

На правах рукописи



Жуков Всеволод Игоревич

**СВЧ РАЗРЯД НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ТРУБКАХ, ПОДДЕРЖИВАЕМЫЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНОЙ**

Специальность 1.3.9. Физика плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН)

**Научный руководитель:** **Гусейн-заде Намик Гусейнага оглы**  
доктор физико-математических наук,  
профессор, главный научный сотрудник  
теоретического отдела ИОФ РАН

**Официальные оппоненты:** **Двинин Сергей Александрович**  
доктор физ.-мат. наук, доцент физического  
факультета Московского государственного  
университета имени М.В. Ломоносова  
**Фролов Александр Анатольевич**  
доктор физ.-мат. наук,  
высококвалифицированный старший научный  
сотрудник Физического института им. П.Н.  
Лебедева Российской академии наук

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Российский университет дружбы  
народов имени Патриса Лумумбы»

Защита диссертации состоится 21 ноября 2023 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.1.223.02 при ИОФ РАН по адресу: 119991, Москва, ул. Вавилова, д. 38, корп. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИОФ РАН <https://diss.gpi.ru/all/>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.1.223.02



канд. физ.-мат. наук  
тел.: +7 (499) 503-8777 доб. 1-47

Т.Б. Воляк

# Общая характеристика работы

## Актуальность темы работы

Поверхностные электромагнитные волны (ПЭВ) [1] представляют особый класс электромагнитных волн, распространяющихся по поверхности раздела сред с разными показателями диэлектрической проницаемости. Благодаря конечной проводимости, поверхность проводника имеет свойство концентрировать вблизи себя энергию ПЭВ, что отличает эти волны от объёмных электромагнитных волн (ОЭВ), распространяющихся в свободном трёхмерном пространстве. Сам термин «поверхностные электромагнитные волны» впервые использовал А. Зоммерфельд в 1899 г., когда теоретически рассматривал задачу об осевом токе в длинном цилиндрическом проводе. Решения максвелловских уравнений, амплитуда которых быстро спадала с ростом расстояния от поверхности провода, А. Зоммерфельд связал с ПЭВ. Поле ПЭВ экспоненциально затухает при удалении по обе стороны от волноведущей поверхности; это свойство волны и является отличительным признаком для ее идентификации в качестве поверхностной. ПЭВ Зоммерфельда относятся к «медленным» электромагнитным волнам, фазовая скорость которых меньше скорости света в вакууме. При определенных условиях поверхность раздела является направляющей структурой и такие ПЭВ переносят энергию вдоль поверхности. Поверхностные электромагнитные волны, направляемые поверхностью проводящих сред, привлекают большое внимание ученых в связи с задачами распространения электромагнитного излучения в различных областях науки [2]: от радиотехники до рентгеновской оптики.

В настоящее время актуальными являются исследования поверхностных волн СВЧ/ВЧ-диапазона, где в качестве направляющих структур используется газоразрядная плазма в диэлектрических трубках [3]. Первые исследования, посвященные распространению поверхностных волн по плазме, были проведены Трайвелписом и Гоулдом [4] в 1950-х годах. Возбуждение поверхностной волны возможно в случае, когда ПЭВ

распространяется по независимо созданной плазме и не влияет на свойства плазмы. Такой режим распространения ПЭВ может быть использован, в частности, для диагностики плазмы.

Особый интерес представляет самосогласованный режим, когда ПЭВ распространяется по плазменному столбу газового разряда, который поддерживается самой поверхностной волной. Данное направление исследований получило бурное развитие после разработки различных способов возбуждения [5] разрядов – создание источников плазмы, в которых электромагнитная энергия с высокой эффективностью трансформируется в поверхностную волну, которая самосогласованным образом поддерживает разряд. Такой тип разрядов находит свое применение во многих приложениях [6,7] среди которых плазменная обработка поверхностей, CVD осаждение тонких алмазных пленок, дезинфекция и стерилизация материалов, удаление двуокси углерода ( $\text{CO}_2$ ) из смеси газов. Одним из перспективных направлений для применения разрядов, поддерживаемых ПЭВ, в радиопрозрачных трубках является разработка плазменных антенн [8]. Такие антенны обладают рядом преимуществ: снижением радиолокационной заметности, возможностью быстрого включения и выключения, динамической перестройкой частотной характеристики, управлением диаграммой направленности антенны.

Всё вышперечисленное обуславливает **актуальность темы диссертационной работы.**

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

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие **задачи:**

1. Исследование структуры электрического поля ПЭВ дипольной и аксиально-симметричной моды на плазменном столбе газового разряда низкого давления в кварцевой цилиндрической трубке.

2. Определение радиального профиля плотности плазмы в зависимости от давления в газоразрядной трубке.
3. Возбуждение стоячей ПЭВ дипольной и аксиально-симметричной моды, поддерживающей плазменный столб газового разряда, между двух металлических зеркал.
4. Оценка влияния резонанса ПЭВ на структуру плазменного столба. Сравнение с резонансом ПЭВ Зоммерфельда на металлическом проводе в открытом резонаторе поверхностной волны.
5. Исследование распространения ионизационного фронта газового разряда низкого давления в кварцевой цилиндрической трубке, поддерживаемого СВЧ поверхностной волной.
6. Управление неустойчивостями на фронте разряда, поддерживаемого ПЭВ, на его заключительной стадии распространения при приближении к энергобалансу ионизации и потерь.

**Объектом исследования** диссертационной работы является газовый разряд низкого давления в кварцевых трубках, поддерживаемый поверхностной электромагнитной волной сантиметрового диапазона.

**Предмет исследования** – распределение электромагнитного поля поверхностной волны и его связь с характеристиками газового разряда.

#### **Научная новизна работы**

- При исследовании распространения СВЧ-разряда, поддерживаемого поверхностной электромагнитной волной, в кварцевой трубке в воздухе низкого давления, экспериментально определено, что характерный размер ионизационного фронта разряда не зависит от давления и расстояния от источника излучения и приблизительно равен диаметру трубки.
- Обнаружен неустойчивый режим распространения разряда на заключительной стадии его развития, т.е. при приближении к энергобалансу ионизации и потерь, связанный с характерными особенностями поверхностной волны в прифронтной области разряда.

- Осуществлено управление характером распространения разряда путем конфигурирования излучаемого с фронта разряда поля при помощи одного или двух металлических отражателей.
- Использован режим стоячей волны для исследования структуры ПЭВ дипольной и аксиально-симметричной моды. Показана возможность стабильного поддержания сильно модулированного (степень модуляции  $n_{e\max}/n_{e\min}=5$ ) плазменного столба длиной порядка 10 длин волн. Продемонстрирован способ создания открытого резонатора ПЭВ Зоммерфельда на одиночном цилиндрическом проводнике на частоте 6 ГГц.

### Научно-практическая значимость работы

Определены оптимальные условия распространения разряда, поддерживаемого СВЧ поверхностной волной, в воздухе низкого давления. Экспериментально обнаружен нестабильный режим распространения разряда, связанный с возмущением поля поверхностной волны в прифронтной области.

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.

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).

Реализован резонанс ПЭВ на плазменном столбе длиной, превышающей  $10\lambda$ . Проведенные исследования продемонстрировали возможность поддержания плазменного столба со степенью модуляции

плотности плазмы  $n_{e\max}/n_{e\min} = 5$ . Сильномодулированные плазменные структуры могут быть использованы в различных радиотехнических устройствах с управляемыми параметрами (антенные решетки, волноводные переключатели, защита радиоприемных устройств от мощных электромагнитных импульсов (ЭМИ)).

### **Положения диссертационной работы, выносимые на защиту**

1. При возбуждении стоячей поверхностной электромагнитной волны дипольной моды (ПЭВ) сантиметрового диапазона, поддерживающей плазменный столб газового разряда низкого давления в кварцевой трубке, не происходит заметной модуляции плотности плазмы в отличие от стоячей ПЭВ аксиально-симметричной моды, где модуляция плотности плазмы достигает  $n_{e\max}/n_{e\min} = 5$ .
2. При приближении к энергобалансу ионизации и потерь на заключительной стадии распространения разряда низкого давления в кварцевых цилиндрических трубках, поддерживаемого поверхностной электромагнитной волной (ПЭВ) сантиметрового диапазона, возникает неустойчивость на фронте разряда. Она обусловлена возмущением поля поверхностной волны в области фронта разряда и неоднородным излучением плазменного столба и характеризуется частичными распадами, скачками и остановками фронта, причем длина распадов и скачков  $\approx \lambda_s/2$ , где  $\lambda_s$  – длина ПЭВ.
3. Установка рефлектора на пути распространения разряда в области энергобаланса ионизации и потерь позволяет контролировать неустойчивость на фронте разряда. Между двумя рефлекторами разряд распространяется в виде следующих друг за другом плазменных фрагментов длиной  $\lambda_s/2$ , число которых варьируется от 1 до 6 в зависимости от расстояния между рефлекторами.

**Обоснованность и достоверность** научных положений и выводов подтверждаются достаточным количеством экспериментальных данных, современными методами исследования, которые соответствуют цели работы и поставленным задачам. Достоверность результатов также подтверждается

их надежной воспроизводимостью и соответствием выводов, сделанных в работе на основе представленных экспериментальных данных и численных моделей, в частных случаях с результатами, полученными другими авторами.

### **Апробация результатов работы**

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 5 статьях в профильных рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК [1а–5а], из которых 4 входят в международные базы данных WoS и SCOPUS.

Результаты диссертационных исследований неоднократно докладывались на международных и всероссийских конференциях (11 докладов) [6а–16а], а также на научных семинарах ИОФ РАН и МГУ имени М. В. Ломоносова. Научные исследования по тематике диссертационной работы были поддержаны грантом РФФИ № 20-32-90162 (Аспиранты) «Особенности СВЧ разряда на поверхностной электромагнитной волне и его приложения».

**Личный вклад автора** состоит в участии в постановке задач, планировании экспериментов и анализе полученных результатов. Численные расчеты, представленные в диссертации, проводились лично автором, а экспериментальные исследования выполнены в соавторстве с коллегами.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 108 страниц, включая 55 рисунков. Библиографический список содержит 96 наименований.

### **Содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель, задачи и научная новизна исследования. Дана общая характеристика работы и раскрыта ее практическая значимость, приведено краткое изложение основных разделов диссертации. Также в этом разделе выделен личный вклад автора и сформулированы положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** содержит литературный обзор по поверхностным электромагнитным волнам (ПЭВ). Приведена классификация ПЭВ и результаты работ, посвященных распространению ПЭВ по газоразрядной плазме. Изложены теоретические основы поверхностных электромагнитных волн, распространяющихся по границе раздела плазма–вакуум и плазма–диэлектрик. Приведены основные соотношения для плазмы разряда низкого давления, поддерживаемого поверхностной волной. Отдельное внимание уделяется условиям возбуждения аксиально-симметричной ( $m = 0$ ) и дипольной ( $m = 1$ ) моды ПЭВ на плазменном столбе и их дисперсионным характеристикам. Представлен обзор актуальных технологических применений и приложений, в основе которых лежат разряды, поддерживаемые ПЭВ.

**Вторая глава** посвящена методам возбуждения разряда, поддерживаемого поверхностной электромагнитной волной сантиметрового диапазона, и экспериментальным стендам. Практически любое радиопередающее устройство или антенна, излучение которых падает на проводящую структуру, могут возбуждать поверхностную электромагнитную волну (ПЭВ), в то время как создание приемлемого аппликатора ПЭВ зависит от поставленной задачи. Обычно основными требуемыми характеристиками являются: простота устройства, возможность возбуждения определенных мод, эффективность преобразования энергии источника в ПЭВ, а также доля энергии, которая идет на излучение объемных волн (которые, как правило, мешают детектированию ПЭВ).

Параграф 2.1 посвящен возбуждению ПЭВ СВЧ-диапазона на газоразрядной плазме. При этом возбуждается поверхностная волна, которая сама создает и поддерживает плазму. В представленном исследовании были использованы аппликаторы ПЭВ двух видов: коаксиальный резонатор (сурфатрон) [6а] и волноводный аппликатор. Выбор двух принципиально разных систем по возбуждению ПЭВ позволяет работать в разных частотных диапазонах (440 МГц и 2.45 ГГц) и при разных мощностях источника (45 Вт

и 800 Вт). Критерием возбуждения дипольной моды ПЭВ является произведение частоты поля  $f$  и радиуса трубки  $R$ : при  $fR < 2$  ГГц·см возбуждается только  $m = 0$  мода ПЭВ; когда  $fR > 2$  ГГц·см, наряду с  $m = 0$  модой возбуждается мода  $m = 1$ . За счёт своей геометрии волноводный аппликатор использовался в режиме генерации ПЭВ как азимутально-симметричной ( $m = 0$ ), так и дипольной ( $m = 1$ ) моды [13а]. Приведена схема возбуждения стоячей ПЭВ на плазменном столбе и металлической проволоке [1а] между двух плоских зеркал, образующих открытый резонатор ПЭВ.

В параграфе 2.2 приведена методика измерения характеристик разряда и поддерживающей его поверхностной волны. Измерения компонент электрического поля осуществлялись СВЧ-антеннами, сконструированными специально для приема радиальной  $E_r$  и продольной  $E_z$  компонент поля [3а].

В параграфе приведены три метода измерения распределений и абсолютных значений плотности плазмы в разряде:

1. По дисперсионному соотношению, связывающему измеряемую длину ПЭВ со средней по сечению концентрацией электронов в разряде.
2. По измерениям коэффициента прохождения диагностического СВЧ сигнала через плазменный столб с использованием рупорной или волноводной системы.
3. По измерению аксиального профиля средней по сечению плотности плазмы по интенсивности свечения плазмы [5а, 7а]  $I(z) \sim n_e(z)$ . Радиальное распределение плотности плазмы определялось методом поперечных снимков с последующей их обработкой по преобразованию Абеля. По временной зависимости интенсивности свечения плазмы  $I(t)$  определялись частоты ионизации и электронных потерь в разряде.

**В главе 3** исследуются СВЧ-разряды низкого давления в длинных кварцевых трубках ( $l \gg \lambda$ ), поддерживаемые поверхностной электромагнитной волной аксиально-симметричной ( $m = 0$ ) и дипольной ( $m = 1$ ) моды [5а, 13а]. Обе моды ПЭВ возбуждаются с помощью волноводного

аппликатора. В экспериментах использовались две кварцевые трубки длиной 2 м. Для возбуждения дипольной  $m = 1$  моды использовалась трубка, внутренний и внешний диаметры которой составляли 21 мм и 27 мм, а для возбуждения  $m = 0$  – с внутренним и внешним диаметром 10 мм и 14 мм соответственно. В случае дипольной моды разряд возбуждался в трубке заполненной воздухом при давлении 0.1 Торр, соответствующему минимуму электронных потерь. В 14 мм трубке ( $m = 0$  мода) эксперименты проводились в аргоне при давлениях 0,25 и 6,5 Торр. Условия экспериментов соответствуют низкотемпературной слабостолкновительной плазме, где температура электронов  $T_e$  лежит в пределах 1–3 эВ, а частота их столкновения с нейтральными атомами много меньше круговой частоты СВЧ-волны,  $\nu_{en}/\omega \ll 1$ .

Возбуждение резонанса позволяет увидеть особенность поверхностной волны, обусловленную наличием продольной компоненты  $E_z$ , которая распространяется в противофазе с радиальной компонентой  $E_r$ . При этом распределение поля ПЭВ имеет синусоидальный характер с постоянной амплитудой. Стоячая ПЭВ  $m = 0$  и  $m = 1$  моды формировалась между двумя плоскими зеркалами, помещенными на кварцевую трубку и образующими структуру типа открытого резонатора на поверхностной волне. Для исследования характеристик электромагнитного поля стоячей поверхностной волны в программе CST Microwave Studio была создана численная модель возбуждения стоячей ПЭВ  $m = 0$  и  $m = 1$  моды на плазменном столбе, полностью воспроизводящая параметры экспериментальной установки. В численной модели не рассматривались процессы образования плазмы. Использовалась модель Друде низкотемпературной плазмы с заранее заданными параметрами  $n_e$  и  $\nu_{en}$ , которые не изменялись в процессе симуляции.

Полученные в результате симуляции распределения продольной  $E_z$  и радиальной  $E_r$  компонент электрического поля стоячей ПЭВ  $m = 1$  моды вдоль столба представлены совместно с экспериментальными результатами

на рисунке 1. Средний уровень поля стоячей волны в резонаторе постоянен по его длине, в то время как средний уровень поля в свободном разряде затухает на этой длине в два раза. При настройке на резонанс энергия поля между зеркалами возрастает на 8 дБ, средняя плотность плазмы возрастает на 40–50%. Такой незначительный рост плотности свидетельствует об уменьшении доли энергии поверхностной волны, проникающей в плазму.

Отношение энергии поля ПЭВ внутри и вне плазменного столба  $W_{pl}/W_{vac}$  изменяется с 0,25 в свободном разряде до 0,07 при резонансе. Большое значение коэффициента стоячей волны по напряженности поля (КСВН  $\approx 20$ ) не приводит к заметной модуляции плотности плазмы по причине близкого вклада в плазму находящихся в противофазе радиальной  $E_r$  и продольной  $E_z$  компонент электрического поля ПЭВ.

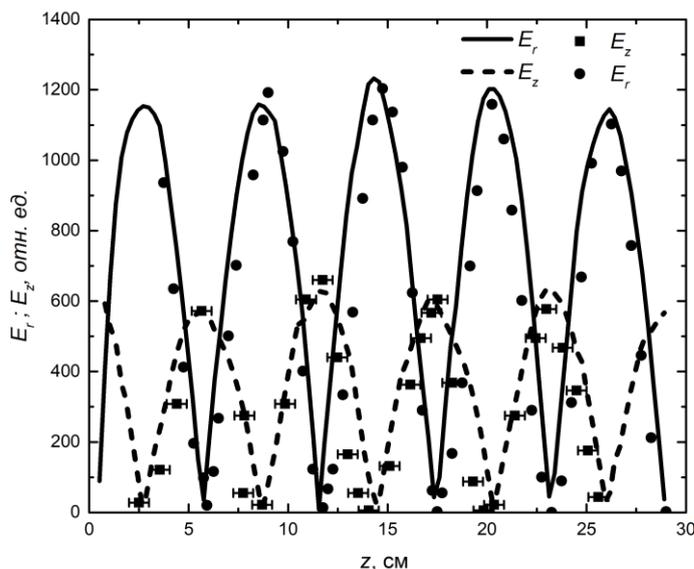


Рисунок 1. Распределения радиальной  $E_r$  и продольной  $E_z$  компонент напряженности электрического поля ПЭВ  $m = 1$  моды вдоль плазменного столба. Сплошные кривые – результат моделирования. Точки – экспериментальные данные, нормированные на результат моделирования.

Распределение поля при поддержании разряда ПЭВ  $m = 0$  моды имеет аналогичный характер (как на рисунке 1). Большое значение КСВН приводит к образованию модуляции плотности плазмы вдоль столба (рисунок 2), максимумы и минимумы которой совпадают с таковыми у компоненты  $E_z$ .

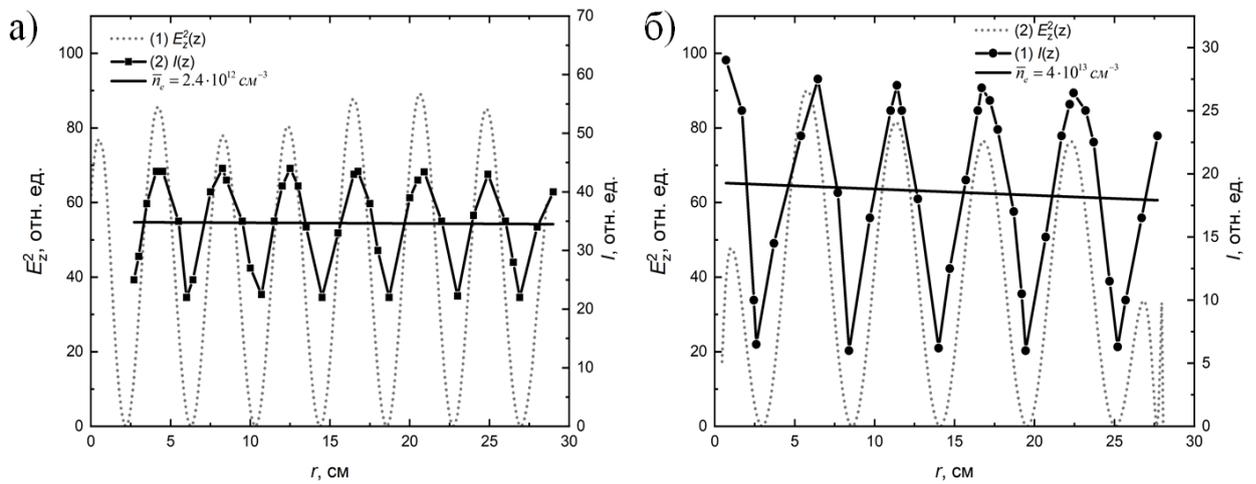


Рисунок 2. Пунктирная кривая – распределение компоненты ПЭВ  $E_z^2(z)$ . Точки – распределение интегральной светимости плазмы  $I(z) \sim n_e(z)$ . Сплошная линия – среднее значение плотности плазмы  $\bar{n}_e$ . а)  $p = 0,25$  Торр; б)  $p = 6,5$  Торр.

С увеличением давления с 0,25 Торр до 6,5 Торр наблюдается значительное уменьшение энерговклада на образование пары электрон–ион, что наряду с ростом концентрации электронов приводит к «вытеснению» поля ПЭВ – перераспределению энергии ПЭВ в плазме и вакууме  $W_{pl}/W_{vac}$  с 0,2 до 0,04. Расчётное продольное распределение напряженности суммарного поля стоячей ПЭВ внутри плазменного столба приведено на рисунке 3.

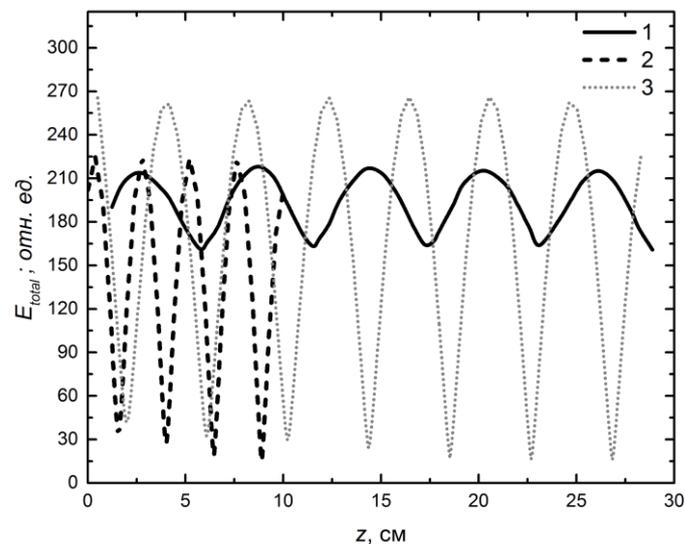


Рисунок 3. Продольное распределение электрического поля поверхностной волны, интегрированного по сечению плазменного столба. Распределения построены по расчету численной модели. Кривая (1) соответствует  $m = 1$  моде; (2)  $m = 0$  моде; (3)  $m = 0$  моде, возбужденной в произвольных условиях.

Как показало численное моделирование, вклад продольной компоненты  $E_z$  в плазму на порядок превышает вклад радиальной компоненты  $E_r$ . Установлено, что время формирования модулированной структуры близко к характерному времени диффузии  $\tau_d$ : 7 мкс при 0,25 Торр и 180 мкс при 6,5 Торр, а степень модуляции растет с увеличением давления и может достигать  $n_{\text{emax}}/n_{\text{emin}} = 5$ . В случае  $m = 1$  моды вклад компонент  $E_r$  и  $E_z$  в плазму отличается незначительно [7а].

Проведены измерения радиального профиля плотности плазмы в свободном разряде, поддерживаемом ПЭВ  $m = 0$  моды, при разных условиях его возбуждения. Распределения на рисунке 4а соответствуют разряду в бактерицидной лампе низкого давления с внутренним диаметром 24 мм. Бактерицидная лампа заполнена смесью аргона ( $p_{\text{Ar}} \approx 2\text{--}3$  Торр) с парами ртути ( $p_{\text{Hg}} \approx 1\text{--}5 \cdot 10^{-2}$  Торр).

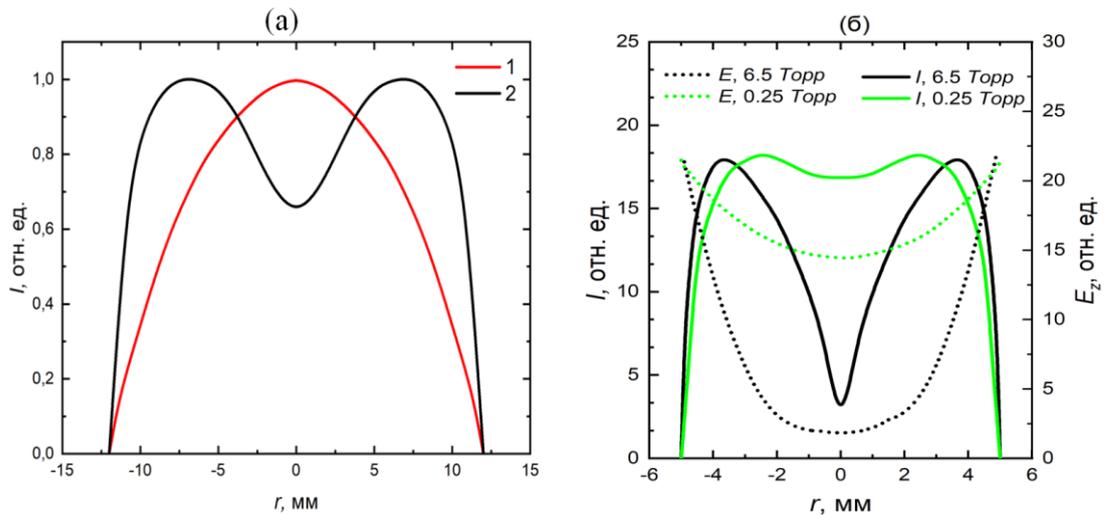


Рисунок 4. а) Радиальные профили плотности плазмы  $n_e(r) \sim I(r)$  в бактерицидной лампе при возбуждении разряда: сурфатроном (1); волноводным аппликатором (2). б) Сплошные кривые – профили плотности плазмы. Пунктирные кривые – радиальные распределения поля ПЭВ  $E(r)$  внутри плазменного столба (численное моделирование).

Кривая 1 соответствует возбуждению сурфатроном (45 Вт, 440 МГц). Радиальное распределение близко к профилю плотности плазмы в тлеющем разряде, и, как известно, описывается бесселевой функцией  $n_e(r) \sim J_0(2.4r/a)$ , где  $a$  – радиус трубки. Средняя по сечению плотность плазмы

$n_e = 1,2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ . При возбуждении разряда в лампе волноводным аппликатором (800 Вт, 2.45 ГГц) профиль плотности близок к однородному у стенок трубки и имеет незначительный спад на ее оси (кривая 2). Средняя по сечению плотность составляет  $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Аналогичные измерения радиального профиля представлены на рисунке 4б. При увеличении плотности плазмы с  $1,4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  (0,25 Торр) до  $1,6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  (6,5 Торр) профиль плотности меняется от столбовидного с незначительным провалом до неоднородного с провалом практически до нуля на оси трубки. Из приведенных на том же рисунке расчетных радиальных распределений компоненты  $E_z$ , вносящей доминирующий вклад в поддержание разряда, видно, что характер распределения плотности плазмы коррелирует с распределением электрического поля ПЭВ, определяющего процессы ионизации. Радиальный профиль определяется балансом между процессами амбиполярной диффузии и объемной диссоциативной рекомбинации, приводящими к формированию более плавного по сравнению с полем градиенту.

**Глава 4** посвящена исследованию процесса распространения СВЧ-разряда низкого давления, поддерживаемого ПЭВ  $m = 1$  моды, в кварцевой трубке наполненной воздухом [3а]. Процесс распространения разряда можно представить как распространяющийся по газу фронт ионизации, за которым остается плазменный столб, поддерживаемый поверхностной волной. Энергия к фронту подводится по плазменному столбу. Скорость фронта экспоненциально уменьшается с расстоянием при распространении от источника излучения из-за потерь СВЧ-мощности на поддержание концентрации электронов в плазменном столбе и стремится к нулю в результате установления энергобаланса ионизации и потерь.

Скорость определяется частотой ионизации и может быть выражена, как  $v_f = \tilde{v}_i \Delta_f$ , где  $\Delta_f$  – характерный размер фронта,  $\tilde{v}_i = v_i - v_{loss}$  – постоянная лавины, а  $v_i$  и  $v_{loss}$  – частоты ионизации и электронных потерь

соответственно. Характерный размер фронта определяется следующим выражением:  $\Delta_f = n^{-1}(z_0) \int_{\Delta} n(z) dz$ , где  $n(z_0)$  – плотность плазмы перед фронтом. При давлении 0,1 Торр, соответствующему минимуму электронных потерь, максимальная скорость фронта (на выходе из аппликатора)  $v_f = 6 \cdot 10^6$  см<sup>-3</sup>. Эксперименты показали, что характерный размер фронта  $\Delta_f \approx 2$  см близок к диаметру разрядной трубки (2,1 см), не зависит от давления и не изменяется с расстоянием от аппликатора.

На заключительной стадии распространения, т.е. при приближении постоянной лавины  $\tilde{V}_i$  к нулю, обнаружен неустойчивый режим распространения разряда низкого давления [4а], поддерживаемого ПЭВ, характеризующийся частичными распадами, скачками и остановками фронта. Данный эффект был промоделирован с помощью металлического зеркала, помещенного в конец столба: область неустойчивости перемещалась вместе с перемещением зеркала. Также при перемещении зеркала разряд мог прекращать распространение как за 5–6 см до зеркала (что близко к  $\lambda_s/2$ ), так и достигая зеркала без распадов и скачков фронта. Наиболее чисто эти эффекты проявляются при оптимальных условиях возбуждения разряда, когда длина стационарного плазменного столба значительно превышает длину волны. Они наблюдались как в воздухе, так и в аргоне и, вероятно, не зависят от рода газа. Возникновение таких неустойчивостей связано с возмущением поля поверхностной волны в прифронтной области разряда и излучением плазменного столба в пространство перед собой.

В параграфе 4.3 показано, что установка системы из двух металлических зеркал на пути распространения разряда позволяет жестко задать структуру поля, создаваемого излучением с хвоста разряда, и контролировать характер распространения разряда [3а]. Накачка энергии производилась через отверстие связи в первом зеркале: плазменный столб проникает в пространство между зеркалами, являясь элементом связи и возбуждая там поле стоячей волны. Интерференция объемного поля с полем

в прифронтальной области разряда приводит к образованию локального минимума поля, где нарушается условие для существования ПЭВ:  $n_{\min} > (1 + \epsilon_d)n_c \approx 4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ . В области узла поля стоячей волны скорость распространения разряда падает практически нуля. Распределение концентрации на границе столба в момент остановки имеет диффузионный характер и спадает от  $n_{\min}$  с характерным масштабом 1–2 см. Настройка распределения поля путем перемещения зеркала и изменения параметров разряда позволяет контролировать попадание диффузионного хвоста разряда в поле стоячей волны между зеркалами. При значении частоты лавины  $v_i - v_{\text{loss}} = 0$  распространение прекращается (рисунок 5а) и разряд переходит в стационарный режим. Рисунок 5б соответствует значению постоянной лавины больше нуля: в течение достаточно продолжительного времени (30–100 мкс) хвост разряда проходит локальный минимум поля. Далее плазма с таким распределением концентрации электронов на границе разряда попадает в область нарастающего в сторону пучности объемного поля резонатора, что приводит к стремительному росту ионизации.

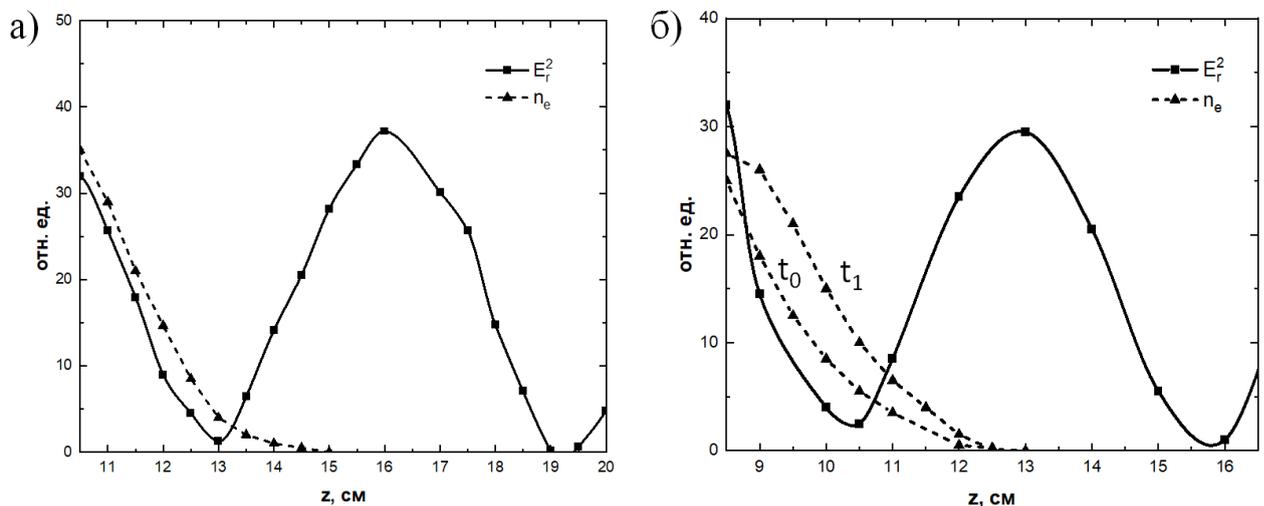


Рисунок 5. Распределения компоненты  $E_r^2(z)$  электрического поля (сплошные кривые) и средней по сечению плотности плазмы  $n_e(z)$  (пунктирная кривая). Постоянная лавины  $v_i - v_{\text{loss}} = 0$  (а) и  $v_i - v_{\text{loss}} > 0$  (б);  $t_0 = 0$  мкс,  $t_1 = 100$  мкс.

При достижении концентрации  $n_{\min}$  поверхностная волна продолжает распространение. Такое развитие разряда продолжается до следующего узла

поля, в котором он останавливается, и весь процесс повторяется. Разряд распространяется в виде следующих один за другим плазменных фрагментов длиной  $\sim \lambda_s/2$ , где  $\lambda_s \approx 10\text{--}11$  см – длина поверхностной волны, до исчерпания запасов энергии или до достижения им второго зеркала. Распределение скорости фронта по длине трубки имеет немонотонный скачкообразный характер с максимумами в пучностях поля (рисунок 6).

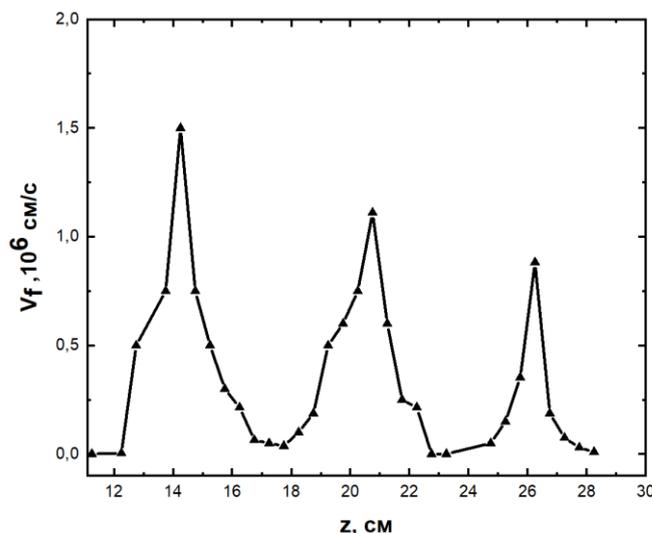


Рисунок 6. Распространение разряда между зеркал вдоль трубки в виде следующих друг за другом плазменных фрагментов длиной  $\lambda_s/2$ .

Экспериментально была показана возможность формирования от 1 до 6 плазменных фрагментов. В случае, когда разряд доходит до второго зеркала, между зеркалами устанавливается стационарный плазменный столб, поддерживаемый поверхностной волной. Амплитуда поля объемной электромагнитной волны при этом пренебрежимо мала по сравнению с амплитудой ПЭВ.

Приведенные на рисунке 7 продольные распределения средней по сечению плотности плазмы  $n_e(z)$  (кривая 1) и радиальной компоненты электрического поля ПЭВ  $E_r^2(z)$  (кривая 2) соответствуют стационарному плазменному столбу, сформированному 4-мя плазменными фрагментами, при этом длина плазменного столба меньше расстояния между зеркалами.

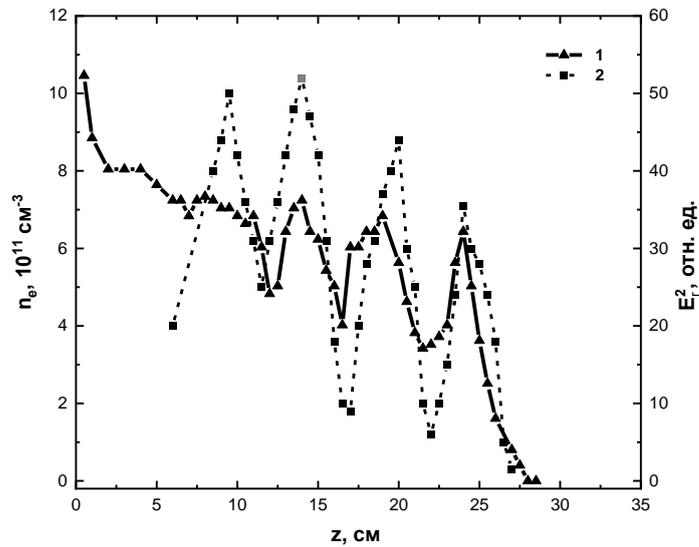


Рисунок 7. Распределения компоненты  $E_r^2$  электрического поля ПЭВ (2) и средней по сечению плотности плазмы  $n_e$  (1) вдоль плазменного столба между зеркал.

Плазменный столб характеризуется наличием продольной модуляции плотности плазмы, минимумы и максимумы которой совпадают с минимумами и максимумами распределения скорости этого разряда (рисунок б) до выхода на стационар. При этом, исходя из условия существования ПЭВ, даже в минимумах концентрация электронов не падает ниже  $n_{\min} = 3,8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ . Модуляция плотности совпадает также с модуляцией компоненты  $E_r$  поля ПЭВ, возникающей вследствие частичного отражения от конца разряда. Длина ПЭВ  $\lambda_s$  изменяется по столбу от 11 до 10 см, тогда как в вакууме  $\lambda_0 = 12,1$  см, что подтверждает поддержание столба поверхностной волной.

### Заключение

Проведенные исследования позволили определить свойства СВЧ газового разряда низкого давления, поддерживаемого поверхностной электромагнитной волной в диэлектрической трубке. В рамках выполненных исследований были получены следующие **основные результаты**.

1. В результате исследования показано, что скорость распространения ионизационного фронта СВЧ-разряда низкого давления, поддерживаемого ПЭВ, определяется произведением его характерного

размера  $\Delta_f$  и частоты ионизации. Причем  $\Delta_f$  не зависит от давления в трубке и расстояния до источника (аппликатора).

2. Экспериментально обнаружено, что при приближении к балансу ионизации и потерь на заключительной стадии распространения СВЧ-разряда низкого давления, поддерживаемого ПЭВ, реализуется неустойчивый режим распространения, характеризующийся частичными распадами, скачками и остановками фронта. Показано, что развитие неустойчивостей связано с возмущением поля поверхностной волны в прифронтной области разряда и излучением плазменного столба в объем перед собой.
3. Показано, что установка системы из двух рефлекторов на пути распространяющегося разряда, поддерживаемого ПЭВ, позволяет жестко задать структуру поля, создаваемого излучением разряда, и контролировать его распространение. Это приводит к распространению разряда между рефлекторами в виде следующих друг за другом плазменных фрагментов длиной  $\lambda_s/2$  (где  $\lambda_s$  – длина поверхностной волны). Скорость распространения разряда между рефлекторами изменяется по затухающей синусоиде до исчерпания запасов энергии или по достижении им второго зеркала.
4. В результате эксперимента и численного моделирования показано, что при возбуждении стоячей ПЭВ  $m = 1$  моды радиальная и продольная компоненты электрического поля ПЭВ  $E_r$  и  $E_z$  вносят примерно равный вклад в поддержание разряда, вследствие чего в эксперименте не было зарегистрировано заметной модуляции плотности плазмы. При возбуждении стоячей волны  $m = 0$  моды вклад продольной электрической компоненты  $E_z$  в плазму на порядок превышает вклад радиальной компоненты  $E_r$ , что приводит к модуляции плотности плазмы, совпадающей по фазе с модуляцией  $E_z$ .
5. Экспериментально установлено, что время выхода на стационар модулированного плазменного столба, поддерживаемого стоячей ПЭВ  $m$

= 0 моды, близко к характерному времени диффузии. Степень модуляции плотности плазмы возрастает с давлением и определяется процессом диффузии. Продемонстрирована возможность формирования стационарного плазменного столба длиной  $L \gg \lambda_s$ , поддерживаемого ПЭВ  $m = 0$  моды с высокой степенью модуляции плазмы  $n_{\text{max}}/n_{\text{min}} = 5$ .

### Список публикаций автора по теме диссертации

- 1а. Гусейн-заде Н.Г., **Жуков В.И.**, Карфидов Д.М., Сергейчев К.Ф. Резонанс поверхностной волны Зоммерфельда в открытом резонаторе// Инженерная физика. 2017. № 12. С. 56-61.
- 2а. **Zhukov V.I.**, Karfidov D.M., Sergeichev K.F. Propagation of microwave surface-wave-sustained discharge in air// Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1383. p. 012021. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1383/1/012021>.
- 3а. **Жуков В.И.**, Карфидов Д.М., Сергейчев К.Ф. Распространение СВЧ-разряда, поддерживаемого поверхностной волной в кварцевой трубке в воздухе низкого давления// Физика плазмы. 2020. Т. 46. № 8. С. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0367292120080120>.
- 3а. **Zhukov V.I.**, Karfidov D.M. Development of the microwave surface wave sustained low-pressure discharge in standing wave field// Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2055. p. 12007. DOI: <https://doi.org/10.34854/ICPAF.2021.48.1.129>.
- 5а. **Жуков В.И.**, Карфидов Д.М. СВЧ газовый разряд низкого давления, поддерживаемый полем стоячей поверхностной волны дипольной моды// Физика плазмы. 2023. Т. 49. № 3. С. 260-269. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0367292122600820>.

### Публикации в сборниках трудов и тезисов конференций

- 6а. Сергейчев К.Ф., Карфидов Д.М., **Жуков В.И.**, Гусейн-заде Н.Г. Возбуждение поверхностной волны на положительном столбе газового разряда// Тезисы XLV Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. — Москва, 2018. С. 236.
- 7а. **Жуков В.И.**, Карфидов Д.М., Сергейчев К.Ф. Распространение СВЧ импульсного разряда, поддерживаемого поверхностной электромагнитной волной // Тезисы XLVI Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. — Москва, 2019.
- 8а. **Жуков В.И.**, Карфидов Д.М. Самоподдерживающийся СВЧ-разряд на поверхностной волне в воздухе // Сборник научных статей IV международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем», Москва, 2019. с 172-174.

- 9а. **Жуков В.И.**, Карфидов Д.М., Сергейчев К.Ф. Структура СВЧ разряда низкого давления, поддерживаемого поверхностной волной // Тезисы XLVII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. — Москва, 2020.
- 10а. **Жуков В.И.**, Карфидов Д.М. Развитие самосогласованного СВЧ разряда низкого давления на поверхностной волне в поле открытого резонатора // Тезисы XLVIII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. — Москва, 2021.
- 11а. **Жуков В.И.**, Карфидов Д.М. Формирование СВЧ разряда низкого давления, поддерживаемого поверхностной волной в заданном поле // Тезисы VII Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛАПЛАЗ-2021. — Москва, 2021.
- 12а. **Жуков В.И.**, Карфидов Д.М. Возбуждение дипольной и аксиально-симметричной моды СВЧ стоячей поверхностной электромагнитной волны в газовом разряде низкого давления при различных параметрах плазмы // Тезисы XLIX Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. — Москва, 2022.
- 13а. **Жуков В.И.**, Карфидов Д.М. СВЧ разряд низкого давления, поддерживаемый стоячей поверхностной электромагнитной волной // Сборник научных трудов V Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» Радиоинфоком-2021. Москва. 15-19 ноября 2021.
- 14а. **Жуков В.И.**, Карфидов Д.М. Распределение плазмы в столбе СВЧ разряда, поддерживаемого стоячей поверхностной волной // Сборник тезисов L Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, г. Москва, 20–24 марта 2023г. с. 182.
- 15а. **Zhukov V.I.**, Karfidov D.M. Structure of low pressure microwave discharge sustained by a surface wave // 19<sup>th</sup> International Workshop Complex Systems of Charged Particles and Their Interactions with Electromagnetic Radiation. Moscow, April 10-13, 2023. p 104.
- 16а. **Жуков В.И.**, Карфидов Д.М. Профиль плотности плазмы в СВЧ разряде низкого давления, поддерживаемом полем поверхностной волны // Сборник научных трудов IX международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛАПЛАЗ-2023, 28-31 марта, 2023 г. с. 161.

### Список цитируемой литературы

1. Sommerfeld A. Ueber die Fortpflanzung elektrodynamischer Wellen längs eines Drahtes // Annalen der Physik und Chemie. – 1899. – V. 303. – No. 2. – P. 233–290.
2. Polo J.A., Lakhtakia A. Surface electromagnetic waves: A review // Laser & Photonics Reviews. – 2011. – V. 5. – No. 2. – P. 234–246.
3. Moisan M. et al. Properties and applications of surface wave produced plasmas // Revue de Physique Appliquée. – 1982. – V. 17. – No. 11. – P. 707–727.

4. Trivelpiece A.W., Gould R.W. Space Charge Waves in Cylindrical Plasma Columns // Journal of Applied Physics. – 1959. – V. 30. – No. 11. – P. 1784–1793.
5. Moisan M., Zakrzewski Z. Plasma sources based on the propagation of electromagnetic surface waves // Journal of Physics D: Applied Physics. – 1991. – V. 24. – No. 7. – P. 1025–1048.
6. Benova E. et al. Characteristics of 2.45 GHz Surface-Wave-Sustained Argon Discharge for Bio-Medical Applications // Applied Sciences. – 2022. – V. 12. – No. 3. – P. 969.
7. Girka V., Girka I., Thumm M. Applications of Surface Wave Propagation // Surface Flute Waves in Plasmas. Cham: Springer International Publishing, – 2014. – V. 79. – P. 129–159.
8. Истомин Е. Н., Карфидов Д. М., Минаев И. М., Рухадзе А.А. и др. Плазменный несимметричный вибратор с возбуждением поверхностной волной // Физика плазмы. – 2006. – Т. 32. – №. 5. – С. 423-435.
9. Wang C. et al. Low-Profile Broadband Plasma Antenna for Naval Communications in VHF and UHF Bands // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2020. – V. 68. – No. 6. – P. 4271–4282.