

ОТЗЫВ

официального оппонента Двинаина Сергея Александровича на диссертацию Жукова Всеволода Игоревича «СВЧ разряд низкого давления в диэлектрических трубках, поддерживаемый поверхностной электромагнитной волной», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. Физика плазмы

Актуальность темы.

Диссертация В.И. Жукова посвящена исследованию сверхвысокочастотного (СВЧ) разряда низкого давления в диэлектрических трубках, поддерживаемого поверхностной электромагнитной волной. Спецификой этого типа разряда является высокая эффективность возбуждения (отсутствие потерь энергии в индуктивной антенне и/или d согласующих устройствах, характерных для ВЧ разрядов), эффективный вклад энергии волны в плазму в даже при низких давлениях за счет бесстолкновительных процессов на границе, слабое влияние разряда на плавающий потенциал границы. Излучение в окружающее пространство в разряде, поддерживаемом поверхностной волной, происходит только из торца плазменного столба и в обычных условиях практически отсутствует. Эти особенности приводят к тому, что разряд в настоящее время используется в целом ряде приложений – плазменных антеннах, для управления течением газа в плазменной аэродинамике, плазмохимических реакторах низкого давления, применяющихся для модификации и травления поверхности, нанесения тонких пленок, спектрально чистых источниках света и других технологических устройствах. С другой стороны далеко не все особенности нелинейного взаимодействия поверхностной волны с создаваемой ею плазмой исследованы экспериментально и получили теоретическое объяснение. Поэтому тему работы следует считать **важной** и **актуальной**.

Остановимся на содержании диссертационной работы.

Диссертационная работа В.И. Жукова состоит из Введения, четырех Глав и Заключение и составляет 108 страниц и 55 рисунков. В Списке цитируемой литературы имеется 96 наименований.

Во **Введении** работы обоснована ее актуальность, указаны цель диссертационного исследования, научная новизна полученных результатов и их практическая значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1** представлен литературный обзор существующих работ, посвященных распространению ПЭВ по газоразрядной плазме, поддерживаемой как внешними источниками, так и самой поверхностной волной. Описываются устройства аппликаторов ПЭВ, эффективно преобразующих СВЧ энергию в энергию ПЭВ. Приведены теоретические основы ПЭВ, распространяющейся по плазменному столбу, представлены дисперсионные характеристики ПЭВ.

Вторая глава диссертации посвящена описанию экспериментальных стендов и описанию методик диагностики плазмы и измерения распределения электрического поля ПЭВ.

В третьей главе исследуются характеристики стационарного разряда. Исследуется режим поддержания разряда стоячей ПЭВ аксиально-симметричной и дипольной моды. Стоячая волна возбуждается между помещенных на кварцевую трубку двух плоскопараллельных металлических зеркал (одно из которых совмещено с аппликатором), образующих открытый резонатор ПЭВ. Возбуждение стоячей волны позволяет подробно исследовать компоненты электрического поля ПЭВ и структуру разряда. Эксперименты сопровождаются численным моделированием, воссоздающим возбуждение стоячей ПЭВ на плазменном столбе и воспроизводящим параметры экспериментальной установки. Также исследуются радиальные профили плотности плазмы в свободном разряде при разных значениях давления и средней плотности плазмы.

В Четвертой главе представлены результаты исследования динамики СВЧ разряда низкого давления, поддерживаемого ПЭВ в кварцевой трубке, наполненной воздухом. Проведены измерения скорости ионизационного фронта вдоль трубки и определены оптимальные экспериментальные условия, при которых скорость распространения фронта максимальна. Экспериментально обнаружен неустойчивый режим распространения разряда на заключительной стадии распространения, т.е. при приближении к равенству частоты ионизации и частоты электронных потерь. Такой режим связан с возмущением поля ПЭВ на фронте разряда и выражается в частичных распадах, скачках и остановках фронта. Показано, что возникающие неустойчивости возможно контролировать при помощи помещения металлического зеркала в конец плазменного столба. Установка двух плоскопараллельных зеркал на пути распространения разряда приводит к распространению разряда между зеркалами в виде следующих друг за другом плазменных фрагментов, длина которых равна половине длины поверхностной волны.

В заключении представлены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Объект исследования диссертационной работы – сверхвысокочастотный разряд, поддерживаемый поверхностной волной сантиметрового диапазона в длинных кварцевых трубках.

Предмет исследования – пространственные распределения напряженности электромагнитного поля как функции параметров заполняющего трубку газа и условий возбуждения разряда.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем.

1. Экспериментально определен размер фронта ионизации разряда и показано, что в условиях эксперимента он имеет размер порядка радиуса трубки.

2. Обнаружены скачки фронта разряда в условиях наличия отраженной волны при уровнях мощности близких к порогу существования разряда.

3. Продемонстрирована возможность реализации открытого резонатора на поверхностной электромагнитной волне на одиночном цилиндрическом плазменном проводнике.

Практическая и теоретическая ценность работы заключается в проведении систематических исследований свойств разряда, поддерживаемого поверхностной волной

Достоверность научных результатов диссертационной работы Жукова В.И. обоснована экспериментальными результатами, полученными на современном оборудовании с использованием актуальных методик измерения, и согласованными с опубликованными другими исследователями результатами в области физики СВЧ разряда, поддерживаемого поверхностной электромагнитной волной.

Апробация. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 5 статьях в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, из которых 4 входят в базы данных WoS и SCOPUS. Все результаты исследования неоднократно докладывались на международных и всероссийских конференциях (11 докладов).

Перечислим основные результаты работы.

1. Экспериментально показано, что скорость распространения ионизационного фронта разряда определяется произведением размера фронта ионизации на частоту ионизации. (можно сравнить с формулой, получаемой из теории размерностей $V \approx \sqrt{D_a \nu_i}$).

2. Экспериментально обнаружен режим неустойчивого распространения фронта разряда .

3. Показана возможность управления пространственными характеристиками разряда при возбуждении последнего между двумя зеркалами.

4. Обнаружена разная роль продольной и поперечной составляющих электрического поля в поддержании разряда волнами с азимутальными волновыми числами $m=0$ и $m=1$.

5.. Обнаружено, что в условиях эксперимента характерное время выхода разряда на стационар определяется временем амбиполярной диффузии.

В целом диссертационная работа Жукова В.И. выполнена на высоком научном уровне, в ней получен большой объем новой и важной информации, достоверность которой не вызывает сомнения.

С точки зрения оппонента изюминкой работы является обнаруженная автором неустойчивость распространения фронта ионизации, поддерживаемого поверхностной волной.

Автореферат диссертации достаточно полно соответствует содержанию работы и отражает основные полученные в ней результаты. Работа изложена научным языком и снабжена информативными иллюстрациями. Список цитируемой литературы соответствует содержанию.

Замечания

К диссертации имеются замечания. В частности:

1. Размер фронта ионизации, полученный в работе экспериментально, может быть также оценен теоретически. Наиболее простой вариант оценки связан с использованием теории размерностей. В частности для диффузионного механизма распространения размер фронта определяется через коэффициент амбиполярной диффузии и частоту ионизации. Оценка дает $l_D \approx \sqrt{D_a/\nu_i}$. Тем не менее, в работе даже такая простая оценка и ее сопоставление с экспериментом отсутствует.

2. В работе экспериментально обнаружены режимы неустойчивого распространения фронта ионизации. Было бы интересно сравнить проявление данной неустойчивости разряда, поддерживаемого поверхностной волной с неустойчивостями фронтов ионизации в постоянном поле, например, в стримере, или в разряде в волновых полях, который исследовался в Нижнем Новгороде.

3. В работе отсутствуют ссылки на исследования, выполненные свыше 40 лет назад на физическом факультете МГУ имени М.В.Ломоносова в группе Г.С.Солнцева в которых рассматривались сходные вопросы. В частности можно указать кандидатские диссертации А. Марипова (1970), В.А.Довженко (1974), П.П.Мельниченко (1982). В частности в последней диссертации рассматривались похожие вопросы при поддержании стационарного СВЧ разряда в длинных трубках, поддерживаемого волной H_{10} в прямоугольном волноводе. Свойства этой волны во многом аналогичны свойствам поверхностной волны с азимутальным числом $m-1$, рассматриваемой автором. В работе в стационарном режиме наблюдались схожие распределения СВЧ поля вдоль разряда.

4. В работе нигде не обсуждается возможность влияния высших нераспространяющихся мод поля на свойства разряда.

Отмеченные замечания носят частный характер и не меняют общую положительную оценку работы.

Диссертационная работа Жукова Всеволода Игоревича «СВЧ разряд низкого давления в диэлектрических трубках, поддерживаемый поверхностной электромагнитной волной» полностью соответствует паспорту специальности

1.3.9. Физика плазмы, по актуальности, достоверности, научной новизне и практической значимости результатов, представляет собой законченную научно-квалификационную работу.

Диссертационная работа Жукова В.И. соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года с дополнениями от 21 апреля 2016 года № 335, а ее автор Жуков В.И. заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. Физика плазмы.

Официальный оппонент,
Доцент кафедры физической
электроники физического
факультета Московского
государственного университета
имени М.В.Ломоносова,
доктор физико-математических наук,
доцент

Двинин Сергей
Александрович
02.11.2023

Согласен на обработку персональных данных

Контактные данные:

Телефон: +7 (495) 939-14-48

E-mail: DvininSA@my.msu.ru

Адрес места работы:

119991, ГСП-1, Москва, Ленинские Горы 1, строение 2, физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова. Кафедра физической электроники.

Подпись доцента Двинина Сергея Александровича удостоверяю.

И.о. декана
физического факультета МГУ имени
М.В.Ломоносова,
доктор
физико-математических наук,
профессор