

На правах рукописи

Гуторов Константин Михайлович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОГО
ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАЗМЕННОГО
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ЛИНЕЙНОМ СИМУЛЯТОРЕ С
ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВЫМ РАЗРЯДОМ**

01.04.08 – физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва 2010

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном
университете «МИФИ»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Курнаев Валерий Александрович

Научный консультант: кандидат физико-математических наук,
доцент Визгалов Игорь Викторович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Шустин Евгений Германович

кандидат физико-математических наук,
Хрипунов Борис Иванович

Ведущая организация: Институт общей физики им. А.М. Прохорова
РАН

Защита состоится 27 октября 2010 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.05 в НИЯУ «МИФИ» по адресу: 115409 Москва, Каширское шоссе 31, конференц-зал К-608 корпуса «К», тел. 323-91-67, 324-84-98

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ

Автореферат разослан «___» сентября 2010 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь
диссертационного совета



И.В. Евсеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Взаимодействие плазмы с контактной поверхностью стенок является одной из ключевых проблем термоядерных установок с магнитным удержанием плазмы. Плазменно-поверхностный обмен энергией, веществом и электрическими зарядами способен вызывать неустойчивости плазмы и усложняет контроль над топливом и примесями в установке. В результате, все это влияет на основные параметры реактора: плотность, температуру, время удержания плазмы, периодичность профилактических работ.

Для исследования процессов, происходящих при взаимодействии плазмы с поверхностью, необходимы установки, позволяющие получать плазму, близкую по температуре и плотности к пристеночной плазме термоядерного реактора (ТЯР), и оснащенные различными устройствами диагностики.

Основные критически важные для работы реактора проблемы в области взаимодействия плазмы с поверхностью в установках управляемого термоядерного синтеза это:

1. эрозия поверхности обращенных к плазме элементов установок под действием корпускулярного излучения и тепловых нагрузок на них, стойкость материалов под действием нейтронного облучения
2. накопление изотопов водорода (трития) в материалах стенок и в затененных от прямого воздействия плазмы внутрикамерных элементах;
3. перенос материала в результате осаждения и переосаждения различных конструкционных материалов с образованием смешанных слоев, обладающих свойствами, отличными от свойств исходных материалов;
4. поступление примесей в плазму за счет ее взаимодействия с обращенными к ней элементами и накопление в установке продуктов эрозии в виде пыли;

5. локализованные на периферии неустойчивости, связанные с особенностями плазмо-поверхностного взаимодействия.

Исследования проводятся как непосредственно на термоядерных установках, так и на специальных имитационных стендах. Работа с большими установками затруднена из-за высоких затрат ресурсов и зачастую не позволяет контролировать и выделять интересующие исследователя процессы. Имитаторы позволяют без привлечения значительных ресурсов воспроизвести требуемую ситуацию с необходимым набором диагностик. Наиболее универсальными имитаторами являются линейные симуляторы с продольным магнитным полем. Эти установки позволяют получать плотную плазму и, следовательно, высокие потоки на поверхность.

Наиболее полно изученные аспекты взаимодействия плазмы с поверхностью это распыление и модификация материалов под действием тепловых и радиационных нагрузок. Широко ведутся исследования свойств материалов по отношению к захвату трития, в том числе изучаются материалы с различными пленочными покрытиями. Подавляющее большинство экспериментов по распылению, нагрузкам, захвату, пересадению проводится в условиях стабильной плазмы без неустойчивостей или даже под воздействием только ионных пучков. Однако присутствие плазменно-поверхностных неустойчивостей может существенно менять характер взаимодействия. И если дополнительную термическую нагрузку на материал можно оценить по энергетике неустойчивости, то изменение захвата и осаднения в таких условиях оценить зачастую невозможно.

Широкий диапазон экспериментальных условий и самосогласованность многих нелинейных процессов в плазме, веществе и его приграничных слоях приводят к большому многообразию неустойчивостей на границе плазмы и твердого тела. Достаточно полно исследованы условия образования катодных пятен и униполярных дуг, связанных с локальным перегревом и термоэмиссией контактной поверхности.

Большое значение может иметь неустойчивость электрического контакта между поверхностью с повышенной вторично-эмиссионной способностью и неравновесной плазмой при наличии надтепловой группы электронов. Мгновенная вольт-амперная характеристика (ВАХ) подобного кон-

такта имеет N-образный характер (неоднозначный по току), присущий генераторным и триггерным элементам. Экспериментально такая вторично-эмиссионная (или динаatronная) неустойчивость может проявляться в автогенерации мощных как регулярных, так и стохастических электромагнитных колебаний, а также отдельных импульсов. Соответствующие условия могут возникать в пристеночной области термоядерных установок, при появлении на контактирующей с плазмой поверхности пятен с тонкой диэлектрической пленкой (оксидной, алмазоподобной и д.р.), вызывая паразитные разряды в теневых областях и связанное с ними осаждение углеводородов. Систематические исследования процессов, лежащих в основе данной неустойчивости, практически не проводились. Освоение методов управления этими неустойчивостями позволит контролируемым образом влиять на коэффициенты переноса и эрозию в периферийных областях ТЯР.

Для адекватного моделирования условий термоядерных установок требуется не только создать плотную плазму, но и иметь возможность контролируемого воспроизведения неустойчивостей плазмы, для чего очень хорошо подходит открытая ловушка с пучково-плазменным разрядом.

Изучение вторично-эмиссионных неустойчивостей позволит не только расширить возможности моделирования взаимодействия плазмы с поверхностью, но и использовать вызванные ими автоколебательные режимы для генерации и ускорения заряженных частиц, что и определяет актуальность темы данной работы.

Цель работы

Целью диссертационной работы является изучение высокочастотных автоколебательных режимов генерации плазмы, возникающих в линейном симуляторе с плазменно-пучковым разрядом, и основанных на вторично-эмиссионной неустойчивости взаимодействия плазмы с коллекторами.

Среди основных задач работы можно выделить следующие:

исследование механизма вторичной электрон-электронной эмиссии, ответственного за неустойчивое поверхностно-плазменное взаимодействие,

определение параметров эмитирующих пленок, условий их роста, стабильности, скорости деградации;

исследование возможности развития колебаний между двумя участками поверхности с различными эмиссионными свойствами, связанными линиями магнитного поля, без внешнего источника питания (униполярных автоколебаний);

получение автоколебательного разряда на собственной частоте плазмозаполненного резонатора (геликонный режим) с целью увеличения параметров плазменных потоков, используемых для исследования взаимодействия плазмы с поверхностью.

На защиту выносятся следующие содержащие новизну положения:

- впервые получена генерация автоколебаний геликонного типа в заполненном плазмой резонаторе за счет развития вторичноэмиссионной неустойчивости взаимодействия плазмы с коллектором, исследованы условия возникновения данного типа колебаний;
- впервые показана определяющая роль в развитии автоколебаний в плазменно-пучковой установке тонких диэлектрических пленок на поверхности коллектора, продемонстрирована устойчивость этих пленок в режиме интенсивного облучения водородной плазмой;
- впервые экспериментально обнаружен и идентифицирован униполярный автоколебательный вторичноэмиссионный разряд, исследованы условия его зажигания.

Научная и практическая значимость работы

Автоколебательный геликонный разряд может быть использован для создания плотной плазмы и интенсивных плазменных потоков, как в имитационных установках, так и в технологических. Указанный тип разряда обладает высокой энергоэффективностью и не требует применения высокочастотных систем питания, фидеров, антенн и согласующих устройств.

Данные по условиям роста диэлектрических пленок и условиям возникновения вторично-эмиссионных неустойчивостей могут быть использо-

ваны для анализа возможности возникновения паразитных разрядов в плазменных установках, в том числе и в теневых областях и щелях первой стенки термоядерных реакторов.

Апробация работы

По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, из них 3 в реферируемых журналах из перечня ВАК. Основные результаты диссертационной работы были представлены на:

- Международной конференции по взаимодействию плазмы с поверхностью (PSI-17), Hefei, China, 2006;
- XIV и XVI научно-технических конференциях «Вакуумная наука и техника». Сочи, Россия, 2007 и 2009;
- 28-ой международной конференции по явлениям в ионизированных газах (ICPIG 2007), Prague, Czech Republic, 2007;
- Международном конгрессе по физике плазмы (ICPP 2008), Fukuoka, Japan, 2008;
- Международной конференции по взаимодействию ионов с поверхностью ISI-2009, Звенигород, Россия, 2009;
- Научных сессиях МИФИ 2008, 2009.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа содержит 120 страниц машинописного текста 48 рисунков, 5 таблиц. Список литературы включает 87 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту, изложены научная новизна и практическая ценность работы, описана структура и объем диссертации, приведены сведения об апробации работы и публикациях автора по теме исследования.

В первой главе представлен литературный обзор экспериментальных и теоретических работ по теме диссертации. Описаны современные установки для моделирования плазмы и плазменных процессов в термоядерном реакторе, указаны основные направления исследований, проводимых на этих установках. Выявлены современные требования, предъявляемые к данному классу установок, существующие проблемы и пути их решения. Имитационные установки предназначены для работы в условиях, приближенных к условиям ТЯР, что требует создания достаточно плотной плазмы с высоким энергосодержанием. Эта задача традиционно решается применением удержания плазмы в магнитном поле и использованием мощных плазменных источников.

Источники плазмы проанализированы подробно. В зарубежных установках это обычно дуговые источники, а в российских – пучково-плазменные. В некоторых случаях применяется дополнительный СВЧ нагрев плазмы. Также в последнее время создаются установки с геликонными источниками плазмы, обладающими наибольшей энергоэффективностью. Особое внимание уделено разрядам, в которых присутствует группа высокоэнергетичных электронов (с энергией более 50 эВ), и возможна генерация электромагнитных автоколебаний по вторично-эмиссионному механизму.

В обзоре также приведены механизмы эмиссии электронов, наиболее подробно рассмотрены вторичная электрон-электронная и полевая эмиссии, процессы в сложных эмиттерах. Описан механизм возникновения участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением на ВАХ разрядного промежутка, механизмы возбуждения токовых неустойчивостей и возникновения паразитных разрядов.

На основании приведенных в обзоре материалов делаются следующие выводы:

использование геликонного разряда для создания плазмы в имитационных установках позволит повысить такие параметры как энергоэффективность, стабильность, упростит контроль параметров моделируемого взаимодействия;

требуются тщательные исследования всех процессов, участвующих в развитии автоколебаний, что позволит подавлять или при необходимости контролируемым образом возбуждать колебания в плазме.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальной установки. Установка ПР-2 является открытой адиабатической ловушкой (рис. 1). Ее основой является охлаждаемая вакуумная камера цилиндрической формы (длина 2,5 м, диаметр 0,36 м), выполненная из нержавеющей стали, высоковакуумная откачка производится двумя диффузионными насосами. Основные параметры установки: магнитное поле до 0,5 Тл, давление рабочего газа – 10^{-1} - 10^3 Па, давление остаточного газа 10^{-3} Па, плотность генерируемой плазмы до 10^{19} м $^{-3}$, электронная температура 5-25 эВ.

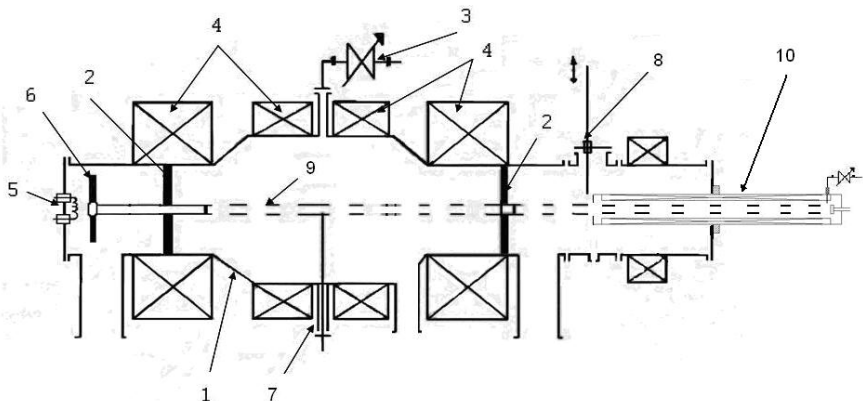


Рис. 1. Схема установки ПР-2: 1 – вакуумная камера; 2 – диафрагмы; 3 – система газонапуска; 4 – катушки магнитного поля; 5 – катод; 6 – анод; 7 – ленгмюровский зонд; 8 – шлюзовое устройство; 9 – плазменный шнур; 10 – малогабаритный газоразрядный модуль

На установке ПР-2 доступны следующие средства диагностики плазмы: зонды Ленгмюра, оптическая спектроскопия, установлены масс-спектрометр и квадрупольный спектрометр.

Основной способ создания плазмы – пучково-плазменный разряд (ППР), инициируемый электронным пучком с током 0,3-2 А и энергией электронов 0,5-5 кэВ. Электронная пушка установлена на торцевом фланце установки, на противоположном фланце может устанавливаться коллектор с высокой вторично-эмиссионной способностью или специальный малогабаритный газоразрядный модуль (рис. 2).

Газоразрядный модуль наиболее удобен для возбуждения автоколебаний, позволяет снизить расход рабочего газа за счет собственной системы напуска, при этом давление в модуле превышает давление в основной камере. Газоразрядный модуль мобилен, что делает возможным его применение на других установках. Размеры модуля: длина 0,8 м, внутренний диаметр 5 см. Модуль обладает собственной системой создания магнитного поля на основе охлаждаемых водой токовых катушек. При токе 100 А напряженность магнитного поля составляет 450 Гс.

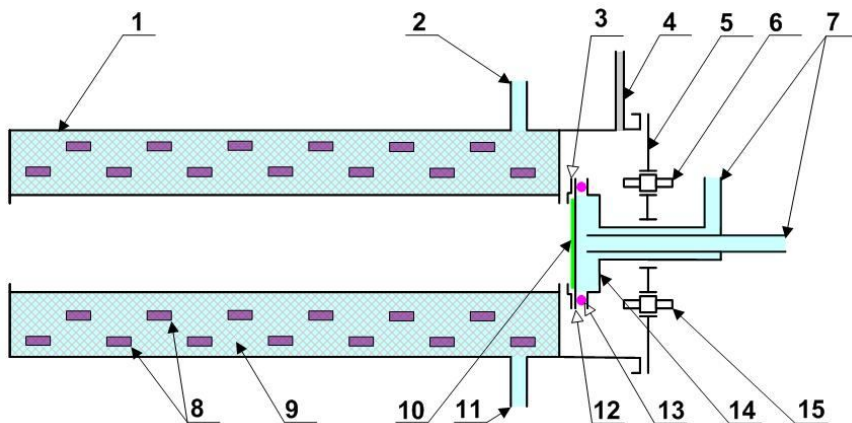


Рис. 2. Схема малогабаритного газоразрядного модуля.

1 – корпус модуля; 2, 11 – ввод и вывод водяного охлаждения соленоида; 3 – прижимное кольцо мишени; 4 – газовый натекаль; 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 модуля закрыт фланцем с охлаждаемым водой коллекторным устройством, позволяющим использовать в качестве коллектора сменные тонкие пластины из различных материалов, что очень удобно для изучения эмиссионных свойств материалов и модификации их поверхности под воздействием плазменного облучения.

Третья глава посвящена исследованию автоколебательного геликонного режима. Условием возникновения автоколебаний является наличие неустойчивости электрического контакта между коллектором электронного пучка (холодным вторичноэмиссионным катодом) и плазмой разряда, обусловленной N-образной мгновенной ВАХ катода с повышенной электрон-электронной эмиссией. Падающий участок ВАХ с отрицательным дифференциальным сопротивлением способствует развитию неустойчивости, при этом катод работает как усилительный элемент.

Эксперимент проводился с использованием малогабаритного газоразрядного модуля, являющегося в данном случае плазмозаполненным резонатором, на собственных частотах которого и возникают колебания. Резонатор может быть открытого типа, при этом плазма распространяется по разрядному каналу на значительное расстояние от выходного отверстия модуля, или закрытого типа, когда выходное отверстие перекрыто диафрагмой или облучаемым образцом. Для возникновения колебаний необходимо первоначальное заполнение модуля форплазмой, обеспечивающей присутствие высокоэнергетичных электронов для развития неустойчивости плазменно-поверхностного контакта и достижение требуемого порога по плотности для распространения волн внутри замагниченной плазмы. В описываемых экспериментах пучково-плазменный разряд в водороде при давлении 10^{-2} - 10^{-1} Па обеспечивал предварительное заполнение модуля плазмой с плотностью $n = 10^{17} \text{ м}^{-3}$.

Перевод разряда в автоколебательный режим осуществляется подачей отрицательного напряжения на холодный катод. С ростом величины смещения увеличивается ток разряда, а после достижения порогового значения, соответствующего началу падающего участка ВАХ (обычно в интер-

вале 100 – 200 В), происходит переход от устойчивого режима к неустойчивому. При дальнейшем увеличении смещения (до значений, соответствующих середине падающего участка ВАХ) устанавливается колебательный режим. Мощность вкладывается в разряд через поддерживаемый источником напряжения смещения ток вторичных электронов с холодного катода, а также за счет возникновения переменных полей и ускорения ионов в приповерхностном слое. В колебательном режиме величина среднего тока с катода в несколько раз превышает величину тока в режиме без колебаний. Этот эффект является следствием экстремально высокой вторичной электрон-электронной эмиссии, обусловленной присутствием группы высокоэнергетичных электронов в плазме и наличием сильного переменного электрического поля в тонком диэлектрическом слое на поверхности катода. Фактически, имеет место стимулированная электронами полевая эмиссия, причем плазменный контакт снимает ограничение тока объемным зарядом, существующее в вакуумном случае. Изначально высокоэнергетичная группа электронов в плазме создается электронной пушкой, обеспечивающей горение ППР, но при переходе в колебательный режим для поддержания разряда достаточно высокоэнергетичных электронов, образующихся непосредственно в самом разряде.

Переход к автоколебательному разряду на собственной частоте плазмозаполненного резонатора сопровождается изменением свечения плазменного шнура (рис. 3). Справа на фотографиях виден торец резонатора с выходным отверстием, из которого вытекает плазма. Хорошо заметно увеличение интенсивности свечения, занимаемого плазмой объема. В автоколебательном режиме разряд продолжает устойчиво гореть и после выключения электронной пушки, обеспечивавшей предварительное заполнение резонатора плазмой ППР. Плазменный шнур транспортируется вдоль магнитного поля на значительные расстояния от выхода из резонатора, что свидетельствует о распространении электромагнитных волн в объеме плазменного шнура (эффект каналирования разряда). Наличие переменных полей в плазме повышает эффективность передачи энергии, приводя к возрастанию плотности плазмы.

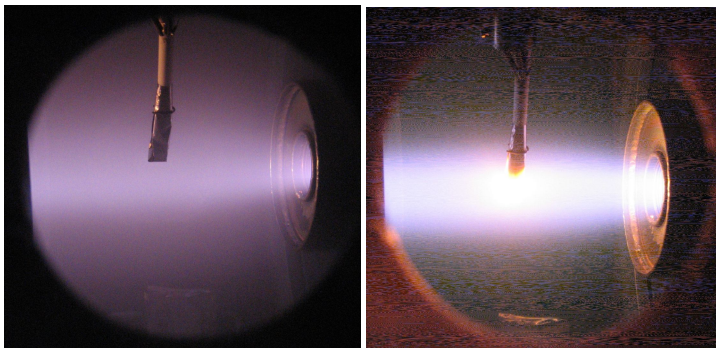


Рис. 3. ППР (слева) и автоколебательный разряд (справа)

В цепи разряда наблюдаются колебания тока с амплитудой, превышающей величину постоянного тока от источника смещения. Также наблюдаются колебания потенциала холодного катода из-за наличия паразитной индуктивности между ним и шунтирующим конденсатором (при отсутствии этой паразитной индуктивности потенциал катода должен быть постоянен, колебания должны присутствовать только внутри резонатора). На рис. 4 представлена типичная осциллограмма высокочастотных колебаний напряжения и тока холодно-эмиссионного катода при смещении минус 300 В. На рис. 5 показан Фурье спектр колебаний тока. В этом режиме вторая гармоника является самой мощной.

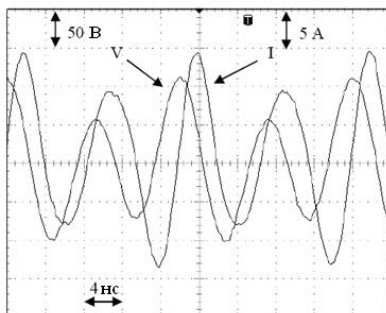


Рис. 4. ВЧ компоненты напряжения и тока катода при постоянном смещении на нем -300 В

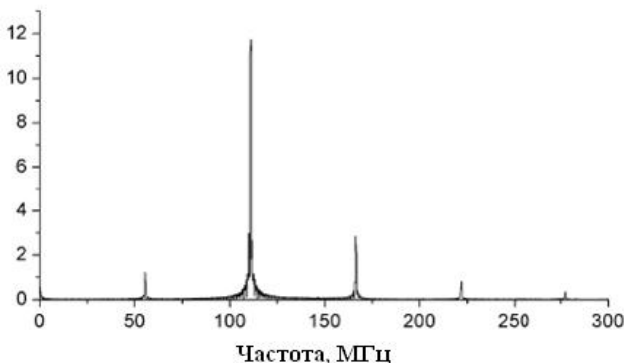


Рис. 5. Фурье-спектр переменного тока

Подавление первой гармоники можно объяснить повышенной диссипацией из-за близости ее частоты к частоте нижнегибридного резонанса. В общем случае гармонический состав колебаний зависит от давления рабочего газа, магнитного поля, электрического смещения и может варьироваться в широких пределах. Частота основной гармоники (~ 50 МГц) не зависит от параметров внешнего фильтра источника постоянного тока, но изменяется с плотностью плазмы и магнитным полем. Это говорит о том, что частота определяется именно параметрами резонатора. Пики на Фурье-спектре узкие, что свидетельствует о высокой добротности резонатора, которая может быть оценена как 50-100. На высокую добротность указывает также амплитуда колебаний тока, превышающая величину постоянного тока, отбираемого от источника.

Высокая добротность означает малую диссипацию распространяющихся электромагнитных волн, на это также указывает и эффект каналирования разряда. Высокая плотность плазмы и каналирование свидетельствуют о наличии волн в объеме плазмы. Частота основной гармоники выше частоты нижнегибридного резонанса и значительно ниже электронной циклотронной частоты. Все это говорит о том, что в плазмозаполненном резонаторе возбуждаются электромагнитные колебания геликонного типа.

Анализ показывает, что зависимость резонансной частоты от величины магнитного поля и плотности плазмы находится в хорошем согласии с

дисперсионными соотношениями для стоячих геликонных волн моды $m = 0$. Измеренная резонансная частота вместе с известным магнитным полем и размерами резонатора позволяют оценить плотность плазмы из дисперсионного соотношения для геликонных волн:

$$T^2 = \alpha^2 - k^2, \quad \alpha = \frac{ne\mu_0}{B_0} \frac{\omega}{k},$$

где μ_0 – магнитная проницаемость, e – заряд электрона, $B_0 = 600$ Гс – продольное магнитное поле, ω – частота основной гармоники, α – полное волновое число, $k \approx \pi/2 \cdot l$ (для открытого резонатора) – продольное волновое число, T – поперечное волновое число. Усредненная плотность плазмы в резонаторе $n \approx 2,2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$. Это значение подтверждается зондовыми измерениями на выходе из резонатора.

Для режима с возбуждением геликонных автоколебаний предложена возможная структура стоячих волн в резонаторе. Из проведенного анализа следует, что для проводящей и для диэлектрической стенки граничные условия совпадают. В силу слабого затухания геликонных волн их высокочастотная мощность может каналироваться на значительные расстояния от зоны генерации по плазменному потоку, истекающему из резонатора вдоль магнитного поля. При этом потери частиц и энергии из канала могут компенсироваться за счет затухания волны. Такой эффект позволяет пространственно разделить зону генерации плазмы и мишень на значительно большие расстояния по сравнению с другими типами разрядов.

Зависимости от радиуса для стоячих волн, возбуждающихся в цилиндрическом резонаторе, описываются функциями Бесселя первого рода J_0 и J_1 . Простейший случай аксиально-симметричных колебаний соответствует моде $m = 0$, когда максимумы B_z и j_z расположены на оси. При этом условие на границе запишется как $J_1(Ta) = 0$ или согласно графику функций Бесселя $Ta \sim 3,83$. Учитывая граничные условия, компоненты магнитного и электрического полей в геликонном разряде для аксиально-симметричных колебаний (мода $m = 0$) можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned}
B_z &= ATJ_0(Tr) \cos(kz - \omega t) & E_z &= 0 \\
B_r &= AkJ_1(Tr) \sin(kz - \omega t) & E_r &= A \frac{\alpha \omega}{k} J_1(Tr) \cos(kz - \omega t) \\
B_\varphi &= A \alpha J_1(Tr) \cos(kz - \omega t) & E_\varphi &= -A \alpha J_1(Tr) \sin(kz - \omega t)
\end{aligned}$$

На поверхности пластины холодного катода может существовать только нормальное электрическое поле, т.е. тангенциальные составляющие E_φ , E_r должны обращаться в нуль. Поскольку эти составляющие сдвинуты на четверть периода, это условие не может выполняться одновременно. Но благодаря плазменно-поверхностному контакту у катода существует слой с объемным зарядом, граница которого может перемещаться вместе с колебаниями (см. рис.6). Поэтому радиальное электростатическое поле E_r (связанное с объемными зарядами) может существовать в плазме вблизи границ слоя. Колебания границы слоя объемного заряда согласованы с колебаниями поля E_r . Чисто вихревое азимутальное поле может существовать только вдали от электродов. Низший по частоте тип стоячих волн соответствует положению максимума E_φ на выходе из открытого резонатора.

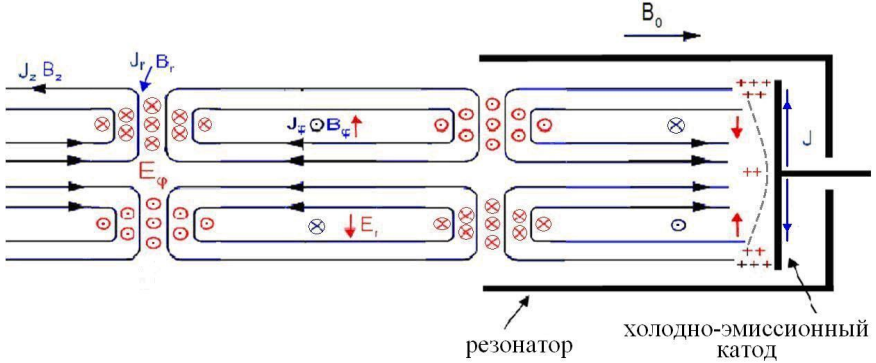


Рис. 6. Схематичное изображение токов, электрических и магнитных полей, возбуждаемых в геликонной волне в открытом резонаторе в автоколебательном режиме

Геликонный автоколебательный разряд позволяет получать плотную водородную плазму без использования высокочастотных систем питания.

Данный тип разряда может успешно применяться в имитационных или технологических установках.

Четвертая глава посвящена влиянию диэлектрических пленок на поверхности коллектора (холодного катода) на вторичную электрон-электронную эмиссию. Например, оксидная пленка на поверхности электрода значительно повышает его эмиссионную способность, поскольку не только повышается коэффициент вторичной эмиссии, но и создаются условия для возникновения полевой эмиссии.

В работе были исследованы пленки оксида алюминия на поверхности чистого алюминия и алюминиевого сплава Д16, а также пленки оксида кремния на поверхности стали Х18Н10Т. Алюминий легко образует окисные пленки, удобен для самовозбуждения колебаний и по своим свойствам близок к бериллию – материалу первой стенки термоядерного реактора ИТЭР. Сплав Д16 – один из наиболее распространенных алюминиевых сплавов – содержит включения меди и магния, что дает возможность выделить влияние неоднородностей поверхности и инородных включений на эмиссионную способность поверхности. Оксид кремния является очень хорошим диэлектриком, а кремний не окисляется на атмосфере, что исключает изменение поверхности после извлечения образца из установки.

Пленки формировались непосредственно в установке на сменных коллекторных пластинах в газоразрядном модуле. Пленки оксида алюминия формировались за счет окисления фоновым кислородом при облучении водородной плазмой. Пленки оксида кремния наносились методом пересадки в аргоновом разряде. Индикатором формирования пленки служило появление устойчивых колебаний в цепи коллекторного устройства, на которое подавалось отрицательное смещение от внешнего источника питания. Как показали эксперименты, подготовленные образцы с пленкой на поверхности способны стабильно (несколько часов на протяжении рабочей смены) работать в качестве холодных катодов в разрядах на водороде с самовозбуждением колебаний.

Для анализа поверхности коллектора установки были использованы шесть образцов: образцы из алюминия и сплава Д16 с оксидной пленкой на поверхности, работавшей в колебательном режиме горения разряда; образ-

цы из алюминия и сплава Д16, на которых пленка после работы в колебательном режиме была счищена аргоновой плазмой; образец с пленкой оксида кремния, работавшей в колебательном режиме горения разряда; и образец с толстой пленкой оксида кремния, на которой колебаний не наблюдалось.

Анализ топографии поверхности пленки был проведен с помощью растрового электронного микроскопа. Измерения проводились на приборах САМЕВАХ (ИФХЭ РАН) и Karl Zeiss (НИЯУ МИФИ). Химический состав поверхности мишени определялся методом электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа (РСМА), который основан на регистрации характеристического рентгеновского излучения, возникающего в приповерхностных слоях образца в результате облучения электронами с энергией в десятки кэВ, и реализован как приставка к сканирующему электронному микроскопу. Толщина пленок определялась на основе данных рентгеноспектрального анализа по содержанию кислорода и кремния при помощи специализированной программы для микроскопа САМЕВАХ.

Поверхности образцов из алюминия и сплава Д16 со сформированной в водородном разряде пленкой, отличаются незначительно, поверхность обоих материалов однородная и шероховатая. Поверхность образцов с пленкой, работавшей в режиме с самовозбуждением колебаний, покрыта микропорами (рис. 7). На поверхности образцов, очищенных от пленки в аргоновом разряде, микропористость не наблюдается (рис. 7), хотя во всем остальном рельеф поверхности аналогичен образцам с пленкой. Формирование пор связано с особенностями роста пленки оксида при интенсивном облучении поверхности ионами водорода из плазмы в автоколебательном разряде (энергия ионов ~ 300 эВ, ток $\sim 0,2 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$). Похожей пористости добиваются при формировании пленок оксида алюминия электролитическим анодированием.

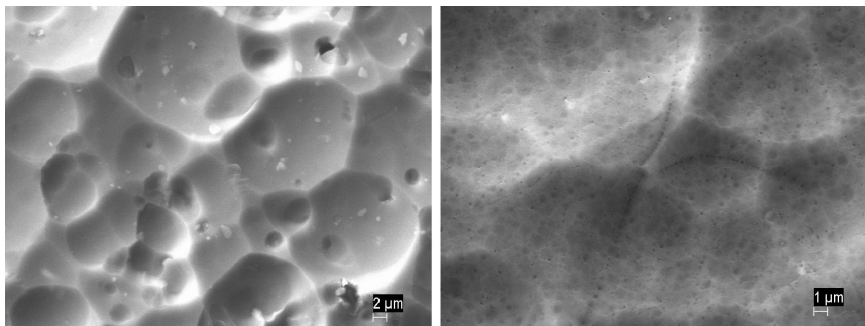


Рис. 7. Фотографии очищенной аргоном поверхности (слева) и покрытой пористой пленкой (справа)

На образцах, очищенных в аргоне, толщина пленки оксида составила 2 нм. Эта величина соответствует толщине естественного оксида алюминия, образующегося на поверхности алюминия при контакте с атмосферой. Для образцов, на которых наблюдались колебания в водородной плазме, толщина пленки составила 5 нм, что превышает толщину естественной оксидной пленки. Можно заключить, что в условиях облучения водородной плазмой пленка окисла на поверхности алюминия существует стабильно, что позволяет поддерживать автоколебательный разряд на водороде неограниченно долго.

Поверхность образца из нержавеющей стали с пленкой оксида кремния, работавшей в режиме самовозбуждения колебаний в разряде на водороде, гладкая и без пористости. Толщина пленки оксида кремния на образце 4–5 нм. Колебания не возникали на образцах, поверхность которых покрыта «толстой» пленкой оксида кремния. При анализе поверхности таких образцов обнаружены участки с пленкой толщиной 15–40 нм, участки с толщиной пленки около 300 нм, а также участки со следами пробоя пленки, представляющие собой «звездочки» со следами плавления и выброса вещества из канала пробоя по центру. В предположении, что данная диэлектрическая пленка пробивается по механизму пробоя плоского конденсатора, были проведены расчеты энергобаланса этого процесса. Выделяющаяся энергия (~ 10 мкДж) превышает затраты на плавление канала, поэтому также возможно испарение части материала в области центрального керна

пробоя и выброс материала в плазму. Выброс материала при пробоях наблюдался и непосредственно в эксперименте (вылетающие с поверхности пластины светящиеся точки).

Результаты микроскопического исследования образцов с пленками оксида алюминия и оксида кремния показывают, что повышенной эмиссионной способностью обладают поверхности с диэлектрическими пленками толщиной 4–10 нм. В условиях контакта с плазмой в таких тонких пленках существует электрическое поле с очень высокой напряженностью (свыше $10^6 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}$), что достаточно для полевой эмиссии электронов из металлической подложки. Электроны легко проходят сквозь тонкую диэлектрическую пленку и эмитируются в плазму. Описываемая ситуация аналогична явлениям в структурах металл-диэлектрик-металл, только в роли одного из электродов выступает плазма. Доказательством того, что повышенная эмиссия не является следствием топографии рельефа поверхности (острия, поры и т.п.), а вызвана присутствием тонкой пленки, служит факт горения автоколебательного разряда на образце с осажденной на нержавеющей сплав пленкой оксида кремния. Как следует из результатов микроскопии, эта пленка гладкая и не имеет особенностей, способных вызывать повышенную эмиссию. Еще одним доказательством приведенной модели эмиссии является отсутствие самовозбуждения колебаний при работе с пленками толщиной более 50 нм. С ростом толщины пленки снижается напряженность поля и затрудняется транспорт электронов через нее.

Исследованные диэлектрические пленки могут неограниченно долго существовать в условиях интенсивного облучения водородной плазмой при условии присутствия кислорода в фоновом газе (на уровне долей процента). При этом процессы восстановления пленки водородом плазмы и окисления фоновым кислородом находятся в равновесии. Распыление материала пленки ионами водорода с энергией ниже 400 эВ пренебрежимо мало. Стабильное существование пленок позволяет применять их в качестве катодов для автоколебательных разрядов в водороде.

Таким образом, установлено, что тонкие (4–10 нм) диэлектрические пленки на поверхности контактирующего с плазмой электрода способны существенно повышать его эмиссионную способность, приводя к развитию

неустойчивостей плазмо-поверхностного контакта. Соответствующие автоколебательные режимы горения разряда возможны не только на собственной диэлектрической пленке, образуемой в результате окисления подложки, но и на пленках, осажденных на подложках с низкой эмиссионной способностью. Предложен возможный механизм эрозии переосажденных диэлектрических слоев, при котором неустойчивость протекания тока через контактный слой с нанометровой толщиной вызывает перенапряжение и пробой в периферийном слое диэлектрика микронной толщины по механизму конденсатора, сопровождающийся расплавлением материала пленки и выбросом части вещества в плазму.

Пятая глава посвящена изучению униполярных автоколебательных разрядов. При определенных условиях повышенное отрицательное смещение на холодном катоде можно создать и без внешнего источника питания.

Если плазма содержит быстрый электронный компонент, отрицательный плавающий потенциал погруженного в плазму электрода с низким коэффициентом вторичной электронной эмиссии может увеличиваться до нескольких сотен вольт. При больших площадях электрода и плотности плазмы ионный ток насыщения достигает 2-4 А. Таким образом, при внешнем замыкании на коллектор с повышенной эмиссией, такой электрод будет выполнять роль источника отрицательного смещения для коллектора. Внутри установки цепь замыкается плазменным шнуром при условии, что поверхности электродов соединяются линиями магнитного поля. Возникает колебательный контур с током, где высокоэмиссионная область играет роль нелинейной нагрузки, а низкоэмиссионная – источника ЭДС.

При определенных условиях возможен случай, когда ВАХ низкоэмиссионного электрода пересекается с N-образной ВАХ высокоэмиссионного коллектора на падающем участке (рис. 8), тогда в цепи будут возбуждаться автоколебания. При этом ток в цепи протекает без внешнего источника питания подобно циркуляции тока в униполярных дугах. Принципиальным отличием является форма ВАХ эмиссионного пятна. В рассматриваемом случае она имеет N-образную форму, а в униполярных дугах – S-образную. С этим связано кардинальное отличие в развитии неустойчивостей при протекании тока через плазменно-поверхностный контакт: в униполярных

дугах происходит стягивание разряда в катодные пятна, а в условиях вторично-эмиссионного разряда – стратификация.

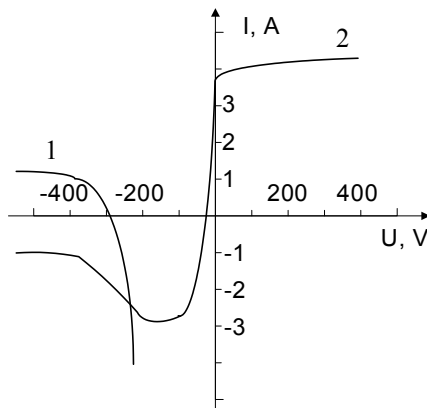


Рис. 8. Пересечение ВАХ низкоэмиссионного электрода (1) и высокоэмиссионного коллектора (2) на участке отрицательного дифференциального сопротивления

Визуально переход в режим колебаний сопровождается значительным уширением пучка (в 3-5 раз) и увеличением яркости свечения плазмы, на периферии наблюдаются мощные пробои между электродами, в основе которых, скорее всего, лежит мультипакторный механизм (размножение электронов на электродах и их ускорение в межэлектродном промежутке переменным напряжением). Амплитуды переменного тока и напряжения, возникающих во время разряда, значительно превышают постоянные составляющие, при этом энергия ионов, бомбардирующих коллектор, может оказаться выше порога распыления. Частотный диапазон разрядов лежит в интервале от 5МГц до 100МГц.

При такой частоте колебаний и наблюдаемой величине переменного напряжения возможно возникновение вторичных ВЧ разрядов в полостях, по поверхности которых текут высокочастотные токи автоколебательного разряда (рис. 9).

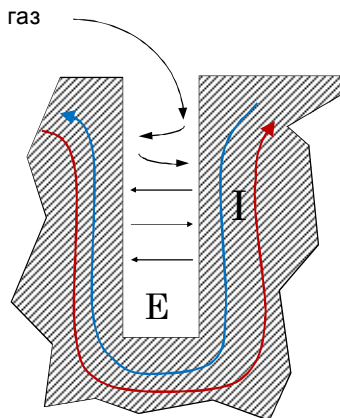


Рис. 9. Возникновение переменного поля и зажигание паразитного разряда в полости при протекании по ее стенкам высокочастотного тока

На установке было продемонстрировано возникновение паразитного разряда в зазоре (0,5-1 мм) между двумя пластинами, находящимися в тени диафрагмы на расстоянии 10 см от плазмы основного разряда. В зазоре наблюдалось осаждение углеводородных пленок. Такие разряды могут быть причиной образования паразитной плазмы в теневых областях термоядерных установок.

Результаты экспериментов демонстрируют возможность развития автоколебаний между двумя поверхностями с различными эмиссионными свойствами и соединенными линиями магнитного поля. При этом возможны паразитные разряды в полостях на поверхности, по которой замыкается цепь разряда.

В заключении представлены выводы и основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты работы

- 1) Получен автоколебательный геликонный разряд в заполненном плазмой резонаторе, исследованы условия возникновения данного типа колебаний;
- 2) Автоколебательный геликонный разряд реализован в малогабаритном мобильном модуле, допускающем его использование на других технологических и исследовательских установках;
- 3) Показана определяющая роль тонких диэлектрических пленок (4-10 нм) на поверхности коллектора в возникновении автоколебательного разряда;
- 4) Продемонстрирована устойчивость эмиссионных пленок в режиме интенсивного облучения водородной плазмой, что позволяет использовать автоколебательный разряд как основное средство для получения интенсивных потоков ионов в имитационных установках;
- 5) Получен автоколебательный разряд на пленке оксида кремния, что позволяет использовать данный тип разряда в технологических установках напыления пленок оксида кремния и исключить поступление инородных примесей с катода в плазму;
- 6) Экспериментально обнаружено возникновение униполярного автоколебательного вторично эмиссионного разряда, исследованы условия его зажигания.

Список публикаций

- 1) I.V. Vizgalov, A.A. Pisarev, K.M. Gutorov, «A mechanism of PFM erosion and redeposition in gaps» // Journal of Nuclear Materials, v. 363-365, iss. 0, 2007, p. 966-971.
- 2) Гуторов К.М., Визгалов И.В., Курнаев В.А., «Плазменный генератор на основе автоколебательного геликонного разряда» // Материалы XIV научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника». М.: МИЭМ. 2007, с. 148.
- 3) К.М. Gutorov, I.V. Vizgalov, V.A. Kurnaev, « Auto-excitation of helicon oscillations in a magnetized plasma filled resonator » // 28-th ICPIG 2007 proceedings, Prague, 2007.

- 4) Гуторов К.М., Визгалов И.В., Курнаев В.А., «Автовозбуждение геликонных колебаний в резонаторе с замагниченной плазмой» // Научная сессия МИФИ 2008, Сборник научных трудов. Том 2, с. 24-25.
- 5) K.M. Gutorov, I.V. Vizgalov, V.A. Kurnaev, «Excitation of helicon modes due to dynatron instability of plasma-surface interaction» // ICPP 2008 proceedings, Fukuoka, Japan, 2008.
- 6) Гуторов К.М., Визгалов И.В., Маркина Е.А., «Холодный катод в автоколебательном разряде» // Научная сессия МИФИ 2009, Сборник научных трудов.
- 7) Гуторов К.М., Визгалов И.В., Маркина Е.А., Курнаев В.А., «Влияние тонких диэлектрических пленок на электронную эмиссию и устойчивость плазмо-поверхностного контакта» // Труды 19-й международной конференции ВИП-2009, том 1 с. 348-351.
- 8) Гуторов К.М., Визгалов И.В., Курнаев В.А., «Генератор плазмы на основе автоколебательного геликонного разряда» // ПРИКЛАДНАЯ ФИЗИКА, №5 2009, с. 73.
- 9) Гуторов К.М., Визгалов И.В., Курнаев В.А., «Автоколебательный геликонный разряд в водороде» // Материалы XVI научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника». 2009, с. 148-151.
- 10) Гуторов К.М., Визгалов И.В., Маркина Е.А., Курнаев В.А., «Влияние тонких диэлектрических пленок на электронную эмиссию и устойчивость плазмо-поверхностного контакта» // ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2010, том 74, № 2, с. 208–211.