

ОТЗЫВ

официального оппонента к.ф.-м.н., с.н.с. Боброва Виктора Борисовича на диссертацию **Кодирзода Заъфари Абдуламина** на тему «Структура электромагнитного поля и резонансы в высокочастотных емкостных разрядах низкого давления», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «физика плазмы».

Актуальность темы

Диссертация З.А. Кодирзода посвящена аналитическому и численному исследованию электродинамики высокочастотного емкостного (ВЧЕ) разряда низкого давления.

Интерес к этому типу разрядов, обусловлен:

– различными наблюдающимися в нем эффектами, связанными как с особенностями электродинамики (нелинейность слоев пространственного заряда, появление новых типов волн, генерация гармоник, нарушение адиабатичности движения частиц в областях резкого изменения электромагнитного поля) и кинетики (генерация активных частиц, формирование ионных пучков, модификация обрабатываемых поверхностей),

– широким использованием разряда в современных технологиях. Все современные микросхемы памяти, процессоры, выполнены с использованием технологий, использующих ВЧЕ разряд.

Из всего спектра задач, которые стоят перед исследователями разряда автор остановил свой выбор на исследовании электродинамики. По сравнению со другой фундаментальной проблемой – кинетикой процессов в плазме, до последнего времени (перехода к использованию подложек размером 25 см и выше) исследованиям электродинамики уделялось меньше внимания, хотя в последние годы за рубежом наблюдается значительное увеличение числа работ (что нашло отражение в списке литературы, содержащем 221 ссылку). Поэтому тему диссертации следует признать важной и актуальной.

Диссертация изложена на 129 страницах, содержит введение, четыре главы, заключение, приложения и список литературы (221 ссылка).

Во введении показана актуальность избранной темы, сформулированы цели и задачи, объект и предмет исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, а также изложены методология диссертационного исследования, положения, выносимые на

защиту, личный вклад автора, обсуждены степень достоверности и апробация результатов.

Первая глава посвящена обзору литературы. В обзоре литературы обсуждены имеющиеся на сегодня применения ВЧЕ разряда, сформулированы имеющиеся к настоящему времени модели разряда (в том числе модель плазменного конденсатора) и способы их построения, влияние резонансов на свойства разряда, а также причины возникновения гистерезиса в разрядах и свойства слоев пространственного заряда. В заключение обзора рассмотрены работы, посвященные исследованию электродинамических и кинетических эффектов в разряде.

На этой основе автор выбрал весьма удачный способ для исследования поля в разряде, а именно, представление разряда в виде многослойной структуры, содержащей плазму, слои пространственного заряда и электроды.

Фундаментальные электродинамические свойства этой структуры исследовались **во второй главе**. Автор произвел численное исследование дисперсии волн, распространяющихся в такой структуре, и показал, что при переходе плотности электронов через удвоенную критическую происходит качественная перестройка системы этих волн.

Простейшие модели разряда, поддерживаемые только одной электродинамической модой, не позволяют правильно описать параметры разряда, поэтому дальнейшей задачей был расчет амплитуд различных собственных волн. Автор выбрал для исследования две распространенных конструкции рабочих камер технологических установок, отличающихся тем, что одна из них была заполнена плазмой полностью, а другая частично. С точки зрения электродинамики эти конструкции отличаются различными условиями для протекания тока на боковую стенку камеры.

В третьей главе представлены результаты расчета пространственной структуры электромагнитного поля в рабочей камере, полностью заполненной плазмой, а также проведено аналитическое исследование амплитуд собственных волн и импеданса разряда. Рассмотрено возбуждение разряда симметричными (без тока на боковую стенку) и антисимметричными модами. В силу различной дисперсии симметричных и антисимметричных волн и влияния сдоя пространственного заряда у боковой стенки, во втором случае наблюдается большее число резонансов. Результаты аналитических расчетов сопоставлены с численным расчетом с помощью программы Comsol и показано их качественное согласие.

В четвертой главе рассмотрены свойства разряда с частично заполненной плазмой вакуумной камерой. В расчетах обнаружены дополнительные резонансы при плотностях электронов, которые близки к удвоенной критической, и связаны с возбуждением поверхностных волн у боковой поверхности плазмы.

В заключении изложены основные результаты, полученные в ходе диссертационного исследования.

В Приложения представлены детали аналитических расчетов полей.

Диссертация производит хорошее впечатление и представляет собой законченное научное исследование. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертация соответствует паспорту специальности 01.04.08 – физика плазмы. Результаты диссертационной работы полностью опубликованы в 5 статьях в рецензируемых научных журналах и доложены более чем на 10 научных конференциях.

Научная новизна представленных в диссертации результатов связана, прежде всего, с рассмотрением разряда как объединения трех пространственных областей, а именно, внутренней и внешней, а также области возбуждения поля, расположенной между ними. Рассматривая внутреннюю и внешнюю область как совокупность линий передачи, автор аналитически рассчитал амплитуды волн в этих линиях передачи и импеданс разряда. Моды в различных линиях могут быть как распространяющимися, так и затухающими (высшие моды). Импеданс, вносимый высшими нераспространяющимися модами, – индуктивный, так как диэлектрическая проницаемость плазмы отрицательна, а импеданс, вносимый поверхностной волной, зависит от соотношения длин линии и поверхностной волны.

Из результатов следует, что мощность, передаваемая в нераспространяющиеся моды, может быть сравнима и больше мощности, передаваемой в поверхностную волну, что дает возможность управлять пространственным распределением плотности плазмы.

Использованные автором методы расчета могут быть применены при анализе электродинамических процессов в ВЧЕ газовом разряде и использованы для конструирования основанных на нем плазмохимических установок. С этой точки зрения работа имеет весьма высокую **практическую и теоретическую ценность.**

Достоверность и обоснованность полученных результатов, положений и выводов достигнута благодаря использованию аналитических расчетов и независимого численного моделирования с помощью пакета Comsol Multiphysics® и их сравнению, которое показало качественное, а иногда и количественное согласие.

Результаты численного моделирования дополнительно проверялись расчетами на сгущающихся сетках.

По работе можно сделать следующие замечания.

1. В работе отмечается, что зависимость импеданса от плотности электронов определяет устойчивость стационарного состояния разряда, однако соответствующие условия устойчивости нигде в диссертации не указаны явно.

2. Слои пространственного заряда на границе плазмы представляют собой интересный нелинейный объект, который во многом определяет свойства самого разряда.

Во-первых, их наличие изменяет электродинамику разряда в целом и приводит к появлению поверхностных волн, основная доля энергии которых переносится именно по слою пространственного заряда.

Во-вторых, толщина слоя пространственного заряда, определяющая дисперсионные характеристики вследствие нелинейности вольтамперной характеристики слоя зависит от амплитуды ВЧ поля на слое.

В-третьих, также самая нелинейность слоя приводит к интенсивной перекачке энергии от основной гармоники к высшим, амплитуда которых может быть выше основной, так как условия резонанса в рассматриваемой системе выполняются тем проще, чем выше частота поля.

Тем не менее, роль нелинейности в описании слоев пространственного заряда в диссертационной работе обсуждается весьма мало.

3. Во многих случаях процессы, происходящие в слоях пространственного заряда активного электрода и подложкодержателя, отличаются вследствие их различной химической природы. В частности, размеры слоев у разных электродов могут отличаться, а разряд может стать несимметричным. Однако эффекты, связанные с возможным нарушением симметрии разряда, также почти не обсуждаются в диссертации.

4. Следовало бы отдельно рассмотреть вопрос о влиянии неоднородности плазмы на пространственное распределение электромагнитного поля и импеданс разряда

Указанные замечания не снижают ценность выполненной автором работы и вызваны во многом объемом и сложностью рассматриваемой задачи. Высказанные замечания свидетельствуют скорее о том, что в исследуемой области имеется еще большое количество задач для дальнейших исследований.

Следует отметить, что автор стремился описать расчеты максимально подробно, что будет весьма полезно для студентов и аспирантов, специализирующихся в области высокочастотных разрядов. Содержание диссертации, в частности, выполненные аналитические и численные расчеты показывают высокую квалификацию диссертанта.

Считаю, что представленная З.А. Кодирзода диссертация «Структура электромагнитного поля и резонансы в высокочастотных емкостных разрядах низкого давления» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в Московском государственном университете, в частности, критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», а диссертант Кодирзода Заъфари Абдуламин заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент,
к.ф.-м.н., с.н.с. ОИВТ РАН,
доцент

Бобров Виктор
Борисович

Контактные данные:
Телефон: +7-910-452-67-95.
E-mail: vic5907@mail.ru

Место работы: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,
Теоретический отдел № 7 им. Л.М. Бибермана, **125412**, г. Москва, ул.
Ижорская, д.13, стр. 2

Подпись Боброва Виктора Борисовича удостоверяю

Заместитель директора
ОИВТ РАН, д.ф.-м.н

Гавриков А.В.

