

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор –

проректор по научной работе

ФГАОУ ВО РUDН

д.м.н., проф.

член-корреспондент РАН

А.А. Костин



20 23 г.

ОТЗЫВ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» 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. выполнена в области плазменной СВЧ-электроники и посвящена изучению СВЧ разряда низкого давления, поддерживаемого поверхностной волной в самосогласованном режиме.

Несмотря длительную историю исследований, ВЧ разряды с ПЭВ остаются объектом интенсивных фундаментальных исследований. Это связано с высокой эффективностью трансформации энергии электромагнитной волны (от 1 МГц до 10 ГГц) в поверхностную волну, которая поддерживает разряд и позволяет достичь высокой плотности заряженных частиц в широком диапазоне давлений (от десятков мТорр до атмосферного давления). Разряды подобного типа являются эффективным методом генерации низкотемпературной плазмы, а исследовательский интерес к ней обусловлен как богатством происходящих в нем физических процессов, так и широкими возможностями его практического применения: плазменная обработка поверхностей, CVD осаждение тонких алмазных пленок, дезинфекция и стерилизация материалов, удаление двуокси углерода (CO₂) из смеси газов. Особое внимание эти исследования представляют для разработки электронно-управляемых антенн, обеспечивающих операционное

быстродействие, а также оперативный контроль и управление электродинамическими параметрами антенны. Работа является естественным продолжением работ, ведущихся в отделе физики плазмы ИОФ РАН на протяжении последних нескольких десятилетий, и диссертант эффективно использовал арсенал наработанных знаний и экспериментальных методик, развивая и применяя их для систематических исследований в своей работе

Диссертационная работа Жукова В.И. имеет классическую структуру изложения, состоящую из введения, четырех глав и заключения. Работа общим объемом 108 страниц состоит из введения, четырех глав, заключения, содержит 55 рисунков и список литературы из 96 наименований.

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

-Актуальность темы выполненной работы связана с необходимостью поиска новых оптимальных решений ряда важных задач современной плазменной СВЧ-электроники в области разработки эффективных источников плазмы с широким спектром практических приложений.

Во **введении** сформулированы цель, задачи работы, сформулированы научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые автором на защиту

Первая глава в большей части своей посвящена теоретическим основам ПЭВ в контексте экспериментальных исследований по генерации ПЭВ на плазменном столбе газового разряда в диэлектрических трубках. Особое внимание уделено структуре ПЭВ и условиям ее распространения на плазменном столбе, а также особенностям основных типов аппликаторов, обеспечивающих эффективную трансформацию СВЧ/ВЧ энергии в ПЭВ.

Во **второй главе** представлены описания экспериментальных стендов, на которых выполнялась данная работа. Приведено краткое описание используемых диагностик и методик обработки экспериментальных результатов.

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований по изучению структуры разряда, поддерживаемого дипольной и аксиально-симметричной модой поверхностной волны, а также характеристик разрядов в зависимости от схемы реализации разряда и изменения рабочих параметров. Представлены результаты численного моделирования структуры электрического поля ПЭВ и профилей плотности плазмы в условиях, приближенных к натурному эксперименту. Экспериментально реализовано возбуждение разряда, поддерживаемого стоячей ПЭВ, а также изучены распределения компонент поля генерируемых мод ПЭВ.

Четвертая глава посвящена изучению динамики разряда, поддерживаемого ПЭВ в кварцевой трубке, наполненной воздухом. Проведены исследования, которые позволили определить параметры, определяющие скорость распространения ионизационного фронта, а также закономерность ее изменения вдоль плазменного канала. Экспериментально обнаружен нестабильный режим распространения разряда, связанный с возмущением поля поверхностной волны. Установлен факт, что помещение металлических зеркал на пути распространения волны позволяет контролировать эти процессы и жестко задавать структуру поля ПЭВ, приводящую к формированию между зеркалами плазменных фрагментов, длина которых равна половине длины ПЭВ.

В заключении представлены основные результаты и выводы по работе.

Обоснованность и достоверность диссертационного исследования подтверждается тем, что экспериментальная работа проводилась с использованием надежного сертифицированного оборудования и общепринятых методик измерений и диагностики плазмы. В работе применялись современные методы сбора, хранения и обработки данных и адекватное компьютерное моделирование. Приведенные результаты свидетельствуют о непротиворечивости выводов, полученных при компьютерном моделировании и натурном эксперименте.

Научная новизна работы.

В работе 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. 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 λ_s – длина поверхностной волны) до исчерпания запасов энергии или по достижении им второго зеркала. Таким образом, впервые был продемонстрирован не исследованный ранее механизм распространения разряда, поддерживаемого ПЭВ, в поле объемной стоячей волны, создаваемой самим разрядом.

Возбуждение стоячей ПЭВ на плазменном столбе позволило исследовать структуру поля возбуждаемых мод поверхностной волны и их влияние на поддержание разряда. Измерения распределения поля поверхностной волны и численная модель стоячей ПЭВ на плазменном столбе позволяет исследовать структуру стоячего поля ПЭВ дипольной и аксиально-симметричной моды как снаружи плазменного столба, так и внутри него. Впервые была показана возможность создания стационарного сильномодулированного (степень модуляции плотности плазмы $n_{e\max}/n_{e\min} = 5$) плазменного столба длиной порядка 10 длин волн, поддерживаемого стоячей ПЭВ аксиально-симметричной моды, в то время как возбуждение стоячей ПЭВ дипольной моды не приводит к заметной модуляции плотности плазмы.

Полученные результаты существенно расширили представление о процессах, имеющих место в разрядах такого типа с учетом схемы его реализации, и несомненно представляют как фундаментальный, так и практический интерес.

-Научно-практическая и теоретическая значимость выполненной работы состоит в определении: оптимальных условий поддержания поверхностной СВЧ волной разряда в воздухе низкого давления, структуры поля возбуждаемых мод ПЭВ и их влияние на поддержание разряда,

динамических характеристик и особенностей распространения разряда, условий поддержания резонанса, обеспечивающего генерацию плазменного столба с высокой степенью модуляции плотности плазмы, условий возникновения неустойчивого режима распространения, связанного с возмущением поля ПЭВ в области ионизационного фронта. Полученные фундаментальные результаты могут быть учтены в разработке управляемых плазменных антенн, а также других радиотехнических устройств.

Апробация. По результатам диссертационной работы были опубликованы 5 статей в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК. Основные результаты были представлены на тематических международных и всероссийских конференциях, неоднократно обсуждались на научных семинарах ИОФ РАН. Научные исследования по тематике диссертационной работы были поддержаны грантом РФФИ «Аспиранты».

Переходя к общей оценке диссертации, нужно отметить, что написана она четко, ясно и в ней мало технического брака. Вместе с тем к рассмотренной работе имеются отдельные вопросы, частные замечания и пожелания.

Практически все графические зависимости, приведенные в 1 главе, даются без ссылок на оригинальные статьи (к примеру рис.1.3 заимствован из работы [34]) и так далее по всей главе. На стр. 35 проводится обсуждение аксиального профиля плотности плазмы при различных модах ПЭВ на рабочей частоте 2.45 ГГц,- рис. 1.9 (взят из работы [16] ссылка также отсутствует) и приводится утверждение, что в этом случае интенсивность свечения $\sim n_e$ с ссылкой на работу [23]. В этой работе действительно приведены результаты изучения продольного профиля плотности в плазменном столбе, но при частоте 490 МГц и давлении 0.04 Торр, что выходит за диапазон рабочих параметров, заявленных диссертантом в целях работы (сантиметровый диапазон, диапазон давлений ограничен значениями 0.1 – ед. Торр).

По материалам второй главы, посвященной постановке эксперимента и применяемым диагностикам, а также методикам обработки результатов

измерений, остается непонятным, зачем проводились измерения в режиме сурфатрона на частоте 440 МГц, т.е. на рабочей длине волны 0.7 м, если в заявленной цели указан сантиметровый диапазон. Если для сравнения, то это должно быть дополнительно оговорено, т.к. эти исследования выходят за рамки диапазона, определенного целями диссертационной работы.

Не вполне обосновано, почему для определения абсолютного значения средней по сечению концентрации электронов применен метод зондирования плазмы направленными волнами в диапазоне частот $5.5 \div 7.5$ ГГц. Данный метод достаточно подробно обсуждается в монографии [40], где четко оговорено его применение: характерные размеры плазмы значительно больше длины волны ($l > \lambda$), в противном случае его применение требует строгих обоснований. Результаты моделирования методики измерений, выполненные в программе CST Microwave Studio, на которые ссылается диссертант, должны были быть приведены в данном разделе. Далее указывается «...Моделирование автоматически учитывало особенности используемой диагностической рупорной системы (каустика, рефракция и отражение), а также позволяло задавать плазму как с докритической, так и сверхкритической концентрацией» (стр. 51), но данные результаты отсутствуют в тексте диссертации. Отсутствует также ясность в отношении того, как определено, что «... Пространственное разрешение метода ~ 4 см».

Одним из методов определения пространственного распределения концентрации, а также динамики ионизационного фронта в работе являлось измерение интегрального излучения. Правомерность и применимость таких измерений базировались на выводах, полученных в работах [23, 81] по изучению ПЭВ с аппликатором типа сурфатрон для рабочих частот 440 - 600 МГц. В этих работах такие измерения проводились в диапазоне давлений 2 – 50 мТорр в видимой части спектра 320-860 нм совместно с корректными измерениями концентрации методом калиброванной эмиссионной оптической спектрометрии. Пространственное разрешение применяемой схемы составляло 1 мм.

В параграфе 2.2.3, посвященном данной диагностике, весьма поверхностно представлена информация о типе детектора, параметрах коллимационной системы о методах определения спектрального состава излучения, учитывающих многообразие применяемых смесей плазмообразующих газов. Указанный спектральный диапазон применяемого детектора (700-1100 нм), а также диапазон давлений (указаны только конкретные значения: 0.25 – 6.5 Торр -аргон, 1- 3 Торр бактерицидная лампа - аргон 80%, ксенон), а также рабочая частота не соответствуют условиям описанным в работах [23, 81]. Отсутствует какая-либо информация о конкретных значениях погрешностей и методах расчета корректирующих множителей. В работе приводятся лишь общие слова «...учитывались погрешности, обусловленные прохождением оптического излучения через кварцевую трубку» (стр. 54).

Не ясно каким образом изучен радиальный профиль плотности. В главе 2, посвященной постановке экспериментов, этот момент вовсе опущен, лишь только в главе 3 (параграф 3.2.2) диссертант упоминает о «... не возмущающим плазму методом поперечных снимков плазменного столба с последующей обработкой с помощью преобразования Абеля», но про пространственное разрешение данного метода и ошибке измерений (рис. 3.10) в работе нет ни слова, Более того, при моделировании рассматривается случай когда «.....радиальный профиль плотности считается однородным (стр. 50)», результаты которого в дальнейшем используются для определения продольного профиля плотности плазменного столба.

Материал представленный, в 3-й и 4-й главах, перегружен фактическим материалом различной эвристической ценности, поэтому затрудняется выделение основных результатов на фоне второстепенных. Большая часть зависимостей и фотографий приведены без указания схемы реализации разряда (типа аппликатора, линейных размеров диэлектрической трубки) и привязки к масштабу реальной геометрии, которые от раздела к разделу менялись, что усложняло осмысление представленных результатов и их обобщений. Отсутствуют первичные экспериментальные данные в привязке к

изменяемым параметрам разряда, что способствовало бы большей убедительности в правомерности полученных выводов. Ввиду того, что схема реализации разряда являлась практически определяющим фактором в определении эффективности разряда, необходимо было бы приводить однотипные измерения для различных схем его реализации и приводить их в сравнении.

Несмотря на указанные недочеты, в целом диссертация Жукова В.И. представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, выполненную на высоком научном уровне. Диссертант проявил себя исследователем, способным анализировать и находить подходы к решению сложных проблем. Приведенные недостатки не умаляют достоинств работы, выявленные закономерности получены с помощью широкого комплекса средств диагностики и достоверность результатов не вызывает сомнений. Основные результаты работ изложены в научных статьях, индексируемых в международных реферативных базах, содержание диссертации достаточно полно отражено в автореферате.

Результаты работы Жукова В.И. имеют существенное значение для развития плазменной СВЧ-электроники.

Работа Жукова Всеволода Игоревича соответствует п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – «Физика плазмы».

Отзыв составил кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель директора Института физических исследований и технологий (ИФИТ) РУДН Андреев Виктор Викторович.

зам директора ИФИТ РУДН

к.ф.м.н., доцент



(подпись)

Андреев Виктор Викторович

(расшифровка подписи)

Доклад соискателя по диссертационной работе был заслушан на

заседании (№ 36) научного семинара Института физических исследований и технологий (ИФИТ) РУДН «27» сентября 2023 г. Подготовленный отзыв ведущей организации на диссертационную работу заслушан, обсужден и одобрен на заседании ИФИТ «16» октября 2023 г., Протокол № 0200-53/05(№3).

директор ИФИТ РУДН
д.ф.-м.н. профессор



(подпись)

Лоза Олег Тимофеевич
(расшифровка подписи)

Подписи Андреева В.В. и Лозы О.Г. заверяю:

Ученый секретарь
Ученого совета РУДН



Курылев К.П.
(расшифровка подписи)

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет дружбы народов»
117198, ЮЗАО, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, <http://www.rudn.ru>.
Телефон: (495) 952-26-44
Почта: sci@rudn.ru