МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Bueger

Кодирзода Заъфари Абдуламин

Структура электромагнитного поля и резонансы в высокочастотных емкостных разрядах низкого давления

01.04.08 – Физика плазмы

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

Работа выполнена на кафедре теоретической физики физического факультета Таджикского национального университета и кафедре физической электроники физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Научные руководители –	Двинин Сергей Александрович д.фм.н., доцент Солихов Давлат Куватович, д.фм.н., доцент
Официальные оппоненты –	Гусейн-заде Намик Гусейнага оглы, д.ф м.н., профессор, Институт Общей Физики им. А.М. Прохорова Российской Академии Наук, зав. отделом. Лебедев Юрий Анатольевич, д.фм.н., доцент, Институт Нефтехимического синтеза имени А.В. Топчиева Российской Академии наук, зав. лабораторией Бобров Виктор Борисович, к.фм.н, доцент, Объединенный Институт Высоких Температур Российской Академии Наук, с.н.с.

Защита диссертации состоится « 18» мая 2022 г. в _____ на заседании диссертационного совета МГУ.01.12 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр.2, Физический факультет МГУ, ауд. _____.

E-mail: igorkartashov@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский просп., д.27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»:

https://istina.msu.ru/dissertations/449238239/

Автореферат разослан «_12_» апреля 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, к.ф.-м.н.

Uml.

И.Н. Карташов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Высокочастотные емкостные (ВЧЕ) разряды низкого давления широко используются для сухого травления тонких пленок И плазменного химического осаждения (ПХО) для производства полупроводникового дисплеев [A1 _ A3]. оборудования И ПЛОСКО панельных Развитие экспериментальных И технологических установок, сопровождалось увеличением как их размеров, так и плотности плазмы, и привело к тому, что межэлектродное расстояние 2L и размеры электродов R стали превышать глубину скин слоя $\Delta_s = c/\omega_{Pe}$. Необходимость увеличения плотности электронов увеличения скорости травления И формирования для монохроматической функции распределения ионов, бомбардирующих подложку, по скоростям обусловило необходимость увеличения частоты поля $f=\omega/2\pi$, поддерживающего плазму, вплоть до 100–200 МГц [A4, A5, A6]. В этих условиях квазистатическое описание разряда низкого давления (эффективная частота столкновений электронов $\nu < \omega$) становится недостаточным. Неоднородность пространственного распределения поля влечет за собой необходимость учета электромагнитных эффектов – скин эффекта и возбуждения поверхностных волн, распространяющихся вдоль трехслойной структуры: слой пространственного заряда (СПЗ) – плазма – слой пространственного заряда, окруженной активным электродом И подложкодержателем, приводит к неоднородности распределения плотности плазмы и скорости обработки материалов при размере электродов больше 300 мм. При производстве плоских дисплеев и солнечных батарей используют подложки большего размера, на которых радиальная неоднородность поля наблюдается даже на частоте 13.56 МГц [А1, А2]. Для достижения однородности процесса в технологических установках применяют электроды специальной формы с использованием нескольких каналов подвода энергии и многочастотного возбуждения плазмы. Как правило, эти методы компенсации неоднородности поля хорошо работают только в пределах ограниченной области параметров, а изменение существующих режимов работы технологических установок для реализации новых процессов требует проведения длительных и дорогостоящих экспериментов. Были построены теории разряда малого размера в условиях сильного скин-эффекта [А7] и электродами большой площади, поддерживаемого только разряда с поверхностными волнами [А8 – А11]. Однако для теоретического описания разряда и расчета пространственного распределения необходимо учитывать как возбуждение поверхностных волн, так и высших нераспространяющихся мод поля. К началу настоящей работы такие исследования отсутствовали.

Таким образом, представляется необходимым провести теоретические исследования пространственного распределения электромагнитного поля в разряде и его эволюции при изменении параметров плазмы и размеров экспериментальной установки. Одновременно необходимо провести расчеты импеданса разряда, так как изменение импеданса может привести к неустойчивости определенных форм разряда, которые могли бы быть перспективными при реализации технологических процессов. Из сказанного следует, что тема диссертационной работы является актуальной.

Объект исследования

Емкостный высокочастотный разряд низкого давления.

Предмет исследования

Электродинамические характеристики (импеданс и пространственное распределение электромагнитного поля) емкостного высокочастотного разряда при произвольном соотношении между характерными размерами разряда и длинами электромагнитных волн, распространяющихся в разряде.

Цель данной работы:

Провести аналитический и численный расчет пространственного распределения высокочастотного (ВЧ) поля в разрядной камере (включая плазму и слой пространственного заряда (СПЗ)) в широком диапазоне плотностей электронов и частот ВЧ поля, поддерживающего плазму, и нескольких типичных конфигураций рабочей камеры и электродов. На основании полученных результатов проанализировать причины появления физические условия наблюдения неоднородности поля И электродинамических резонансов в плазме и указать возможные способы ВЧ управления пространственным распределением поля, плотности электронов и положением резонансных точек на оси плотностей электронов.

Для достижения цели данной работы были поставлены следующие задачи исследования.

1. Аналитически исследовать дисперсию и пространственную структуру распространяющихся и не распространяющихся собственных электромагнитных волн в ВЧЕ разряде с электродами большой площади.

2. Аналитически рассчитать амплитуды собственных волн для нескольких различных способов возбуждения разряди.

3. Получить приближенные аналитические формулы для импеданса разряда при одновременном учете как нераспространяющихся мод, так и поверхностных волн.

4. Провести компьютерное моделирование пространственного распределения высокочастотного поля в технологическом плазменном реакторе и импеданса этого реактора и сравнить полученные результаты с результатами расчета по приближенным аналитическим формулам. Проанализировать физические механизмы управления пространственным

распределением поля в плазме и импедансом разряда в целом.

5. Аналитически и с помощью численного моделирования изучить систему собственных волн в разрядной камере и рассчитать дисперсионные кривые для четных и нечетных волн в трехслойной структуре слой-плазмаслой, окружённой металлическими границами, и аналитически и численно рассчитать импеданс разряда и также пространственное распределение электромагнитного поля в различных условиях.

Методы исследования – Аналитическое и численное (методом конечных элементов, пакет Comsol Multiphysics®) решение уравнений Максвелла для типичных конфигураций рабочей камеры технологических плазмохимических установок. Использовалось приближение холодной плазмы и матричная модель слоя пространственного заряда между плазмой и стенками камеры.

Научная новизна

1. Впервые рассчитаны дисперсионные кривые для четной и нечетной поверхностных волн и нераспространяющихся волн в трехслойной структуре слой-плазма-слой, окруженной металлическими границами, при описании слоя пространственного заряда в рамках матричной модели в широком диапазоне параметров плазмы для одинаковой и разной толщины слоев. Впервые исследовано изменение дисперсии собственных волн при изменении частоты столкновений в плазме в окрестности удвоенной критической плотности плазмы.

2. Впервые аналитически рассчитаны амплитуды поверхностных и нераспространяющихся волн в симметричном высокочастотном (ВЧ) емкостном разряде для частично и полностью заполненной плазмой цилиндрической разрядной камеры при симметричном и несимметричном возбуждении как функции плотности плазмы.

3. Впервые получены приближенные аналитические формулы для импеданса ВЧ емкостного разряда, учитывающие возбуждение как поверхностных, так и нераспространяющихся волн, и проведен расчет импеданса по этим формулам для типичных конфигураций технологических установок.

4. Впервые проведено систематическое математическое моделирование электродинамических эффектов в ВЧ емкостном разряде с электродами большой площади (пространственного распределения поля и импеданса разряда) для частично и полностью заполненной рабочей камеры. При расчетах использовался пакет программ Comsol Multiphysics®.

5. Предложена интерпретация различий в численных и аналитических расчетах, позволяющая качественно проанализировать физические процессы, не учитываемые в предложенных аналитических моделях, и дающая возможность построения более сложных моделей.

5

Теоретическая значимость работы.

Впервые получены аналитические формулы для амплитуд собственных волн (как поверхностных, так и нераспространяющихся мод) в высокочастотном емкостном разряде при учете электромагнитных эффектов.

Практическая значимость работы.

1. Впервые получены приближенные аналитические формулы для импеданса ВЧЕ разряда с электродами большой площади для полностью и частично заполненной плазмой разрядной камеры с учетом влияния внешней линии передачи, подводящей энергию к плазме.

2. Показано, что учет поля основной моды поля (квази-ТЕМ моды для малых плотностей электронов и поверхностной волны для высоких) и нескольких нераспространяющихся мод позволяет корректно рассчитывать импеданс разряда. При этом принципиально необходим учет как поля основной моды, так и поля высших нераспространяющихся мод.

3. Проведена идентификация и интерпретация резонансов, которые могут наблюдаться в ВЧЕ разряде низкого давления и таким образом анализировать устойчивость разряда при различных условиях.

4. Проведенные расчеты пространственных распределений электромагнитного поля могут быть основой для поиска режимов ВЧЕ разряда, обеспечивающих требуемые параметры плазмы (плотность плазмы и энергию ионов) и ее пространственную однородность.

Полученные результаты принципиальны для конструирования технологических реакторов, использующих ВЧЕ разряд низкого давления.

Соответствие паспорту научной специальности

Основная часть диссертационного исследования соответствует паспорту специальности 01.04.08 Физика плазмы.

П.3 – Динамика плазмы: волны, неустойчивости, течения, нелинейные явления (самоорганизация, структуры, турбулентность и т.п), аномальный перенос, электромагнетизм и т. п.

П.5 – Источники и генерация плазмы.

П.12 – Плазменные технологии и устройства.

Положения, выносимые на защиту:

1. Учет поля поверхностных волн и нескольких (2–3) первых нераспространяющихся мод электромагнитного поля позволяет провести корректный расчет импеданса ВЧ емкостного разряда. Соотношение амплитуд поверхностной волны и нераспространяющихся мод при изменении плотности электронов может изменяться в ω/ν (до 10 в типичных условиях) раз, что дает возможность управлять пространственным распределением ВЧ поля, добиваясь большей пространственной однородности плазмы.

2. Высшие моды поля вносят в импеданс индуктивную составляющую,

в то время как вклад в импеданс, вносимый поверхностными волнами, зависит от соотношения размеров плазмы и длины поверхностной волны и может иметь как индуктивный, так и емкостной характер.

3. Основной наблюдаемый в разряде резонанс тока, связан с компенсацией емкостного импеданса внешней части камеры и индуктивного импеданса разряда в условиях, когда размер разряда существенно меньше, чем длина поверхностной волны. Изменяя геометрию (размеры) установки, плотность электронов n_{resl} , при которых наблюдается этот резонанс, можно изменять в пределах от одной до пяти критических ($n_c = \cdot m\omega^2/4\pi e^2$).

4. Основной резонанс напряжений, наблюдаемый в системе – геометрический резонанс плазмы и слоя, когда емкостной импеданс, вносимый поверхностной волной в условиях, когда ее размер существенно меньше размеров плазмы компенсируется индуктивным импедансом высших типов мод. Плотности электронов n_{resU} , при которых наблюдается этот резонанс в несколько (в типичных условиях 3–10) раз превышают плотности резонансов тока n_{resI} .

5. Положение резонансов тока и напряжения, обусловленных кратностью размеров разряда и длины поверхностной волны существенно модифицируется индуктивным импедансом, вносимых высшими модами поля и в большинстве случаев приводит к появлению всплесков поглощения, не меняя общий индуктивный характер импеданса. Компенсируя импеданс высших мод поля элементами внешней цепи, можно увеличить эффективность возбуждения поверхностных волн.

Достоверность полученных результатов.

Достоверность используемых результатов обеспечивается (1)использованием для проведения расчетов проверенных вычислительных пакетов (Comsol Multyphysics \mathbb{R}) с размером сетки в несколько раз меньше, чем характерные неоднородности ВЧ поля, (2) проверкой результатов численного моделирования на сгущающихся сетках, (3) сопоставлением результатов численного моделирования с результатами аналитических расчетов. Теоретически полученные результаты там, где это возможно, сопоставлены с результатами других научных групп. Это позволяет считать полученные результаты полностью обоснованными и достоверными.

Апробация диссертации

По материалам диссертации были сделаны доклады на семинарах кафедры физической электроники физфака МГУ имени М.В.Ломоносова, кафедры теоретической физики физического факультета ТНУ, научных семинарах ИНХС РАН, ФТИ РАН, ФТИ имени А.Ф. Иоффе. Основные результаты докладывались на международных научных конференциях:

• XLIV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 13–17 февраля 2017, Звенигород, Россия;

• XLV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 2–6 апреля 2018, Звенигород, Россия;

• X International Workshop on Microwave Discharges: Fundamentals and Applications (MD-10), 3–7 сентября 2018, Moscow region, Zvenigorod, Россия;

• VIII Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии, 10–15 сентября 2018 г., Иваново, Россия;

• XLVI Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 18–22 марта 2019, Звенигород, Россия;

• 72nd Gaseous Electronic Conference, 28 октября – 1 ноября 2019, Техас, Колледж Стейшн, А&M University, США;

• Всероссийская (С международным участием) конференция «Физика Низкотемпературной Плазмы» (ФНТП-2020), 9–13 ноября 2020, Казань;

• XLVIII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 15–19 марта 2021 г., Звенигород, Россия;

• IX Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии, 13–17 сентября 2021 г., Иваново, Россия;

• Международная конференции "Перспективы развития физической науки", 2017, Таджикский национальный университет, Душанбе;

• 68th Gaseous Electronic Conference, Honolulu, 2015.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано пять статей в рецензируемых научных журналах, индексируемых в RSCI, Scopus [1–5]. Три статьи их них [1–3] индексируются также Web of Science.

Личный вклад автора

В диссертации приведены результаты, полученные лично автором или при его активном участии. Автор принимал непосредственное участие в постановке задачи, проведении аналитических расчетов, подготовке статей и докладов на конференциях. Численное моделирование электродинамики разряда с помощью пакета Comsol Multiphysics® выполнено автором полностью самостоятельно.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, а также списка литературы и 8 приложений. Объем диссертации составляет 139 страниц текста, содержащих 38 рисунков, 3 таблицы и библиографию из 221 ссылок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы исследования, степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи работы, объект и предмет исследования, научная новизна, методология исследования, научная и практическая ценность. Представлены положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов. Кратко изложено содержание диссертации по главам.

В первой главе представлен обзор литературы. Рассмотрена история, последние достижения и проблемы создания плазмы ВЧЕ разряда. Описаны существующие подходы к изучению газового разряда.

Вторая глава [1, 5] содержит общие вопросы теории газовых разрядов, в ней же рассматривается простая модель симметричного разряда. Изучена система собственных волн в разрядной камере и рассчитаны токи, протекающие через электроды емкостного ВЧ разряда и напряжения между электродами, возникающие в разряде при возбуждении этих волн, а также построена простейшая модель разряда, предполагающая возбуждение только одной электромагнитной моды. Рассчитан импеданс ВЧ разряда в этой модели и оценены пределы ее применимости для описания параметров реального разряда. Геометрия исследуемых установок показана на рис. 1. Радиус плазмы равен R, а высота камеры и расстояние между электродами – 2L. Между плазмой 3 и электродами формируются слои пространственного заряда 4 толщиной d_1 и d_2 .

Толщину слоя пространственного заряда между плазмой и боковой стенкой вакуумной камеры будем считать равной d_3 . Напряжения на выходе высокочастотных генераторов будем считать равными U_1 и U_2 , а их внутренние сопротивления — равными Z_1 и Z_2 . Толщина слоев пространственного заряда зависит от плотности температуры электронов в плазме и падения потенциала на слое. Поэтому в общем случае толщина слоя может быть функцией радиальной (для d_1 и d_2) и осевой (d_3) координат.

Электродинамика разряда описывалась с помощью системы уравнений Максвелла (в приближении холодной плазмы). Для анализа слоя использовалась матричная модель [А1]. На стенках рабочей камеры ставились тангенциальной условия равенства нулю составляющей граничные электрического поля $\mathbf{E}_{r} = 0$. Аналитически поперечные компоненты поля в разрядной камере (Рис. 1) представлялись в виде суммы волноводных мод, возбуждаемых локальным источником в точке (r=R) в центральной (r< R)

$$\begin{pmatrix} \mathbf{e} \\ \mathbf{h} \end{pmatrix} = \sum_{\pm} \left(A_{0\pm} \begin{pmatrix} \mathbf{e}_{0\pm}(z) J_0(h_{0\pm}r) \\ \mathbf{h}_{0\pm}(z) J_1(h_{0\pm}r) \end{pmatrix} + \sum_{n=1}^{\infty} A_{n\pm} \begin{pmatrix} \mathbf{e}_{n\pm}(z) I_0(\hat{h}_{n\pm}r) \\ \mathbf{h}_{n\pm}(z) I_1(\hat{h}_{n\pm}r) \end{pmatrix} \right) \exp(-i\omega t)$$
(1)

и периферийной (r>R) областях

$$\begin{pmatrix} \mathbf{e} \\ \mathbf{h} \end{pmatrix} = \sum_{\pm} \left(A_{0\pm} \begin{pmatrix} \mathbf{e}_{0\pm}(z) Q_0(h_{0\pm}r) \\ \mathbf{h}_{0\pm}(z) Q_1(h_{0\pm}r) \end{pmatrix} + \sum_{n=1}^{\infty} A_{n\pm} \begin{pmatrix} \mathbf{e}_{n\pm}(z) Q_0(\hat{h}_{n\pm}r) \\ \mathbf{h}_{n\pm}(z) Q_1(\hat{h}_{n\pm}r) \end{pmatrix} \right) \exp(-i\omega t)$$

Здесь и далее $\{\mathbf{e}_{0\pm}(z)\}, \{\mathbf{h}_{0\pm}(z)\}, A_{0\pm}$ – поперечные собственные функции и амплитуды основных, а $\{\mathbf{e}_{m\pm}(z)\}, \{\mathbf{h}_{m\pm}(z)\}, A_{n\pm}$ – нераспространяющихся волноводных мод в соответствующих областях, а $h_{0\pm}$ и $\hat{h}_{n\pm}$ – их постоянные



Рис. 1. Типичные схемы экспериментальных установок: простая исследовательская разрядная камера а); варианты технологических реакторов: с частично заполненной плазмой разрядной камерой b), с полностью заполненной плазмой рабочей камерой, в которой возможно противофазное возбуждение электродов с). 1, 2 – электроды, 3 – плазма, 4 – слои пространственного заряда между плазмой и стенкой (электродами), 5 – вакуумная камера. 2L – межэлектродное расстояние, d₁, d₂, d₃ – толщины слоев пространственного заряда.

распространения и затухания. $J_m(h_{0\pm}r)$, $I_m(\hat{h}_{n\pm}r)$ и $K_m(\hat{h}_{n\pm}r)$ – функции Бесселя, функции Бесселя мнимого аргумента, и функции Макдональда, $Q_m(\hat{h}_{n\pm}r)$ – решения уравнения для поля (выражающиеся через функции Бесселя), удовлетворяющие граничным условиям на боковой стенке. По сравнению с представлением поля в виде собственных волн резонатора, используемое в работе представление обеспечивает более точное представление поля при меньшем числе мод. Если известны амплитуды волн, то общее выражение для импеданса в цилиндрическом сечении r=const может быть представлено в виде

$$Z_{\pm}(r) = \frac{U_{\pm}(r)}{I_{\pm}(r)} = \frac{A_{0\pm}U_{\pm}(r) + \sum_{n=1}^{\infty} A_{n\pm}U_{n\pm}(r)}{A_{0\pm}i_{\pm}(r,L) + \sum_{n=1}^{\infty} A_{n\pm}i_{n\pm}(r,L)}$$
(2)

Резонанс токов соответствует обращению в нуль знаменателя данного выражения, а резонанс напряжений – числителя. Здесь $U_{m\pm}$ и $i_{m\pm}$ – напряжения и токи соответствующих мод. В общем случае импеданс разряда будет близок к волновому сопротивлению одной из мод только тогда, когда амплитуда одной из волн (например, поверхностной или первой нераспространяющейся моды) преобладает. Дисперсионное уравнение для Е-волн, имеет вид:

$$\left(\frac{\varepsilon_{P}\sqrt{h^{2}-k^{2}\varepsilon_{1}}}{\varepsilon_{1}\sqrt{h^{2}-k^{2}\varepsilon_{P}}}th\left(\sqrt{h^{2}-k^{2}\varepsilon_{1}}d_{1}\right)+th\left(\sqrt{h^{2}-k^{2}\varepsilon_{P}}L_{2}\right)\right)\left(1+\frac{\varepsilon_{P}\sqrt{h^{2}-k^{2}\varepsilon_{2}}}{\varepsilon_{2}\sqrt{h^{2}-k^{2}\varepsilon_{P}}}th\left(\sqrt{h^{2}-k^{2}\varepsilon_{P}}L_{2}\right)th\left(\sqrt{h^{2}-k^{2}\varepsilon_{2}}d_{2}\right)\right)+\left(\frac{\varepsilon_{P}\sqrt{h^{2}-k^{2}\varepsilon_{P}}}{\varepsilon_{2}\sqrt{h^{2}-k^{2}\varepsilon_{P}}}th\left(\sqrt{h^{2}-k^{2}\varepsilon_{P}}L_{2}\right)th\left(\sqrt{h^{2}-k^{2}\varepsilon_{P}}d_{2}\right)\right)\left(1+\frac{\varepsilon_{P}\sqrt{h^{2}-k^{2}\varepsilon_{P}}}{\varepsilon_{1}\sqrt{h^{2}-k^{2}\varepsilon_{P}}}th\left(\sqrt{h^{2}-k^{2}\varepsilon_{P}}L_{2}\right)th\left(\sqrt{h^{2}-k^{2}\varepsilon_{P}}d_{2}\right)\right)=0$$

Здесь $k=\omega/c$, с – скорость света, h – постоянная распространения волны, ε_1 , ε_2 , $\mathcal{E}_{\rm P}$ – диэлектрические проницаемости слоев и плазмы, $L_2 = L - (d_1 + d_2)/2$. Зависимость квадрата безразмерной постоянной распространения поверхностной волны для частоты 135.6 МГц и постоянной толщины слоев 3 мм приведена на рис. 2. Из рисунка следует, что поверхностные волны имеют длину волны существенно ниже, чем длина волны в вакууме [1]. В области положительных диэлектрических проницаемостей существует четная распространяющаяся волна (при $n_e \rightarrow 0$ это волна типа TEM), которая с ростом плотности электронов при *n_e>n_C* переходит в нераспространяющуюся. ВЧ плазменных реакторов Нечетные волны при типичных для межэлектродных расстояниях всегда нераспространяющиеся (кривые с $h^2 < 0$). Рассчитанные зависимости комплексных постоянных распространения для поверхностных и затухающих волн при малых частотах столкновений приведены на рис. 3.

Аналогичные кривые были получены для слоев с толщиной, рассчитываемой из закона Чайлда-Ленгмюра. Падение потенциала на слоях предполагалось равным 200 В.





Рис. 2. Зависимость квадрата безразмерной постоянной распространения поверхностных волн h^2/k^2 в симметричном разряде (граница темной и светлой областей). Толщина слоев пространственного заряда 3 мм. Частота электромагнитного поля 135.6 МГц. а) – четная поверхностная волна, b) – нечетная. Толщина плазмы – 8 см.

Рис. 3. Зависимость действительной и мнимой частей безразмерных постоянных распространения $h_{S\pm}/k$ для поверхностных и затухающих волн при учете столкновений ($d_1=d_2=0.3$ см, L=4 см). Частота электромагнитного поля 135.6 МГц. а) – четная поверхностная волна, b) – нечетная. Толщина плазмы – 8 см.

В отсутствие точке $\mathcal{E}_P = -1$ В поглощения волны постоянная распространения, а также ее производная обращаются в бесконечность, а сама точка будет существенно особой точкой комплексной функции $h(\varepsilon)$. Поэтому методы теории возмущений в окрестности этой точки неприменимы. При учете столкновений постоянная распространения волн будет ограниченной по модулю. Расчеты показывают, что при этом в окрестности удвоенной критической плотности происходит перезамыкание поверхностной волны с из нераспространяющихся мод [5]. Могут перезамыкаться одной И дисперсионные кривые у некоторых нераспространяющихся мод. Расчеты показывают, что номера перезамыкающихся мод определяются отношением частоты столкновений электронов ν к частоте поля ω. Коэффициент замедления поверхностной волны не может превышать величину ω/ν .

В главе 2 также рассчитаны осевые распределения поля. Максимум поля в поверхностной волне наблюдается вблизи границы слоя. Для остальных типов волн (квази-TEM и затухающих волн) напротив, у границы наблюдается минимум магнитного поля и поля электростатической индукции. Расчеты показывают, что для поверхностных волн поле в слое существенно выше среднего поля плазме и основной радиальный перенос энергии к центру разряда происходит по слою пространственного заряда. Для затухающих мод поток энергии к центру разряда по плазме значительно больше, чем поток по слоям пространственного заряда.

В этой же главе получены наиболее простые приближенные выражения для импеданса, которые учитывают только одну возбуждаемую моду. При больших плотностях плазмы (n_e>2n_c) это поверхностная волна [2]. При меньших плотностях это квази-ТЕМ волна или первая затухающая мода. В этом случае можно записать следующее выражение для импеданса разряда

$$Z_{0+} = \frac{2}{2\pi R} i\rho \frac{h_{0+}}{k} \frac{\left(\frac{th\left(\sqrt{h_{0+}^2 - k^2 \varepsilon_P} L_2\right)}{\varepsilon_P \sqrt{h_{0+}^2 - k^2 \varepsilon_P}} + \frac{th\left(\sqrt{h_{0+}^2 - k^2 \varepsilon_1} d\right)}{\varepsilon_1 \sqrt{h_{0+}^2 - k^2 \varepsilon_1}}\right)}{\left(\frac{th\left(\sqrt{h_{0+}^2 - k^2 \varepsilon_P} L_2\right)}{\sqrt{h_{0+}^2 - k^2 \varepsilon_P}} + \frac{th\left(\sqrt{h_{0+}^2 - k^2 \varepsilon_1} d\right)}{\sqrt{h_{0+}^2 - k^2 \varepsilon_1}}\right)} \frac{J_0(h_{0+}R)}{J_1(h_{0+}R)}$$
(3)

для поверхностной волны и аналогичное выражение для квази-ТЕМ волны или первой высшей моды. Можно показать, что для малых размеров плазмы ($h_{0+}R < 2.4$) выражение (3) всегда дает емкостной импеданс. Напротив, импеданс вносимый нераспространяющимися модами всегда индуктивный. Этот результат подтверждается вычислениями по указанным формулам. Расчеты показывают, что при Reɛ_P=0 наблюдается резонанс токов. Это происходит в силу полной компенсации тока проводимости в плазме током смещения, поэтому магнитное поле, а, следовательно, и токи электродов отсутствуют. Резонанс напряжений – геометрический резонанс плазмы и слоя связан с компенсацией емкостного импеданса поверхностной волны (при малом размере электрода) и индуктивного импеданса высших мод. Для точного расчета импеданса разряда необходимы более сложные модели, в которых рассчитаны амплитуды различных мод и учтено и их влияние на импеданс. Эти модели рассмотрены в главах 3 и 4.

В третьей главе [2] рассматривается симметричный разряд, полностью заполняющий вакуумную камеру при симметричном и несимметричном возбуждении. Данная глава посвящена аналитическому и численному расчету импеданса разряда, полностью заполняющему (рис. 1с) цилиндрическую разрядную камеру, выполненную из металла, содержащую активный электрод

и подложкодержатель, к которым подведены сигналы от ВЧ генераторов. Разряд рассматривается как четырехполюсник, параметры которого зависят от размеров вакуумной камеры и электродов, средней плотности электронов в камере, характеристик слоев пространственного заряда, свойств цепи, подводящей ВЧ сигнал от генераторов к электродам. Для аналитического расчета амплитуд волн записаны условия ортогональности различных собственных волн трехслойной структуры СПЗ-плазма-СПЗ, ограниченной металлическими стенками, и затем проведено разложение поля источника по этим волнам. Учет возбуждения высших мод приводит к существенному сдвигу плотностей электронов, при которых наблюдается резонанс. Кроме при антисимметричном возбуждении того, показано, ЧТО разряда существенную роль играет падение напряжения на слое пространственного заряда у боковой стенки.

В рамках рассматриваемой модельной задачи толщина слоя и плотность электронов в плазме предполагаются постоянными, не зависящими от координат. Данное предположение использовалась сознательно, чтобы исключить из многопараметрической задачи, которой является расчет импеданса разряда, влияние изменения толщины слоя, которая может зависеть от плотности электронов и напряженности поля сложным образом. Частичным оправданием использования данного приближения может быть также тот факт, что очень часто разряд поддерживается одновременно полем нескольких частот, причем толщина слоя пространственного заряда определяется сигналом более низкой частоты. Предположение постоянной плотности плазмы позволяет провести детальное сравнение численных решений с аналитическими.

Уравнения Максвелла для описанной системы решалась с помощью пакета Comsol Multyphysics[®]. Отдельно рассматривались режимы синфазного и противофазного возбуждения разряда. Примеры расчетов приведены на рис. 4 (синфазное возбуждение) и на рис. 5 (противофазное возбуждение). Частота поля 135.6 МГц, межэлектродное расстояние 2L= 8 см. Радиус разрядной камеры 10 (a)), 20 (b)) и 30 (c)) см. Радиусы R₁ и R₂ при расчетах были равны соответственно 4, 14 и 24 см, и 5, 15 и 25 см (рис. 1б), отношение v/ω равно 0.1. Расчет импеданса проводился в сечениях камеры, отстоящих на 1 см по от поверхности электродов, контактирующих вертикали co слоем пространственного заряда, что вносит дополнительный емкостной импеданс.

В полном соответствии с зависимостями постоянной распространения от плотности электронов резонансы для антисимметричного поля (поверхностная волна короче) наблюдается при более высоких плотностях электронов, чем для симметричного. Результаты аналитического расчета импеданса разряда по формуле (3) при дополнительном учете емкостного импеданса от внешней части разрядной камеры показаны на рис. 6. Сопоставление с расчетом в Comsol Multyphysics дают удивительное качественное, а иногда и количественное совпадение для симметричного разряда, несмотря на сделанные в аналитике существенные приближения – пренебрежение слоями пространственного заряда у боковой стенки, учет только трех электродинамических мод, приближение малости области возбуждения по сравнению c длиной затухания высших мод. Для антисимметричного возбуждения, при общем качественном согласии аналитических и расчетных кривых наблюдается большее число резонансов и отличие их положения на оси плотностей электронов.



Рис. 4. Импеданс разряда как функция плотности электронов для полностью заполненной плазмой камеры (1 – ReZ (Ом), 2 – ImZ(Ом)) толщина слоев $d_1=d_2=d_3=3$ мм. Частота поля 135.6 МГц, межэлектродное расстояние 2L= 8 см. Радиус разрядной камеры 10 (а)), 20 (b)) и 30 (c)) см. Отношение v/ ω равно 0.1. Синфазное возбуждение.

Рис. 5. Импеданс разряда как функция плотности электронов для полностью заполненной плазмой камеры (1 – ReZ (Ом), 2 – ImZ(Ом)) толщина слоев $d_1=d_2=d_3=3$ мм. Частота поля 135.6 МГц, межэлектродное расстояние 2L= 8 см. Радиус разрядной камеры 10 (а)), 20 (b)) и 30 (c)) см. Отношение v/ ω равно 0.1. Противофазное возбуждение.



Рис. 6. Импеданс разряда как функция плотности электронов для полностью заполненной плазмой камеры (ReZ (Ом), ImZ (Ом)) толщина слоев $d_1=d_2=d_3=3$ мм при симметричном возбуждении. Частота 135.6 МГц. Радиус разрядной камеры 10 (a, d)), 20 (b, e)) и 30 (c, f)) см. Расчет по аналитическим формулам. Параллельно разрядной камере включена емкость 10, 25 и 40 пФ.

Это отличие обусловлено отсутствием учета СПЗ у боковой стенки в аналитической модели. В случае симметричного возбуждения ток течет по боковой стенке, поэтому поперечный ток через СПЗ мал и его влияние несущественно. При антисимметричном возбуждении импедансом СПЗ пренебречь нельзя и можно ожидать появления резонанса, аналогичного геометрическому резонансу плазма-СПЗ, только теперь между индуктивным импедансом плазмы (или длинной линии между областью возбуждения и слоем), и импедансом СПЗ. Возможно также резонансное возбуждение поверхностных волн, распространяющихся вдоль боковой поверхности вакуумной камеры. Эти процессы не рассматривались в аналитических расчетах в силу малости при симметричном возбуждении плазмы и математической громоздкости расчетов. Однако их наличие подтверждается численным моделированием структуры поля с помощью пакета Comsol Multiphysics.

Рис. 7. Изменение пространственной структуры магнитного поля с ростом плотности электронов для полностью заполненной плазмой камеры (1 – ReZ, 2 – ImZ) толщина слоев d₁=d₂=d₃=3 мм. Частота 135.6 МГц. Радиус разрядной камеры 30 см. Симметричное возбуждение.

Рис. 8. Изменение пространственной структуры магнитного поля с ростом плотности электронов для полностью заполненной плазмой камеры (1 – ReZ, 2 – ImZ) толщина слоев d₁=d₂=d₃=3 мм. Частота 135.6 МГц. Радиус разрядной камеры 30 см. Антисимметричное возбуждение.

Пример расчета пространственных распределений действительной и мнимой составляющих азимутального магнитного поля в плазме приведены на рис. 7 и 8, радиус разрядной камеры 30 см при симметричном и антисимметричном возбуждении.

Зависимость импеданса от плотности электронов имеет очень сложный характер. При высоких плотностях электронов, когда укорочение поверхностной волны мало и поле плохо проникает в плазму импеданс выходит на постоянное значение. Уменьшение длины поверхностной волны при уменьшении плотности электронов при определенных значениях плотности электронов приводит к появлению резонансов (мнимая часть импеданса проходит через ноль), обусловленных кратностью размеров плазмы и длины поверхностной волны. Можно выделить резонансы тока (для которых в резонансной точке $d \operatorname{Re} \varepsilon_p/dn < 0$) и резонансы напряжения ($d \operatorname{Re} \varepsilon_p/dn > 0$).

В четвертой главе [3, 4] рассмотрен симметричный разряд, частично заполняющий вакуумную камеру при размере плазмы меньше размера электродов. Резонансы обусловливаются компенсацией напряжений и токов, вносимых всеми типами полей – поверхностными волнами, высшими модами в трехслойной структуре и ТЕМ модой и высшими модами в незаполненной плазмой части вакуумной камеры. Однако отдельные моды полей могут не оказывать никакого влияния на импеданс при определенных параметрах плазмы. Например, геометрический резонанс плазма-СПЗ и резонанс токов вызваны взаимодействием поля поверхностной волны и поля высших мод плазменного столба (в первую очередь полем первой высшей моды). Влияние на них высших мод незаполненной части камеры мало. Общая аналитическая формула для импеданса разряда, полученная автором имеет вид [3]

$$Z(kR) = i\rho \frac{L}{2\pi R} \left[J_0(h_{0+}R) \frac{h_{0+}}{k} C_{E00+} - \sum_{j=1}^{K} \left(\sum_{i=1}^{K} S_{ji} \left(K_1(\hat{h}_{i+}R) J_0(h_{0+}R) \frac{h_{0+}}{k} C_{E0i+} + \frac{\hat{h}_{i+}}{k} K_0(\hat{h}_{i+}R) J_1(h_{0+}R) C_{B0i+} \right) \right] I_0(\tilde{h}_{j+}R) \frac{\tilde{h}_{j+}}{k} C_{Ej0+} \right] \times (5) \times \left[J_1(h_{0+}R) C_{B00+} - \frac{1}{k} C_{Ej0+} - \frac{1}{k} C_{Ej0+} \right]$$

$$-\sum_{j=1}^{K} \left(\sum_{i=1}^{K} S_{ji} \left(K_1(\hat{h}_{i+}R) J_0(h_{0+}R) \frac{h_{0+}}{k} C_{E0i+} + \frac{\hat{h}_{i+}}{k} K_0(\hat{h}_{i+}R) J_1(h_{0+}R) C_{B0i+} \right) \right) I_1(\tilde{h}_{j+}R) C_{Bj0+} \right]^{-1}$$

где матрица **S** определяется выражением $\mathbf{S} = \hat{\mathbf{S}}^{-1}$,

$$\hat{S}_{ji} = \left(\frac{\tilde{h}_{i+}}{k\varepsilon_P}I_0\left(\tilde{h}_{i+}R\right)K_1\left(\hat{h}_{j+}R\right)C_{Eij+} + \frac{\hat{h}_{j+}}{k}K_0\left(\hat{h}_{j+}R\right)I_1\left(\tilde{h}_{i+}R\right)C_{Bij+}\right)$$

 C_{Eij+} и C_{Bij+} – безразмерные коэффициенты, зависящие от размера плазмы и слоев, а также собственных функций (с номерами i, j) плазменного и пустого волноводов. Выражения для коэффициентов не приводятся здесь ввиду громоздкости, их можно посмотреть в [3] или диссертации.

Для понимания результатов и их качественного исследования был рассмотрен упрощенный вариант этого уравнения, предполагающий малость влияния слоев пространственного заряда. Тогда осевые постоянные распространения для высших волн в плазме и вне плазмы близки и матрицу S_{ii} можно считать диагональной, а знаменатель в (5) с дисперсионным совпадает уравнением поверхностных волн, распространяющихся у боковой Количество поверхности. резонансов увеличивается, так как могут быть они связаны С возбуждением стоячих поверхностных волн как у боковой поверхности, так y электрода. Поскольку толщина СПЗ y электрода значительно меньше расстояния от боковой стенки до внешней стенки разрядной камеры, положение резонансных значений плотности электронов для них существенно различаются, что заметно на расчетах импеданса разряда, проведенных с помощью пакета Comsol Multyphysics® (рис. 9). На рисунке явно выделен скачок импеданса (А), связанный с появлением бегущих радиальных

Рис. 9. Влияние импеданса, вносимого периферийной частью рабочей камеры на импеданс разряда (1 – ReZ (Ом), 2 – ImZ, Ом) (результаты аналитического расчета) для симметричного разряда при синфазном возбуждении. Радиус плазмы R = 2 (a), 5 (b), 10 (c), 15 (d) и 20 (e) см. Частота поля 135.6 МГц. Толщина слоев $d_1=d_2=3$ мм. Частота столкновений – 0.1 от частоты поля. Импеданс рассчитывался на внешней границе плазмы.

Рис. 10. Импеданс разряда (1 - Re Z, 2 - Im Z, Ом) (результаты численного моделирования) для симметричного разряда при синфазном возбуждении. Рисунок справа представляет собой те же кривые, что и на рисунке слева, но в большем масштабе. Параметры такие же, как и на рис. 9, только отношение частоты столкновений к частоте поля равно 0.1. Импеданс рассчитывался на внешней границе плазмы.

поверхностных волн. Этот скачок наблюдается при плотности электронов немного меньше удвоенной критической, что может быть обусловлено влиянием слоя пространственного заряда. Дальнейший рост плотности электронов приводит к появлению всплесков поглощения и осцилляций на кривой мнимой части импеданса. Значения плотностей электронов, при которых возбуждаются стоячие поверхностные волны у боковой поверхности, не изменяются при изменении радиуса разряда (В). В то же время резонансы, связанные с возбуждением радиальных стоячих поверхностных волн, при увеличении радиуса плазмы перемещаются в область более высоких плотностей электронов (С). Отдельно обозначен геометрический резонанс плазма—СПЗ (D). Расчет для параметров плазмы при более высоких v/ω приведен на рис. 10. В силу большего затухания волн влияние резонансов, связанных с возбуждением поверхностных волн выражено более слабо. Остальные условия расчета соответствуют рис. 9. Сравнение аналитических расчетов с численным моделированием показывает их качественное, а иногда и количественное согласие. В заключении обобщаются полученные результаты и формулируются выводы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведены аналитические и численные (с помощью пакета Comsol Multiphysics®) расчеты электромагнитного поля и импеданса в емкостном высокочастотном разряде низкого давления. Получено, что одновременный (поверхностной либо TEM), учет как основных так И высших трехслойной нераспространяющихся мод В структуре: слой пространственного заряда - плазма - слой пространственного заряда, окруженной металлическими электродами, позволяет корректно аналитически описать электродинамические свойства разряда. При изменении плотности электронов в разряде наблюдаются один или несколько резонансов тока и напряжения.

2. Два резонанса (один для тока и один для напряжения) проявляются практически всегда и их можно назвать глобальными. Основной резонанс напряжений – геометрический резонанс плазма-слой пространственного заряда. Положение основного (глобального) резонанса тока связано с компенсацией тока плазмы через внутреннюю область разряда и емкостного тока подводящей линии передачи. При малых размерах плазмы в емкостной импеданс вносят вклад поверхностные волны, а в индуктивный – высшие моды. При пренебрежении поверхностными волнами или высшими типами мод этот резонанс не проявляется в расчетах, хотя наблюдается в эксперименте.

3. При больших размерах электродов и малых частотах столкновений ($v/\omega < \lambda/L$) появляются дополнительные всплески на зависимости импеданса разряда от плотности электронов. При их больших амплитудах возможно появление дополнительных резонансов тока и резонансов напряжения, связанных с кратностью размеров разряда определенному числу полуволн поверхностной волны. Положение этих всплесков или резонансов на оси

22

плотностей электронов зависит от амплитуды высших мод и импеданса внешней цепи питания разряда. Амплитуды различных мод поля и пространственное распределение ВЧ поля в разряде существенно изменяются с изменением плотности электронов независимо от способа поддержания разряда.

4. Стоячие поверхностные волны, возбуждение которых возможно у боковой поверхности плазмы, существенны в области плотностей электронов, в несколько раз превышающих критическую. Эти волны в разряде малого радиуса оказывают существенное влияние на импеданс разряда в целом в области плотностей электронов, незначительно превышающих удвоенную критическую при условии, что радиус сравним с высотой разряда.

5. При противофазном возбуждении разряда резонансы поверхностных волн наблюдаются при более высоких плотностях плазмы, так как антисимметричные поверхностные волны короче симметричных. При плотностях электронов существенную роль слой высоких играет пространственного заряда у боковой стенки плазмы. Для разряда высокой плотности его наличие приводит к появлению нового резонанса, который можно также рассматривать как геометрический резонанс плазма-слой пространственного заряда, где индуктивный импеданс периферийной плазмы импедансом периферийного компенсируется емкостным слоя Электромагнитное пространственного заряда. поле при ЭТОМ сосредотачивается в периферийной области.

6. Численный расчет собственных волн трехслойной структуры для плазмы с поглощением показал, что структура собственных волн качественно изменяется при изменении отношения частоты столкновений к частоте поля, что важно при расчете характеристик плазменных волноводов и разряда при плотностях электронов вблизи удвоенной критической.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Список опубликованных статей по теме диссертации (Scopus, Web of Science и RSCI)

1. Двинин С.А., Синкевич О.А., Кодирзода З.А., Солихов Д.К. Особенности возбуждения электромагнитного поля в емкостном ВЧ разряде І. Общие вопросы. Простая модель симметричного разряда. Физика плазмы, т. 46, 2020, №12, с. 1094–1118. Dvinin S.A., Sinkevich O.A., Kodirzoda Z.A., Solikhov D.K. Features of electromagnetic field excitation in capacitive RF discharge I. General issues. Simple symmetric discharge model. Plasma Physics Reports. V. 46, 2020, №12, p. 1181-1204 (IF WOS: 0.977; SJR (SCOPUS Q3): 0.333).

2. Двинин С.А., Синкевич О.А., Кодирзода З.А., Солихов Д.К. Особенности возбуждения электромагнитного поля в емкостном ВЧ разряде II. Симметричный разряд, полностью заполняющий вакуумную камеру при симметричном и несимметричном возбуждении. Физика плазмы, т. 47, 2021, №1, с. 40–60. Dvinin S.A., Sinkevich O.A., Kodirzoda Z.A., Solikhov D.K. Features of electromagnetic field excitation in capacitive RF discharge. II. Symmetric discharge fully filling a vacuum chamber. Symmetric and asymmetric excitation. Plasma physics reports. V. 47, 2021, №1, p. 28 – 47 (IF WoS: 0.977; SJR: 0.333).

3. Двинин С.А., Синкевич О.А., Кодирзода З.А., Солихов Д.К. Особенности возбуждения электромагнитного поля в емкостном ВЧ разряде Особенности возбуждения электромагнитного поля в емкостном ВЧ разряде. III. Симметричный разряд, частично заполненная разрядная камера. Физика плазмы, т. 47, 2021, №3, с. 195–219. Dvinin S.A., Sinkevich O.A., Kodirzoda Z.A., Solikhov D.K. Specificities of Electromagnetic Field Excitation in a Capacitive HF Discharge. III. Symmetric Discharge Partially Filling the Discharge Chamber, Plasma Physics Reports, 2021, Vol. 47, No. 3, pp. 211 – 234 (IF WoS: 0.977, SJR: 0.333).

4. Двинин С.А., Синкевич О.А., Кодирзода З.А., Солихов Д.К. Об импедансе высокочастотного емкостного разряда при различных способах возбуждения. Прикладная физика, 2021, №3, с. 33–38 (SJR: 0.205).

5. Двинин С.А., Кодирзода З.А., Синкевич О.А., Солихов Д.К. О спектрах собственных волн в плазменном волноводе при наличии столкновений. Прикладная физика, 2021, №4, с. 25–31 (SJR: 0.205).

Статьи в сборниках:

6. Dvinin S., Kodirzoda Z., Solikhov D. Calculation of capacitive discharge impedance at the account of surface waves excitation on plasma-metal interface Microwave Discharges: Fundamentals and Applications. Proceedings of the X International Workshop on Microwave Discharges: Fundamentals and Applications (MD-10), 2018 ISBN 978-5-8037-0746-2, Yanus-K Moscow, c. 211-216.

7. Dvinin S.A., Kodirzoda Z. Filamentation of capacitive Radio-Frequency Discharge at low frequencies ICRP-9/GEC-68/SPP-33 9th International Conference of Reactive Plasmas / 68 Gaseous Electronic Conference / 33rd Symposium of Plasma Processing, Published by the Japan Society of Applied Physics, Tokyo, Japan, 2015, c. LW1.00016-2.

Тезисы докладов

8. Dvinin S., Sinkevich O., Solikhov D., Kodirzoda Z. Features of Electromagnetic Field Excitation in a Capacitive RF Discharge Bulletin of the American Physical Society 72nd Gaseous Electronic Conference, 2019, p. FT1.00052.

9. Двинин С.А., Кодирзода З.А., Солихов Д.К. Численный расчет импеданса емкостного ВЧ разряда в металлической вакуумной камере при неоднородном заполнении. XLVI Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Сборник тезисов докладов, ООО Издательство МБА Москва, 2019, с. 244.

10. Dvinin S., Kodirzoda Z., Solikhov D. Calculation of capacitive discharge impedance at the account of surface wave excitation on plasma-metal interface Microwave discharges: Fundamental and applications. X International Workshop. September 3–7, 2018, Zvenigorod, Russia. Books of abstracts & Programme, Янус-К Москва, с. 40.

11. Двинин С.А., Кодирзода З.А., Сафармамадов С.М., Солихов Д.К. Расчет параметров индуктивного высокочастотного разряда в металлической вакуумной камере. VIII Международный Симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии. ISTAPC-2018. 10–15 сентября 2018 г., Иваново, Россия, Ивановский государственный химико-технологический университет Иваново, с. 133.

12. Двинин С.А., Кодирзода З.А., Сафармамадов С.М., Солихов Д.К. Собственные волны и импеданс высокочастотного емкостного разряда с электродами большой площади VIII Международный Симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии. ISTAPC-2018. 10–15 сентября 2018 г., Иваново, Россия, Ивановский государственный химико-технологический университет Иваново, с. 131.

13. Двинин С.А., Кодирзода З.А., Солихов Д.К. Структура электромагнитного поля в высокочастотном емкостном разряде с электродами большой площади XLV Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу 2–6 апреля 2018 г. Звенигород. Сборник тезисов докладов, ЗАО НТЦ Плазмаиофан Москва, с. 293.

14. Двинин С.А., Солихов Д.К., Кодирзода З.А. К теории устойчивости однородного распределения плотности плазмы в технологических плазменных реакторах Материалы Международной конференции "Перспективы развития физической науки", Таджикский национальный университет, Душанбе, 2017, с. 36–38.

15. Двинин С.А., Солихов Д.К., Кодирзода З.А. Уравнение плазмы и слоя для немаксвелловской функции распределения электронов по энергиям XLIV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, 2017 ИОФ РАН Москва, с. 283.

16. Двинин С.А., Кодирзода З.А. Шнурование емкостного высокочастотного разряда при низких давлениях. в сборнике XLIII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу 8–12 февраля 2016 г. Сборник тезисов докладов. ООО Издательство МБА Москва, с. 297 17. Dvinin S.A., Kodirzoda Z. Filamentation of capacitive Radio-Frequency Discharge at low frequencies Bulletin of the American Physical Society, 2015, сер. 9, том 60, с. 80.

18. Двинин C.A., Кодирзода 3.A., Синкевич O.A., Солихов Д.К. Электродинамические характеристики емкостного высокочастотного разряда. Всероссийская (C международным участием) конференция «Физика Низкотемпературной Плазмы» (ФНТП-2020). Казань. 9-13 ноября 2020. С. 26-27. 3.A., 19. Двинин C.A., Кодирзода Синкевич O.A., Солихов Д.К. Электродинамические характеристики и интегральные модели высокочастотного

емкостного разряда с электродами большой площади. XLIII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Звенигород, 15–19 марта 2021 г. Сборник тезисов докладов, ООО Издательство МБА Москва, с. 174.

20. Двинин С.А., Кодирзода З.А., Синкевич О.А., Солихов Д.К. О пространственной структуре плазмы и высокочастотного поля в источниках плазмы при высоких плотностях электронов. IX Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии 13–17 сентября 2021 г., Иваново, Россия. С. 76.

21. Двинин С.А., Кодирзода З.А., Синкевич О.А., Солихов Д.К. О спектрах собственных волн в плазменном волноводе с неоднородным заполнением при наличии столкновений. IX Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии 13–17 сентября 2021 г., Иваново, Россия. С. 99.

Цитированная литература

A1. *Lieberman M.A., Lichtenberg A.J.* Principles of Plasma Discharges and Material Processing. N.-Y.: Wiley, 2005.

A2. Samukawa S., Hori M., Raul S., Tachibana K., Bruggeman P., Kroesen G., Whitehead J.C., Murphy A.B., Gutsol A.F., Starikovskaia S., Kortshagen U., Boeuf J.-P., Sommerer T.J., Kushner M.J., Czarnetzki U., Mason N. The 2012 Plasma Roadmap // J. Phys. D.: Appl. Phys. 2012. V. 45. P. 253001.

A3. I Adamovich, S D Baalrud, A Bogaerts, P J Bruggeman, M Cappelli, V Colombo, U Czarnetzki, U Ebert, J G Eden, P Favia, D B Graves, S Hamaguchi, G Hieftje, M Hori, I D Kaganovich, U Kortshagen, M J Kushner, N J Mason, S Mazouffre, S Mededovic Thagard, H-R Metelmann, A Mizuno, E Moreau, A B Murphy, B A Niemira, G S Oehrlein, Z Lj Petrovic, L C Pitchford, Y-K Pu, S Rauf, O Sakai, S Samukawa, S Starikovskaia, J Tennyson, K Terashima, M Turner, M C M van de Sanden and A Vardelle. The 2017 Plasma Roadmap: Low temperature plasma science and technology. J. Phys. D: Appl. Phys. 50 (2017) 323001.

A4. Collins K.S., Roderick C.A., Yang S.-L., Wang D.N.K., Maydan D. United States Patent No 5210466A, May 1993.

A5. Schmidt H., Sansonnens L., Howling A.A., Hollenstein Ch., Elyaakoubi M., Schmitt J.P.M. // J. Appl. Phys. 2004. V. 95. P. 4559.

A6. Kawamura E., Lieberman M.A., Graves D.B. // Plasma Sources Sci. Technol. 2014. V. 23. P. 064003.

A7. Mussenbrock T., Hemke T., Ziegler D., Brinkman R.P., Klick M. // Plasma Sources Sci. Technol. 2008. V. 17. 025018.

A8. Liberman M.A., Booth J.P., Chabert P., Rax J.M., Turner M.M. // Plasma Sources Sci. Technol. 2002. V. 11. P. 283.

A9. Chabert P. // J. Phys. D.: Appl. Phys. 2007. V. 40. P. R63.

A10. Sansonnens L., Howling A.A., Hollenstein Ch. // Plasma Sources Sci. Technol. 2006. V. 15. P. 302.

A11 Chabert P., Ramimbault J-L., Rax J-M, Lieberman M.A. // Phys. Plasmas. 2004. V.11. P. 1175.