

«УТВЕРЖДАЮ»

Зам. директора Федерального
государственного бюджетного учреждения
науки Физико-технического института

им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук



И.Ф. М.Н. _____ П.Н. Брунков

« 11 » _____ 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук на диссертацию **Кузьмина Евгения Игоревича «Генерация плазмы геликонного ВЧ разряда в неоднородном магнитном поле»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. Физика плазмы

Актуальность темы исследований

Диссертация Кузьмина Е.И. посвящена исследованию плазмы геликонного разряда и оптимизации работы геликонного ВЧ источника для целей материаловедческих исследований на линейных плазменных установках. Большую роль в процессах генерации геликонного ВЧ разряда играет распределение магнитного поля, наличие градиента поля способно существенно влиять на эффективность источников геликонного типа, что было продемонстрировано в ряде экспериментов с низкой мощностью ВЧ генератора. Данный факт повышает интерес к разработке экспериментальных установок с неоднородным магнитным полем и высокой подводимой ВЧ мощностью. Поскольку для целей исследований материалов стенок термоядерного реактора существует запрос на разработку стационарных источников плазмы с высоким потоком плазмы, данная тема является актуальной и востребованной.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Диссертация содержит 92 страницы, 58 рисунков и библиографический список из 110 работ.

Во введении представлена актуальность исследования, сформулированы цель и задачи работы, а также положения, выносимые на защиту, обоснованы научная новизна, практическая значимость и достоверность результатов исследования. Также отмечены личный вклад автора, апробация работы на конференциях и семинарах, публикации по теме диссертации.

В первой главе представлен краткий обзор параметров установок со схожими свойствами и направлением исследований.

Во второй главе показано решение дисперсионного уравнения для замагниченной плазмы с учетом электростатического коротковолнового предела, определены допустимые зоны генерации геликонных и электростатических ТГ-волн для конкретных параметров плазмы, наблюдаемых в эксперименте, определены критические значения магнитного поля, при котором наблюдается затухание ТГ-волн.

В третьей главе описана экспериментальная установка и конструкционные особенности, отличающие ее от других источников плазмы такого типа. В главе представлено подробное описание тройного Ленгмюровского зонда и СВЧ диагностики плазмы методом «отсечки», а также пояса Роговского для измерений нагрузки плазмы, представлены конструкционные особенности схем согласования нагрузки генератора и импеданса плазмы.

В четвертой главе подробно изложены основные экспериментальные результаты научной работы, в представленные в трех подразделах. Первый раздел посвящен оптимизации генерации ВЧ разряда с целью увеличения плотности плазмы при мощности до 15 кВт. Показаны зависимости плотности и электронной температуры от ВЧ мощности, величины магнитного поля и давления напуска нейтрального газа, а также радиальные распределения плотности и электронной температуры для оптимальных параметров. Во втором подразделе описаны методы улучшения уровня согласования нагрузки генератора и импеданса плазмы с повышением вводимой мощности до 25 кВт. Также представлены результаты экспериментов по определению нагрузки плазмы и коэффициента эффективности ввода ВЧ мощности. В последнем подразделе описаны эксперименты с изменением величины градиента магнитного поля для трех различных конфигураций магнитного поля. Также показаны результаты измерения плотности плазмы СВЧ диагностикой.

В заключение представлен анализ полученных результатов и предложено объяснение наблюдаемых эффектов.

Научная новизна исследования

В рамках диссертационной работы Кузьмина Е. И. впервые проведены эксперименты по генерации плазмы геликонного разряда на экспериментальном стенде с неоднородным профилем внешнего магнитного поля при высокой подводимой мощности (до 25 кВт). В данном источнике реализован принцип пробкотрона за счет ослабления поля в области антенны, что создает градиент магнитного поля, а наличие пяти катушек с возможностью независимого варьирования тока позволяет создавать магнитные поля разной формы, в том числе с расходящимся, сходящимся фронтом, а также конфигурации с разнонаправленными токами в соседних катушках.

Обоснование и достоверность результатов

Результаты экспериментов, представленных в работе, являются хорошо обоснованными и не противоречат другим экспериментальным работам по геликонному разряду. Также в исследовании наблюдаются эффекты, подтверждаемые теоретическими работами других авторов по теме генерации плазмы ВЧ разряда в неоднородном магнитном поле.

Научная и практическая значимость

Основная теоретическая и практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что получены высокие значения плотности плазмы, соответствующие уровню материаловедческих линейных установок с высокочастотными и дуговыми источниками плазмы. Исследованы ранее не изученные режимы генерации геликонной плазмы в пробочной конфигурации и расходящемся магнитном поле на установках с высокой мощностью (более 5 кВт). Также обнаружено значительное увеличение эффективности плазменного источника в неоднородном магнитном поле.

Замечания по работе

1. Одной из целей работы было достижение режима работы при максимально допустимой мощности ВЧ генератора (25 кВт). Во второй главе работы описана методика достижения высокого уровня согласования импеданса плазмы с нагрузкой генератора при

мощности до 25 кВт, но в первой главе представлены эксперименты по оптимизации параметров плазмы только при мощности до 15 кВт.

2. На некоторых рисунках в разделе 4.1 ВЧ мощность генератора имеет обозначение, отличное от представленного в других главах.

3. На рисунке 5.1.6 верхний правый график должен иметь порядок 10^{12} см^{-3} .

4. В разделе 4.1 в отличие от раздела 4.3 имеются только параметры, измеренные зондом, а результаты для СВЧ диагностики не указаны.

5. В разделе 4.3, посвященном системе ВЧ питания и согласования, указано, что как правило емкостной разряд не нуждается в дополнительном согласовании генератора и плазмы, что далеко не всегда так даже для мощностей ниже 100 Вт. В установках по изучению ВЧ-разряда применяются П- и Г-образные устройства согласования, а также внутривакуумные устройства предсогласования.

6. На рисунке 4.4.3 приведена аббревиатура «ОП», не расшифрованная в тексте диссертации.

Оценка работы

Диссертация соискателя является законченным научным исследованием по актуальной теме, выполненным автором на высоком научном уровне. Представленные в работе результаты являются достоверными, выводы и заключение аргументированы и обоснованы. Представленные соискателем ученой степени материалы диссертации в полной мере опубликованы в рецензируемых научных изданиях. По теме диссертации опубликовано 4 работы, из них 2 статьи в научных журналах и 2 – в сборниках трудов конференций. Все 4 работы проиндексированы в международных реферативных базах данных Web of Science и Scopus. Основные положения и выводы диссертационного исследования представлены на 4 международных конференциях, в том числе на 3-х лично автором. Автореферат работы соответствует основному содержанию диссертации.

Заключение

Диссертационная работа Кузьмина Евгения Игоревича «Генерация плазмы геликонного ВЧ разряда в неоднородном магнитном поле», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, удовлетворяет всем критериям, установленным п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842. Диссертация достойна положительной оценки, а ее автор – Кузьмин Е.И. заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. Физика плазмы.

Отзыв составил: кандидат физ.-мат наук,
научный сотрудник лаборатории физики
высокотемпературной плазмы ФТИ им. А.Ф. Иоффе
Дмитриев Артем Михайлович
тел.: +7 952 214-66-12
e-mail: artem.dmitriev@mail.ioffe.ru

 /Дмитриев А. М/

Результаты диссертации были рассмотрены и одобрены на заседании семинара Лаборатории физики высокотемпературной плазмы ФТИ им. А.Ф. Иоффе 18 ноября 2022 г.

Заведующий лабораторией физики
высокотемпературной плазмы ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
доктор физ.-мат наук, профессор
Гусаков Евгений Зиновьевич
тел.: +7 921 755-51-24
e-mail: evgeniy.gusakov@mail.ioffe.ru



_____/Гусаков Е. З./

Подписи Дмитриева А.М. и Гусакова Е.З. заверяю:
Ученый секретарь ФТИ им. А.Ф. Иоффе
кандидат физ.-мат. наук
Патров Михаил Иванович
тел.: +7 905 219-82-69
e-mail: michael.patrov@mail.ioffe.ru



_____/Патров М.И./

« 18 » __ноября__ 2022 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
Адрес: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
Тел.: +7 (812) 297-22-45
Эл. почта: post@mail.ioffe.ru
Сайт организации: <https://www.ioffe.ru>