

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу **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

Диссертационная работа Жукова В.И. посвящена экспериментальному исследованию характеристик и свойств СВЧ разряда низкого давления, поддерживаемого поверхностной электромагнитной волной (ПЭВ).

Интерес к разрядам в радиопрозрачных трубках, поддерживаемым поверхностными электромагнитными волнами, возник с разработкой в 1970-х годах источников плазмы, электромагнитная энергия которых с высокой эффективностью трансформировалась в энергию ПЭВ, поддерживающей газовой разряд. Такие разряды реализуются в широком диапазоне давлений (от десятков мТорр до атмосферного давления) и рабочих частот (от 1 МГц до 10 ГГц) и позволяют создавать протяженные плазменные столбы с концентрацией электронов, существенно превышающей критическую концентрацию для заданной частоты. В диссертационной работе исследуются СВЧ разряды низкого давления, где частота столкновений электронов с нейтралами много меньше частоты поля. Концентрация электронов при таких условиях лежит в широких пределах от  $10^{10}$  см<sup>-3</sup> до  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>. Такие разряды находят свое применение в устройствах для стерилизации и дезинфекции, удаления двуокси углерода (CO<sub>2</sub>) из смеси газов, а также в антенной технике. Исследование характеристик и свойств разряда, а также структуры поддерживающего его поля ПЭВ представляет собой **актуальную** научную задачу.

**Целью работы** является исследование физических свойств газового разряда низкого давления в диэлектрических трубках, поддерживаемого поверхностной электромагнитной волной сантиметрового диапазона.

### **Содержание работы**

Диссертационная работа состоит из четырех глав, введения и заключения. Полный объем диссертации составляет 108 страниц, включая 55 рисунков. Список цитированной литературы содержит 96 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы положения, выносимые автором на защиту, дана общая характеристика работы и приведено краткое изложение основных разделов диссертации.

В **первой главе** приводится краткий обзор основных направлений исследования распространения поверхностных электромагнитных волн по газоразрядной плазме. Часть обзора посвящена поверхностным волнам, распространяющимся по плазменным столбам, поддерживаемым внешним источником. Основная часть посвящена способам получения ВЧ и СВЧ плазмы с помощью ПЭВ: плазма создается распространяющейся поверхностной волной, а распространение волны поддерживается создаваемой ей плазмой. Описаны основные типы аппликаторов ПЭВ, позволяющие эффективно преобразовывать ВЧ/СВЧ энергию в поверхностную волну. В этой главе изложены теоретические основы поверхностных электромагнитных волн, распространяющихся вдоль границы раздела плазма-вакуум и плазма-диэлектрик.

**Вторая глава** посвящена устройству экспериментальных установок по возбуждению разряда низкого давления, поддерживаемого ПЭВ и методике измерений электрического поля ПЭВ и характеристик разряда.

В **третьей главе** приведены результаты исследования СВЧ разряда низкого давления, поддерживаемого поверхностной волной аксиально-симметричной и дипольной моды. Представлены результаты экспериментальных и численных исследований структуры электрического поля ПЭВ и профилей плотности плазмы при возбуждении обеих мод. С помощью двухзеркальной системы осуществлено возбуждение разряда, поддерживаемого стоячей ПЭВ. Показано, что такая система представляет собой открытый резонатор ПЭВ на плазменном столбе. Экспериментально установлено, что возбуждение стоячей аксиально-симметричной моды в плазменном столбе приводит к формированию локальных максимумов и минимумов плотности плазмы на всей длине, период которых равен половине длины поверхностной волны. Показана возможность создания в этом случае плазменного столба с модуляцией плотности  $n_{e,\max}/n_{e,\min} \approx 5$  и протяженностью около 10 длин волн.

**Четвертая глава** посвящена исследованию распространения фронта разряда, поддерживаемого ПЭВ в кварцевой трубке, наполненной воздухом. Экспериментально исследованы динамические характеристики разряда и выявлены оптимальные условия распространения. Обнаружен нестабильный режим распространения при приближении к энергобалансу ионизации и электронных потерь, связанный с возмущением поля поверхностной волны в прифронтной области и характеризующийся частичными распадами, скачками и остановками фронта. В ходе эксперимента установлено, что помещение металлического зеркала на пути распространения позволяет контролировать эти процессы. Установка системы из двух зеркал на пути разряда позволяет жестко задать структуру поля,



создаваемого излучением разряда, что приводит к распространению разряда между зеркалами в виде следующих друг за другом плазменных фрагментов, длина которых равна половине длины поверхностной волны.

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

**Достоверность** выводов диссертационной работы не вызывает сомнений. В работе применялось адекватное численное моделирование, результаты которого хорошо соотносятся с имеющимися экспериментальными данными. В работе применялись общепринятые методики диагностики плазмы и исследования электромагнитных полей. Кроме того, достоверность подтверждается согласием с результатами исследований по данной тематике других научных групп.

#### **Научно-практическая значимость работы.**

Возбуждение стоячей ПЭВ на плазменном столбе позволило исследовать структуру поля возбуждаемых мод поверхностной волны и их влияние на поддержание разряда. Исследованные динамические характеристики и особенности распространения СВЧ-разряда низкого давления, поддерживаемого поверхностной электромагнитной волной, играют важную роль в разработке плазменных антенн с заданными параметрами (время включения/выключения, учет длительности переходных процессов, устойчивость разряда). Проведенные исследования продемонстрировали возможность поддержания плазменного столба с большой степенью модуляции плотности плазмы. Такие сильно модулированные плазменные структуры могут быть использованы в различных радиотехнических устройствах с управляемыми параметрами (антенные решетки, волноводные переключатели, защита радиоприемных устройств от мощных электромагнитных импульсов).

#### **Научная новизна работы**

Результаты, полученные диссертантом, имеют большое значение для исследования физических процессов, протекающих в СВЧ разрядах низкого давления, поддерживаемых поверхностной электромагнитной волной.

Возбуждение стоячей ПЭВ на плазменном столбе позволило исследовать структуру поля возбуждаемых мод поверхностной волны и их влияние на поддержание разряда. Предложенная численная модель стоячей ПЭВ на плазменном столбе хорошо согласуется с экспериментом и позволяет исследовать структуру стоячего поля ПЭВ дипольной и аксиально-симметричной моды как снаружи плазменного столба, так и внутри него. При возбуждении стоячей волны аксиально-симметричной ( $m=0$ ) моды вклад продольной электрической компоненты  $E_z$  в плазму значительно превышает вклад радиальной компоненты  $E_r$  ПЭВ, что приводит к модуляции

плотности плазмы. Впервые была экспериментально продемонстрирована возможность создания стационарного плазменного столба протяженностью порядка 10 длин ПЭВ со степенью модуляции плотности плазмы  $n_{e,max}/n_{e,min} \approx 5$ .

Экспериментально обнаружен неустойчивый режим распространения разряда на заключительной стадии его развития, т.е. при приближении к энергодансону ионизации и потерь, связанный с характерными особенностями поверхностной волны в прифронтной области разряда. Установка системы из двух рефлекторов на пути разряда позволяет жестко задать структуру поля, создаваемого излучением разряда. Это приводит к распространению разряда между зеркалами в виде следующих друг за другом плазменных фрагментов длиной  $\lambda_s/2$  (где  $\lambda_s$  – длина поверхностной волны) до исчерпания запасов энергии или по достижении им второго зеркала. Таким образом, был продемонстрирован не исследованный ранее механизм распространения разряда, поддерживаемого ПЭВ, в поле объемной стоячей волны, создаваемой самим разрядом.

Характеризуя диссертацию в целом, следует отметить, что она выполнена на **высоком научном уровне**. При этом диссертант проявил себя исследователем, способным анализировать и находить подходы к решению сложных проблем. Результаты работы опубликованы в 5 реферируемых научных журналах входящих в перечень ВАК и докладывались на международных и всероссийских конференциях. Публикации отражают основные положения диссертационной работы и позволяют подтвердить личный вклад Жукова В.И.

**Автореферат** правильно и достаточно полно отражает основное содержание диссертационной работы.

Отмечая общий высокий научный уровень диссертационной работы, следует сделать следующие **замечания**:

1. Волновое уравнение, как это следует из системы уравнений (1.1), в общем случае имеет вид  $rot\,rot\mathbf{E} + (\epsilon/c^2)\partial^2\mathbf{E}/\partial t^2 = 0$ . И только в объеме вещества, где дивергенция электрического поля равна нулю, с учетом соотношения  $rot\,rot\mathbf{E} = \nabla\,div\mathbf{E} - \Delta\mathbf{E}$  волновое уравнение принимает вид (1.2).
2. В уравнении (1.12), которое следует из волнового уравнения (1.2), имеются неточности. Это связано с тем, что лапласиан векторной функции в цилиндрической системе координат имеет более сложный вид чем в декартовой системе координат. Например, в радиальном направлении компонента лапласиана электрического поля имеет вид  $(\Delta\mathbf{E})_r = \Delta E_r - E_r/r^2 - (2/r^2)\partial E_\phi/\partial\phi$ . Именно поэтому радиальные электрические поля



- описываются модифицированными функциями Бесселя первого порядка (1.13), в отличии от аксиальных компонент электрического  $E_z$  (1.13), которые пропорциональны модифицированными функциями Бесселя нулевого порядка.
3. Имеются опечатки в граничных условиях (1.14). Согласно (1.14) тангенциальные компоненты поля на границе раздела двух сред обращаются в ноль. На самом деле тангенциальные компоненты электрического и магнитного поля должны быть непрерывны на границе раздела двух сред и при этом отличны от нуля.
  4. На стр. 59 3 главы диссертации указано, что ранее в работах [83-85] был исследован разряд, поддерживаемый стоячей поверхностной электромагнитной волной. Автору следовало бы сравнить результаты своих исследований в этой области с предшествующими работами [83-85] и подчеркнуть новизну своих результатов.
  5. В диссертационной работе имеются следующие опечатки:
    - а) в знаменателе в правой части формулы (1.20) должна быть плазменная частота, а не квадрат плазменной частоты.
    - б) в знаменателе формулы (1.22) диэлектрическая проницаемость должна быть в квадрате, а не в кубе.
    - в) в формуле (1.27) не хватает множителя  $2\pi$ .
  6. В диссертации одной и той же буквой  $\sigma$  обозначается проводимость (см. (1.16) на стр.27, (1.19) на стр. 28) и параметр на стр. 32, а также одной и той же буквой  $\delta$  обозначаются глубина скин-слоя (см. (1.20) на стр.28) и параметр на стр. 33.

Перечисленные замечания, которые касаются в основном обзорной части диссертации и не затрагивают ее результативную часть, не снижают общей **положительной оценки** диссертационной работы.

### Заключение

Диссертационная работа, выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной, практической ценностью, является самостоятельной и законченной научно-исследовательской работой, выполненной автором самостоятельно на высоком научном уровне. В своей диссертационной работе автор продемонстрировал высокий уровень владения методами численного моделирования и экспериментальных измерений. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей важное значение для понимания физики СВЧ разряда, поддерживаемого поверхностной электромагнитной волной.

Диссертация Жукова Всеволода Игоревича «СВЧ разряд низкого давления в диэлектрических трубках, поддерживаемый поверхностной электромагнитной волной» полностью соответствует паспорту специальности 1.3.9. Физика плазмы и 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**

Старший научный сотрудник

лаборатории теории плазменных явлений

отдела физики плазмы

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

доктор физико-математических наук

23 октября 2023г.

Фролов Александр Анатольевич

Согласен на обработку персональных данных

Почтовый адрес места работы: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинский проспект, д.53

Телефон: +7(499)783-34-98

E-mail: [frolova@lebedev.ru](mailto:frolova@lebedev.ru)

подпись Фролова А.А. заверяю

Ученый секретарь ФИАН

кандидат физико-математических наук



А. В. Колобов