замкнутая цепь по постоянному току может существенно отличаться от высокочастотной цепи. В частности, плазменно-поверхностный контакт можно зашунтировать внешней емкостью, а источник постоянного питания отделить большой индуктивностью. При этом возникают условия для развития неустойчивости на последовательном резонансе: напряжения вдоль плазменного канала с индуктивными свойствами и в СОЗ находятся практически в противофазе.

Можно добиться состояния, когда ВЧ автоколебания существуют только внутри вакуумной камеры. По внешнему питанию такой АВЭР проявляет свойства разряда постоянного тока, а внутри рабочей камеры он является преимущественно высокочастотным. Для поддержания такого АВЭР не требуются внешние ВЧ генераторы, фидеры, согласующие устройства.

В работе рассмотрены схемы эффективных автоколебательных генераторов плазмы на собственной резонансной частоте в режимах коаксиальной линии и плазмозаполненного резонатора с возбуждением объемных волн геликонного типа. Разработан специальный малогабаритный модуль в виде охлаждаемого соленоида с разрядной полостью диаметром 40 мм и длиной 800 мм (рисунок 6)..

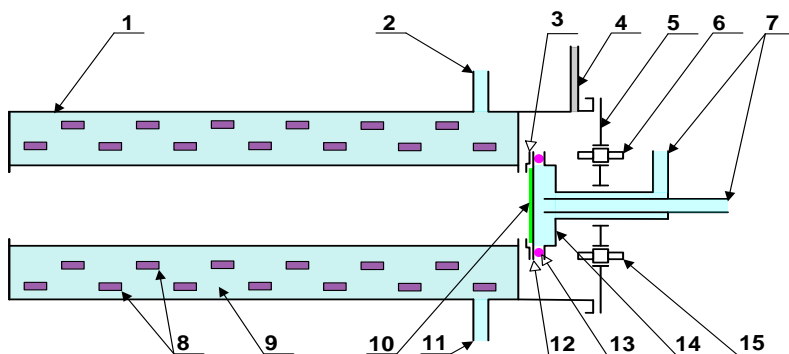


Рисунок 6 - Схема малогабаритного модуля АВЭР:

1 – корпус модуля; 2, 11 – ввод и вывод водяного охлаждения соленоида и стенки; 3 – прижимное кольцо мишени; 4 – газовый нагреватель; 5 – фланец; 6, 15 – герметические токовые и сигнальные вводы; 7 – ввод и вывод охлаждения катодного узла; 8 – витки двухслойной катушки соленоида; 9 – сепаратор; 10 – мишень; 12 – съемная коллекторная пластина; 13 – уплотнительное кольцо, 14 – корпус коллектора

Один торец открыт, в другом находится охлаждаемый высокоэmissionный электрод. Он выполнен на высоковольтном керамическом изоляторе, его устройство позволяет менять материал контактной пластины, которая имеет вакуумное уплотнение и охлаждается мощной водяной струей. По высокой частоте коллектор шунтирован на "землю" малоиндуктивной емкостью, значительно превышающей емкость ППК в рабочей точке

В зависимости от удельной мощности, поглощаемой в плазменном канале, изменяется тип возбуждаемых собственных колебаний. При относительно малой мощности автоколебаний, а, соответственно, плотности и проводимости плазмы возбуждается автоколебательный разряд - аналог высокочастотного емкостного разряда. При увеличении мощности разряда за счет увеличения ЭДС постоянного источника питания и уменьшения его выходного сопротивления растет мощность АВЭР и проводимость плазмы. Возрастает добротность резонатора, и происходит переход к автоколебаниям геликонного типа. Разряд стягивается к оси и может существовать уже без первичного электронного пучка в самостоятельном режиме (рисунок 7).

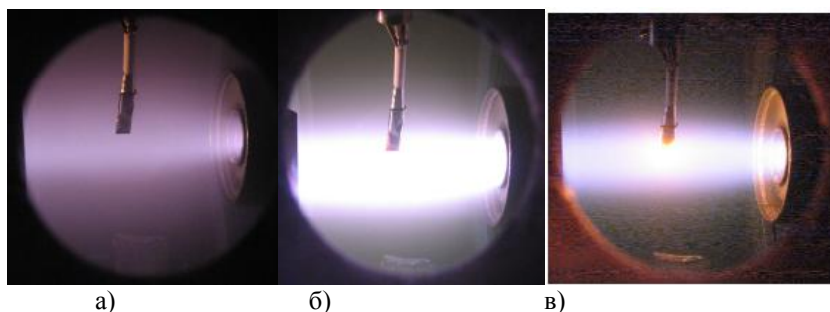


Рисунок 7 - Режимы работы малогабаритного модуля:

а) пучково-плазменный разряд, поддерживаемый автономной электронной пушкой;

б) несамостоятельный АВЭР на собственной частоте плазменно-поверхностный слой - плазменный канал;

в) самостоятельный АВЭР (электронная пушка отключена) с возбуждением автоколебаний геликонного типа, хорошо видно, что произошло центрирование разряда и увеличение удельной мощности (попытка ввести торцевой ионный зонд с корпусом из вольфрама привела к его разрушению)

Подчеркнем, что в отличие от схем реализации классического геликонного разряда для автоколебательного режима не требуется специальная антенна, мощный ВЧ источник, фидерные и согласующие устройства. Не требуется также и диэлектрическая стенка для ввода ВЧ-мощности извне, что в значительной степени ограничивает предельную мощность широко используемых ныне геликонных генераторов плазмы.

При возбуждении геликонного АВЭР можно использовать исключительно металлические хорошо охлаждаемые стенки, как это сделано в модуле. Высокочастотные колебания могут быть сосредоточены исключительно в плазменном канале и ППК. При этом генерируемая ВЧ мощность может эффективно каналироваться вдоль магнитного поля по плазменному шнуру. В этом режиме геликонные моды в плазменном канале согласованы со стоячей поверхностной волной в СОЗ ППК, а во внешних цепях ВЧ токи и напряжения могут отсутствовать.

По сравнению с высоковольтными релаксационными автоколебаниями в сильноточных квазигармонических автоколебаниях существенно уменьшается энергия ионной бомбардировки поверхности. Кроме того, в этих режимах наблюдается обращение градиента давления и ионной потоковой скорости в коллекторной секции установки. Когда возбуждаются автоколебания, ППК перестает быть простым стоком для ионов, образуемых в канале ППР. Поскольку дополнительная эмиссия высокоэнергетических электронов со стороны поверхности усиливает нагрев и ионизацию, и потоковая скорость в плазменном канале изменяет знак. Определенную роль может играть высокочастотное давление на плазму (сила Миллера [14,15]) со стороны ППК. Обращение направления ионного увлечения хорошо видно с помощью скоростной видеосъемки поведения пылевых частиц, инжектированных и захваченных в плазменный канал. Без автоколебаний они увлекаются в сторону контактной поверхности, в режиме АВЭР перенос изменяет знак, и пылевые частицы увлекаются от торцевого ППК в центральную зону установки. Автоколебательный геликонный режим может быть удобен для применения в генераторах плазменных потоков, например, для создания электрических ракетных двигателей или имитаторов ППВ в периферии магнитных систем удержания горячей плазмы.

При проведении экспериментов с сильноточными АВЭР с амплитудой плотности тока в неустойчивом ППК порядка  $10 \text{ A/cm}^2$  обнаружен особый механизм генерации очень высоковольтных релаксационных автоколебаний, связанный по предлагаемой модели с индуцированной потерей диэлектрических и высокоэмиссионных свойств

поверхностной пленкой в результате перегрева ее электронной подсистемы и появления большого количества носителей в зоне проводимости.

Для формирования особо высоковольтных импульсов желательно убрать шунтирующую емкость и установить большую индуктивность в качестве фильтра источника питания. Как показали эксперименты, высоковольтные релаксационные импульсы в этом случае могут возникать без достижения локального максимума N-образной ВАХ, а в результате "перегрева" электронной подсистемы диэлектрической пленки еще на  $\sigma$ -ветви ВАХ. Перегрев сопровождается потерей диэлектрических Низковольтная стадия оказывается настолько затянутой (сотни мкс), что рост параметров плазмы под влиянием сильноточной вторичной эмиссии ППК успевает заметно усилить поток частиц на поверхность и генерацию в диэлектрической пленке неравновесных носителей тока. При этом за счет большой накопленной индуктивной энергии к моменту срыва эмиссионного тока может достигаться очень высокое значение импульсного напряжения. На рисунке 8 показан характерный пример формирования такого импульса из низковольтного сильноточного состояния ППК (начальное напряжение смещения - всего 50В) для первичного пучково-плазменного разряда в водороде.

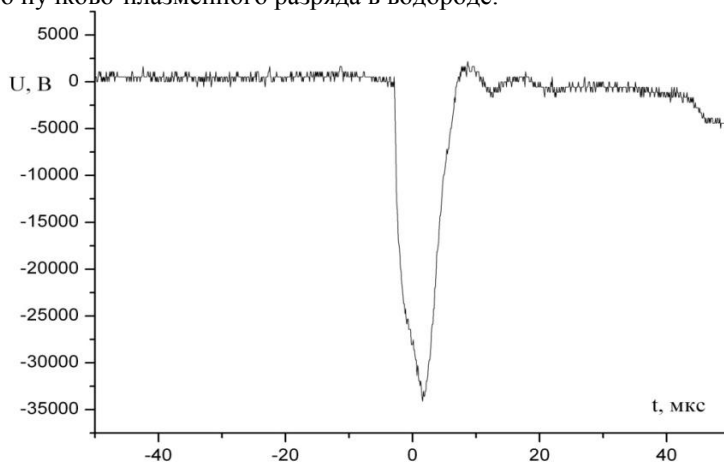


Рисунок 8 - Генерация высоковольтного импульса из режима с низковольтным смещением контактной пластины (50В, 10А), внешняя индуктивность 120 мГн.



Интересно, что увеличение индуктивности приводит не к уширению импульса и возможному пробою, а к значительному росту амплитуды с укрупнением фронта (рисунок 9). Такое поведение ППК с явным проявлением антидинаatronного эффекта может быть связано с особенностями ион-электронной вторичной эмиссии в присутствии оксидной пленки, которая восстанавливает свои диэлектрические свойства к моменту начала среза импульса, что резко увеличивает вторичную эмиссию. При энергии свыше 40 кэВ ион способен преодолеть пленку без нейтрализации, и основная генерация вторичных электронов происходит в металлической подложке. Заряжаясь отрицательно, пленка увеличивает барьер на границе металл-диэлектрик и снижает инжекцию электронов.

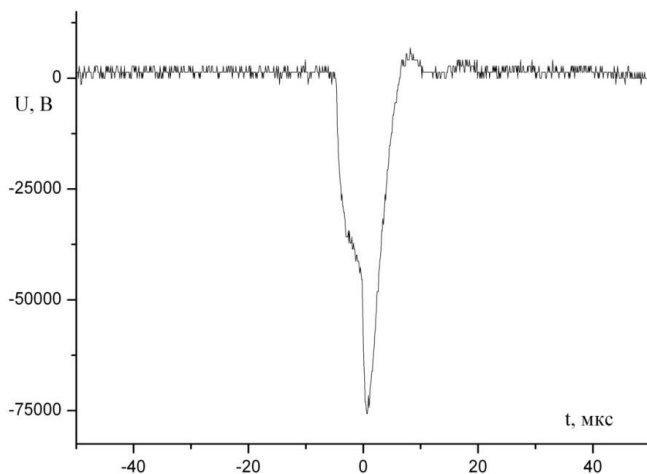


Рисунок 9 - Генерация высоковольтного импульса из режима с низковольтным смещением (50В, 10А), внешняя индуктивность 180 мГн.

Первый режим удобен для создания малогабаритного и низковольтного по питанию импульсного рентгеновского источника, роль мишени в котором может исполнять катод первичного электронного пучка. Второй режим удобен для создания малогабаритных импульсных ионных имплантеров и нейтронных генераторов, использующих только низковольтное питание.

**В пятой главе** рассмотрены условия возбуждения вторично-эмиссионной неустойчивости в униполярном режиме, без специального

источника электрического смещения контактной поверхности. Если для самостоятельного АВЭР не требуется первичный электронный пучок, и разряд может существовать при наличии только одного и достаточно мощного постоянного источника питания смещения, то для существования униполярного АВЭР не требуется внешний источник смещения потенциала контактной пластины. Униполярный АВЭР поддерживается за счет энергии надтепловой группы электронов в контактирующей с поверхностью неравновесном плазменном канале. В ППР источником энергии для поддержания униполярного АВЭР выступает надтепловая электронная группа.

В периферийной плазме ТЯР таким источником горячего электронного компонента могут выступать антенные системы дополнительного нагрева плазмы, а также нелокальные эффекты, связанные с переносом горячей группы электронов через сепаратрису в периферийную область, в которой плазма имеет преимущественный перенос вдоль магнитного поля и возможность контакта с материальной поверхностью.

Локальная неамбиполярность токов на контактную поверхность вызывается разнообразными причинами: дрейфовыми эффектами, неравномерным распределением электронной температуры, генерируемыми в плазме волновыми процессами, а также вторично-эмиссионной «пятнистостью». Такая «пятнистость» может иметь место в пределах общей контактной поверхности смежных «магнитных трубок» при одностороннем плазменного потоке. В другом варианте «пятнистость» связана с противоположными торцевыми контактами в пределах одной магнитной трубки.

В первом случае замыкание электрического контура происходит поперек магнитного поля и сопровождается возбуждением продольных, поперечных и азимутальных токов подобно тому, как это происходит в геликонном АВЭР. Неустойчивость развивается с одного торца, и возмущение параметров плазмы каналируется во встречном по отношению первичному потоку направлении. При этом в ППК могут возбуждаться и поверхностные электромагнитные волны, распространяющие возмущения тангенциально к контактной поверхности.

Во втором случае удерживаемая в пределах некоторой магнитной трубки неравновесная плазма, обладающая индуктивными свойствами, одновременно контактирует с двумя торцевыми поверхностями. Пусть одна поверхность обладает низкоэмиссионными свойствами. Например, она имеет развитый рельеф с большим количеством вискеро́в, нет термоэмиссии, и на ней отсутствует диэлектрическая пленка. Она работает

в режиме сбора электронного тока из плазмы, и падение потенциала в СОЗ ППК относительно велико. Другая торцевая контактная поверхность с высокой вторичной эмиссией инжектирует в плазму избыточный электронный ток. По плазменному каналу неизбежно возникает ток, замыкающийся по внешней стенке. Низкоэмиссионный контакт работает как источник ЭДС. Высокоэмиссионный контакт выступает нелинейной нагрузкой с N-образной ВАХ. Равновесие определяется точкой (точками) пересечения ВАХ этих контактов, включенных в замкнутую цепь. Для предсказания устойчивости особых точек можно использовать уже использованный подход на основе диаграмм устойчивости.

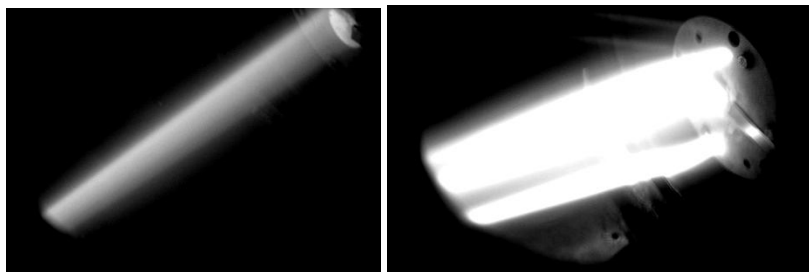
В пятой главе приведены результаты экспериментального возбуждения униполярных автоколебательных разрядов в модельных экспериментах на пучково-плазменной установке. Показан переход режима взаимодействия из устойчивого в неустойчивый автоколебательный режим без внешнего источника смещения только за счет преобразования мощности быстрого электронного компонента. Коллекторная сборка состояла из низкоэмиссионного графитового кольца, принимающего периферийную часть первичного потока ППР и приосевого торцевого контактного устройства с охлаждаемой пластиной с высокоэмиссионной диэлектрической пленкой. Будучи разомкнутыми, при зажигании ППР в основной камере кольцо и торцевой коллектор принимают совершенно разные плавающие потенциалы. Они имеют отрицательный знак, но абсолютные значения отличаются на порядок. В зависимости от режима ППР плавающие потенциалы принимают значения, соответственно, в диапазоне сотен и десятков вольт.

При замыкании между коллекторами протекает постоянный ток. В замкнутой цепи контакт с низкоэмиссионной графитовой диафрагмой выполняет роль источника ЭДС. Торцевой коллектор выполняет роль нагрузки с N-образной ВАХ. Для возбуждения автоколебаний необходимо, чтобы характеристики контактов пересеклись на спаде N-образной ВАХ, а по диаграмме устойчивости индуктивность замкнутой цепи, емкости контактов и дифференциальные сопротивления соответствовали зоне  $N_{\text{н}}$  или  $F_{\text{н}}$ .

В качестве управляющих параметров выступают давление газа (обычно используется легкий газ, водород или гелий), ток и энергия первичного электронного пучка. Еще одним важным параметром является соотношение контактных площадей диафрагмы и торцевого коллектора. ВАХ низкоэмиссионной диафрагмы в особой точке должен иметь меньшее дифференциальное сопротивление по сравнению с абсолютной величиной сопротивления N-спада. В описываемых экспериментах это грубая

настройка осуществлялась подбором размеров катода пушки и отверстия в диафрагме. Более тонкая настройка осуществлялась изменением соотношения токов торцевых катушек со стороны пушки и коллектора. Основные параметры автоколебаний, полученные в униполярном режиме, согласуются с результатами численного моделирования и малосигнальным анализом устойчивости цепи, включающей низко- и высокоэмиссионные контактные поверхности с неравновесной плазмой. При моделировании полагалось, что источником ЭДС выступает контактная поверхность с заведомо малым коэффициентом вторичной эмиссии, а нелинейной нагрузкой является плазменно-поверхностный контакт с высокоэмиссионной диэлектрической пленкой. Таким образом, в первом низкоэмиссионном ППК происходит торможение и преобразование энергии надтепловой группы электронов из плазмы в постоянную ЭДС. Второй ППК служит нагрузкой с N-образной ВАХ, преобразующей мощность этой ЭДС в автоколебания.

На рисунке 10а показан канал первичного ППК между разомкнутыми диафрагмой и коллектором, находящимися под плавающими потенциалами. На рисунке 10б показан этот же участок при замыкании диафрагмы и коллектора индуктивностью.



а)

б)

Рисунок 10 - Канал первичного ППК между разомкнутыми диафрагмой из низкоэмиссионного графита и торцевым коллектором с высокоэмиссионной пленкой:

а) диафрагма и коллектор разомкнуты и находятся под плавающими потенциалами; б) возбуждение униполярного АВЭР при их замыкании через внешнюю индуктивность, хорошо видно возникновение паразитных высокочастотных разрядов в теневой зоне в униполярном автоколебательном режиме без внешнего источника смещения

Значительная часть мощности первичного ППК из основного объема установки (на рисунке 10 за диафрагмой слева) благодаря развитию

униполярного АВЭР теперь поглощается в коллекторной секции. Происходит своеобразная рекуперация части кинетической энергии электронного компонента плазмы с преобразованием в энергию электромагнитных автоколебаний, которые и возбуждают паразитный ВЧ разряд.

При этом наблюдается не только усиление ионизации в основном канале перед ППК, но и возникают паразитные разрядные каналы, значительно смещенные в теневую область диафрагмы далеко за пределы зоны непосредственного контакта обращенной к первичному ППР поверхности.

Таким образом, теоретически, в численных расчетах и физических экспериментах показано, что автоколебания по вторично-эмиссионному механизму могут развиваться в униполярном режиме за счет преобразования энергии электронного компонента неравновесной плазмы. В модельных экспериментах продемонстрировано, что возникающие высокочастотные автоколебания не только изменяют плотности и энергетические спектры ионных потоков, но могут возбуждать и паразитные разряды в теневых областях и зазорах вне прямого воздействия потоков частиц и излучения из основной плазмы.

**В заключении** представлены выводы и основные результаты диссертационной работы.

### **Основные результаты**

1. В результате экспериментов на пучково-плазменной установке ПР-2 определены условия перехода от стационарного режима протекания тока между плазмой и контактной поверхностью к неустойчивому режиму, приводящему к автоколебаниям тока и напряжения в контактном слое. Сделан вывод о вторично-эмиссионном механизме развития неустойчивости в присутствии на контактной поверхности тонких диэлектрических пленок.

2. Разработаны физические основы автоколебательного вторично-эмиссионного разряда (АВЭР) - особой формы газового разряда, которая сопровождается автогенерацией мощных электромагнитных колебаний в разрядной цепи и сочетает свойства пучково-плазменного и ВЧ-емкостного разрядов.

3. Построена математическая модель неустойчивого плазменно-поверхностного контакта как нелинейного элемента в составе замкнутой токовой цепи, представляющей сложную динамическую систему,

охваченную разнообразными обратными связями, в которой вторичная электрон-электронная эмиссия обеспечивает наиболее быструю и глубокую положительную обратную связь.

4. Предложены параметрические диаграммы устойчивости протекания тока через плазменно-поверхностный контакт с повышенной вторично-эмиссионной способностью. Указаны сепаратрисы бифуркационных переходов между различными состояниями динамической системы. Сформулированы принципы стабилизации неустойчивости и управления параметрами электромагнитных автоколебаний.

5. В автоколебательных режимах повышенной мощности выявлены особые режимы высоковольтных релаксационных и хаотических автоколебаний, возникающих при индуцированной потере пленкой диэлектрических свойств и высокой вторично-эмиссионной способности.

6. На базе развитых модельных представлений предсказана и экспериментально реализована вторично-эмиссионная неустойчивость в униполярном режиме за счет преобразования энергии надтепловых электронов плазмы (без внешнего источника ЭДС в цепи контактной поверхности).

7. В модельных экспериментах продемонстрировано, что униполярные высокочастотные разряды способны возбуждать паразитные разряды в теневых областях и зазорах вне прямого воздействия потоков частиц и излучения из основной плазмы.

8. Показано, что переход плазменно-поверхностного взаимодействия в неустойчивый автоколебательный режим помимо повышения уровня распыления за счет ускорения ионов при генерации высоковольтных импульсов, приводит к дополнительной эрозии контактной поверхности в результате диспергирования на пылевые частицы.

9. Показано, что АВЭР:

- может выступать в качестве быстродействующего переключающего устройства, генератора высоковольтных релаксационных импульсов с крутыми фронтами, а также генератора мощных высокочастотных электромагнитных автоколебаний широкого диапазона перестраиваемых частот с возможностью вывода на внешнюю нагрузку, в том числе для возбуждения вторичных разрядов;

- позволяет объединить в одном устройстве газоразрядную камеру с импульсной или резонансной ускорительной системами для получения высокоэнергетичных ионных потоков применительно к портативным имплантерам и нейтронным генераторам;

- позволяет создавать производительные устройства для ионно-плазменной технологии и плазменных ракетных двигателей, а также
- может использоваться в качестве имитатора воздействия пристеночной плазмы в термоядерных реакторах с магнитным удержанием на конструкционные материалы.

### Список цитируемой литературы

1. Недоспасов, А. В. Физика пристеночной плазмы в токамаках / А. В. Недоспасов // УФН. – 1987. – Т. 152 – Вып. 3. – С. 479.
2. Stangeby, P. The plasma boundary of magnetic fusion devices / P. Stangeby // IOP Publishing. – 2000.
3. Акишин, А. И. Космическое материаловедение / А. И. Акишин. – М.: НИИЯФ МГУ, 2007. – 209 с.
4. Курнаев, В. А. Введение в пучковую электронику: учебное пособие / В. А. Курнаев, Ю. С. Протасов, И. В. Цветков; под ред. В. А. Курнаева. – М.: МИФИ, 2008.
5. Chen, F. F. Principles of plasma processing. / F. F. Chen, J. P. Chang // Plenum Kluwer Publishers. – 2002.
6. Leonhardt, D. Fundamentals and applications of plasma processing system based on electron beam ionization / D. Leonhardt, S. W. Walton, R. F. Fernsler // Physics of plasmas. – 2007. – V. 14. – No. 057103.
7. Демидов, В. И. Зондовые методы исследования низкотемпературной плазмы / В. И. Демидов, Н. Б. Колоколов, А. А. Кудрявцев. – М.: Энергоатомиздат, 1996.
8. Райзер, Ю. П. Физика газового разряда / Ю. П. Райзер. М.: Наука, 1987. – 592 с.
9. Бережецкая, Н.К. Взрывоэмиссионные явления на границе металл-горячая плазма./ Н.К.Бережецкая, В.А.Копьев, И.А.Косый и др.// ЖТФ т.61, в.2, 1991, сс. 179 - 184.
10. Kishkek, R. A. Multipactor discharge on metals and dielectrics: Historical review and recent theories / R. A. Kishkek, Y. Y. Lau, L. K. Ang, A. Valfells, and R. M. Gilgenbach // Phys. Plasmas. – 1998. V. 5, № 5. P. 2120-2126.
11. Puech, J. A Multipactor Threshold in Waveguides: Theory and Experiment / J. Puech, L. Lapierre, J. Sombrin, V. Semenov, A. Sazontov, M. Buyanova, N. Vdovicheva, U. Jordan, R. Udiljak, D. Anderson, M. Lisak // Quasi-Optical Control of Intense Microwave Transmission. – 2005. – P. 305-324.
12. Рабинович, М. И. Введение в теорию колебаний и волн / М. И. Рабинович, Д. И. Трубецков. Киров: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2000. – 560 с.

13. Анищенко, В. С. Регулярные и хаотические автоколебания. Синхронизация и влияние флуктуаций / В. С. Анищенко, В. В. Астахов, Т. Е. Вадивасова. – Долгопрудный: Интеллект, 2009. – 312 с.
14. Гапонов-Грехов, А. В. О потенциальных ямах для заряженных частиц в высокочастотном электромагнитном поле / А. В. Гапонов-Грехов, М. А. Миллер // Письма в ЖЭТФ. – 1958. – Т. 34. – Вып. 1. – С. 242-243.
15. Солунин, С. А. О силах, действующих на заряженную частицу в переменном электрическом поле / С. А. Солунин, А. М. Солунин, М. А. Солунин // Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 35. – Вып. 14. – С. 48-54.

### **Список основных работ, опубликованных по теме диссертации**

#### **1. Статьи**

1. S.V.Alekseev, V.M.Baranov, Y.V.Chernyatjev, V.A.Kurnaev, V.V.Teryaev, S.V.Turkulets, I.V. Vizgalov, I.V.L.Komarov, R.N.Giniatulin, Yu.G.Prokofjev. The high heat loads testing of PFC in BPD facility at positive and negative biasing//Journal of Nuclear Materials, Volumes 220–222, April 1995, Pages 721-725.
2. Визгалов И.В. Кирнев Г.С., Сарычев Д.В. Нестабильное плазменно-поверхностное взаимодействие в присутствии диэлектрических слоев. Известия РАН, сер. Физическая, 1996. т.60, сс.168-173.
3. Kirnev G.S., Kurnaev V.A., Sarytchev D.V., Vizgalov I.V. Modeling of sheath potential drop instabilities in SOL with the use of PR-2 mirror machine. Transactions of fusion technology, 1999, V35, N1T, fuste8 (1), p.200-203.
4. Vaitonis, V.V., Vizgalov, I.V., Kurnaev, V.A. A small-scale beam-plasma generator. Instruments and Experimental Techniques, (1999), 42 (5), pp. 714-715.
5. V.A. Kurnaev, V.N.Kolesnikov, V.A.Abramov, V.A.Kadetov, D.V.Mozgrin, D.V.Sarytchev, L.P.Presnyakov, I.V.Vizgalov. Comparative studies of ionized and excited hydrogen atoms and molecules distributions for plasma-target interaction in a linear simulator machine. Journ.Nucl.Mater.266-269 (1999) 412-416.
6. Акел М., Визгалов И.В., Курнаев В.А. Плазменный генератор на основе ВЧ-автоколебательного разряда. Инженерная физика 2002 №3, сс.49-54.
7. M.Akel, I.V.Vizgalov, V.A.Kurnaev. Observation of a plasma surface instability in a linear edge plasma simulator. 30<sup>th</sup> EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, St Petersburg, Russia, July 7-11, 2003. P-3, 180.



8. Акел М., Визгалов И.В., Курнаев В.А. Генерация высоковольтных импульсов напряжения при неустойчивом плазменно-поверхностном взаимодействии. Известия Академии Наук, серия физическая, 2004, том 68, № 3, с. 435-437.

9. А.Б.Антипенков, О.Н.Афонин, Визгалов И.В., В.А.Курнаев, В.Н.Колесников. Обнаружение микротечей воды в камере ИТЭР. Вопросы атомной науки и техники, 2006, вып.3, сс. 46-55.

10. K.M. Gutorov, A.A.Pisarev, I.V.Vizgalov. A mechanism of PFM erosion and redeposition in gaps. Journal of Nuclear Materials, 2007, v. 363-365, pp. 966-971.

11. Визгалов И.В., Гуторов К.М., Курнаев В.А. Генератор интенсивного плазменного потока на основе автоколебательного геликонного разряда. Прикладная физика, 2009, №5, сс.73-75.

12. Визгалов И.В., Гуторов К.М., Курнаев В.А. Влияние тонких диэлектрических пленок на электронную эмиссию и устойчивость плазменно-поверхностного контакта. Известия РАН, серия физическая, 2010, том 74, №2, сс.208--211.

13. Визгалов И.В., Гуторов К.М., Курнаев В.А. Генерация высоковольтных импульсов в автоколебательном разряде. Прикладная физика, 2011. №6 с87-91.

14. 18. Pisarev, A., Moshkunov, K., Vizgalov, I., Gasparyan, Yu. Deuterium trapping in liquid lithium irradiated by deuterium plasma. Journal of Nuclear Materials. 2013, 438 (SUPPL), pp. S1076-S1078.

15. И.В.Визгалов, К.М. Гуторов, И.А. Сорокин, Ф.С. Подоляко. Вольт-амперная характеристика контакта плазмы с электродом с тонкой диэлектрической пленкой на поверхности. Письма в ЖЭТФ, 2014 (том 100), вып. 11, с. 807–810.

16. Баловнев А. В., И.В.Визгалов, Салахутдинов Г. Х. Диагностика аномальной электрон-электронной эмиссии в автоколебательном режиме пучково-плазменного разряда при помощи метода фильтров и термолюминесцентных детекторов. Прикладная физика 2015 №1, сс.40-43.

17. Gutorov, K., Podolyako, F., Sorokin, I., Vizgalov I. Film deposition and their removal in gaps and regions shaded from the plasma in the presence of RF fields. Physics Procedia 71, 2015, pp. 68-72.

18. В.Визгалов, К.М. Гуторов, И.А. Сорокин, Ф.С. Подоляко. О возможности диагностики микротечей воды с помощью автоколебательного разряда. Ядерная физика и инжиниринг, 2015, том 6, № 1–2, с. 73–77.

19. Kurnaev, V., Vizgalov, I., Gutorov, K., Tulenbergenov, T., Sokolov, I., Kolodeshnikov, A., Ignashev, V., Zuev, V., Bogomolova, I.,

Klimov, N. Investigation of plasma-surface interaction at plasma beam facilities Journal of Nuclear Materials, 463, art. no. 48808, 2015, pp. 228-232.

20. K. M. Gutorov, I. A. Sorokin, and F. S. Podolyako, I. Vizgalov. Study of the Interaction of Plasma with Fusion Reactor Materials in Linear Simulators with Beam-Plasma Discharge. Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2016, Vol. 10, No. 3, pp. 612–616.

21. Koval O.A., Vizalov I.V. Using an auto-oscillating beam-plasma discharge to implant ions into dust particles. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2016, V. 80, Issue 2, pp 133-137.

## **2. Тезисы докладов**

22. V.A.Kurnaev, Yu.V.Chernyatiev, Kirnev G.S., Sarychev D.V., Vizgalov I.V. Instabilities of Debye layers in experiments on imitation of SOL plasma-surface interactions. 22 European Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics Bournemouth, (1995), v.III, p.285-288.

23. Визгалов И.В., Кирнев Г.С., Сарычев Д.В. Исследование механизмов зажигания и условий существования самостоятельного ВЧ-автогенерирующего разряда. 8 Всероссийская Конференция по физике газового разряда. Рязань 1996. Материалы конференции ч.1 сс.86-87.

24. Kirnev G.S., Kurnaev V.A., Vizgalov I.V. Unstable plasma-surface interaction in imitation experiments. 23 Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, Kiev, 1996, т. II, сс. 835-838.

25. Kirnev G.S., Kurnaev V.A., Sarytchev D.V., Savjolov A.S., Vizgalov I.V. Penning discharge in regime of RF autogeneration. Proc. of XXII international conf. On phenomena in Ionized Gases, Toulouse, France, 1997, V. II, p.26-27.

26. М.Акел, И.В.Визгалов, В.А.Курнаев. Автоколебательный ВЧ разряд при постоянном напряжении на электродах. XI Всероссийская конференция по физике газового разряда. Рязань 2002. Тезисы докладов, часть 1, с. 94-96.

27. М.Акел, И.В.Визгалов, В.А.Курнаев. Вторично-эмиссионный механизм усиления и генерации электромагнитных колебаний в газовом разряде низкого давления. Девятая научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника». Материалы конференции, Украина, Судак, Сентябрь 2002. с. 219-222.

28. М.Акел, И.В.Визгалов, В.А.Курнаев. Генерация ВЧ электромагнитных колебаний и высоковольтных импульсов в

неустойчивых приэлектродных слоях. XXX Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, 24 – 28 февраля 2003 г.

29. M.Akel, V.A.Kurnaev, I.V.Vizgalov. Observation of a plasma surface instability in a linear edge plasma simulator. 30<sup>th</sup> EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, St Petersburg, Russia, July 7-11, 2003. P-3, 180.

30. М.Акел, И.В.Визгалов, В.А.Курнаев. Метод автоколебательного зонда для диагностики неравновесной плазмы. Материалы IV российского семинара “Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды” Москва, МИФИ, 12-14 ноября 2003, с. 165-166.

31. Zhuravlev A., Kurnaev V., Vizgalov I.V. On possibility of diagnostics mirror restoration in a fusion reactor. 16 Intern.Conf. on plasma-surface interaction in fusion devices. PSII6, 2004.

32. М.Акел, И.В.Визгалов, В.А.Курнаев. Неустойчивость протекания тока через разрядный промежуток с N-образной ВАХ. 31 Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС. 2004, тезисы, с.45.

33. Gasilov S.V., Emmoth B., Pisarev A.A., Vizgalov I.V. Unipolar autooscillating secondary emission discharge as a mechanism of PFM erosion and redeposition in tokamaks. 17 Inter. Conf. Ion-Surface Interactions ISI-2005. v.2 сс. 342-346.

34. Gasilov S.V., Pisarev A.A., Vizgalov I.V. A mechanism of PFM erosion and redeposition in gaps. Int.Conf. on Plasma Surface Interaction in Fusion Devices PSI-17, Hefei, China, 2006 (o-19).

35. К.М. Gutorov, V.A. Kurnaev, I.V.Vizgalov. Auto-excitation of helicon oscillations in a magnetized plasma filled resonator/ 28 ICPIG, July 15-20, 2007, Prague, Czech Republic.

36. К.М. Gutorov, V.A. Kurnaev, I.V.Vizgalov. Excitation of helicon modes due to dynatron instability of plasma-surface interaction. ICPP 2008 proceedings, Fukuoka, Japan, 2008.

37. Gutorov, K.M., Vizgalov, I.V., Kurnaev, V.A., Sorokin, I.A., Podolyako, F.S. High voltage pulses generation in the plasma-beam discharge (2012) 39th EPS Conference on Plasma Physics 2012, EPS 2012 and the 16th International Congress on Plasma Physics, V. 3, pp. 1900-1902.

38. Визгалов И.В., Гуторов К.М. Автоколебательный вторично-эмиссионный разряд. Международная конференция "Физика высокочастотных разрядов", Казань 2011, сборник трудов сс.310-311.

39. Визгалов И.В., Гуторов К.М., Курнаев В.А. Особенности вольт-амперной характеристики электрода с тонкой диэлектрической

пленкой вблизи плавающего потенциала. XX Международная конференция "Взаимодействие ионов с поверхностью", Звенигород 25-29 августа 2011, сборник трудов т.2 сс. 333-335.

40. Визгалов И.В., Гуторов К.М., Подоляко Ф.С., Сорокин И.А. Генерация высоковольтных импульсов из режима стабилизации напряжения коллектора. XXXIX Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 2012.

41. Визгалов И.В., Гуторов К.М., Подоляко Ф.С., Сорокин И.А. Высокочастотный автоколебательный генератор плазменных потоков для комплексной обработки материалов. Всероссийская конференция "Физика низкотемпературной плазмы", Казань. 2014.

42. Визгалов И.В., Гуторов К.М., Сорокин И.А. Модель протекания тока в контакте плазмы с электродом, покрытым тонкой диэлектрической пленкой. Всероссийская конференция "Физика низкотемпературной плазмы", Казань. 2014.

43. Визгалов И.В., И.Л. Манохин. Рентгеновская диагностика аномальной электронной эмиссии в вч-автоколебательном режиме пучково-плазменного разряда. XLIII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 2016. Сборник тезисов докладов. С. 243.