

ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата физико-математических наук

Изотова Ивана Владимировича

на диссертационную работу

Кузьмина Евгения Игоревича

«Генерация плазмы геликонного ВЧ разряда в неоднородном магнитном поле»,

представленную в диссертационный совет 24.1.162.02 на базе

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института ядерной физики им. Г.И. Будкера

Сибирского отделения Российской академии наук

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

по специальности 1.3.9. Физика плазмы

Актуальность работы:

Значительная часть исследований, связанных в настоящее время с управляемым термоядерным синтезом, приходится на разделы материаловедения, изучающие взаимодействие горячей плотной плазмы со стенками будущих термоядерных реакторов. Для подобных исследований необходимы источники плазменных потоков, с помощью которых возможно лабораторное моделирование процессов, происходящих в результате такого взаимодействия.

В диссертационной работе Кузьмина Е. И. рассматривается геликонный высокочастотный разряд как источник плазменного потока для материаловедческих исследований в области термоядерного синтеза. ВЧ разряды становятся все более востребованными в различных областях экспериментальной физики, поскольку безэлектродные плазмогенераторы позволяют работать в непрерывном режиме длительное время, при этом в плазме практически не содержится примесей. В отличие от более широко распространенных емкостных и индуктивных ВЧ разрядов, геликонный разряда позволяет достичь существенно больших плотностей и температур плазмы, что делает такой источник особенно интересным в рамках описанной задачи. Данная диссертационная работа посвящена разработке эффективного геликонного ВЧ плазменного источника и исследованиям режимов генерации плазмы в неоднородном магнитном поле. Тема диссертационной работы Е.И. Кузьмина представляется важной и актуальной.

Новизна подхода и основные результаты:

Научная новизна и значимость полученных автором результатов состоит, прежде всего, в получении новых данных о возможности существенного увеличения эффективности геликонного источника при использовании несимметричной азимутальной антенны и неоднородного магнитного поля.

В работе было обнаружено увеличение плотности плазмы на порядок при переходе от наиболее распространенной среди геликонных источников антенны типа NAGOYA-III к азимутальной несимметричной антенне. Была успешно применена методика диагностики плотности плазмы по СВЧ отсечке, ранее не использовавшаяся в подобных источниках. При высокой мощности вводимого ВЧ излучения показано, что помимо величины магнитного поля, на плотность плазмы влияет величина его градиента.

Проведены исследования по оптимизации согласования импеданса плазмы с источником ВЧ излучения.

Достоверность полученных результатов:

Исследования, представленные в работе, проведены с использованием целого ряда экспериментальных методик, а их объем весьма значителен. Работы, выполненные с использованием различных (в некоторых случаях дублирующих друг друга) методов диагностики, сравнение их результатов с существующими аналогами и теоретическими расчетами, обсуждение полученных данных на специализированных конференциях, публикации в научных журналах не вызывают сомнения в обоснованности и достоверности научных положений и выводов. Проведенные исследования были использованы для реализации международного контракта по созданию геликонного источника плазмы для материаловедческих исследований. Также на основе выполненной работы был разработан концептуальный дизайн источника плазмы для международного проекта ALIANCE.

Результаты диссертации докладывались на российских и международных конференциях и представлены в 4 научных статьях в международных и российских журналах (в журналах из перечня ВАК при Минобрнауки России).

Практическая значимость полученных автором результатов:

Практическая значимость диссертации не вызывает сомнений. Результаты диссертационной работы могут использоваться в исследовательских, проектных и конструкторских организациях, работающих в области материаловедения, термоядерной физики, физики плазменных и ионных источников, ускорителей заряженных частиц. Необходимо отметить, что результаты работы могут быть крайне интересны с точки зрения разработки ионных источников, хотя автор и не упоминает в работе подобное возможное применение.

Содержание диссертации и ее завершенность:

Работа выстроена логично, ее структура и содержание отражают цели и задачи исследования. Работа представляется законченным научным трудом, отличающимся подробным изучением физики геликонного разряда в магнитном поле. Результаты, изложенные в диссертации, являются, несомненно, новыми и обладают большой научной значимостью, соответствуют мировому уровню исследований в области разработки плазменных ВЧ источников и, в значительной степени, определяют его.

Замечания и пожелания:

Как и любая большая работа, представленная диссертация имеет ряд незначительных недостатков.

В работе используется понятие эффективности разряда, которое никак не определено. Первое упоминание содержится во введении на стр. 4.

На стр. 5 введения упоминается соответствие между мощностью ВЧ генератора и плотностью плазмы. Наличие и характер соответствия не обсужден. Там же приведена сводная таблица различных геликонных источников, демонстрирующая мощность генератора, плотность и температуру плазмы и диаметр плазменного шнура. Представляется странным обсуждение «эффективности» без привязки к плазменному объему. Кажется, что параметр удельная мощность на единицу плазменного объема может быть наиболее удобен для определения эффективности, т. к. без знания длины плазменного шнура проводить сравнения источников представляется недостоверным.

В главе 1 приводится обзор различных геликонных источников. Опять же, при сравнении параметров плазмы и ВЧ генераторов не упоминается плазменный объем, что делает сравнение неоднозначным.

В главе 2 приведено изложение теории геликонных волн. К большинству обозначений отсутствуют пояснения, что заставляет читателя постоянно консультироваться с литературой по ссылкам. В частности, величина ks (которая, по-видимому, является «скин-волновым» числом) вообще никак не вводится в тексте и доступна только по ссылке. Кажется, что теоретическое изложение можно было бы сократить, оставив только основные формулы, необходимые для сравнения с экспериментальными результатами.

На стр. 25 утверждается, что на периферии плазменного столба плотность плазмы меньше. Подобное утверждение требует, как минимум, пояснения. Так, в самой же работе показаны экспериментальные поперечные профили плотности плазмы, имеющие провал в центре и растущие к периферии.

На стр. 29 рассматривается случай равновесной плазмы, но никак не поясняется, почему температуры электронов и ионов приняты равными.

На стр. 30 использована модель плазмы с двумя характерными областями без обоснования такого деления. Не указано, из каких соображений взяты конкретные значения параметров плазмы.

В разделе 3.4 описан тройной зонд, но никак не упоминается тот факт, что зонд находится в (слабом) магнитном поле. Отсутствие оценок на соотношение толщин слоев, длины пробега частиц и ларморовских частот может вызвать у читателя сомнения в применимости метода. На рис. 23 (стр. 43), по-видимому, опечатка — вместо «ИУ» указано «ОП».

На стр. 53 указывается, что радиальные профили параметров плазмы «обнаруживают ряд особенностей» при использовании несимметричной антенны. Полноволновой анализ представляется крайне трудоемким, однако, расчет вакуумного поля антенны был бы полезен для убеждения читателя в том, что параметры и распределения плазмы не являются прямым следствием величины ближнего поля.

На рис. 36 для мощности 7.5 кВт неверно указана степень по шкале плотности плазмы (по-видимому, там должно быть 10^{12}).

На стр. 66 указано, что получена плазма с плотностью $3 \cdot 10^{13}$, однако максимальная плотность, указанная на графиках ранее, составляла $2 \cdot 10^{13}$.

На стр. 71 сделан вывод о влиянии градиента магнитного поля на плотность плазмы. Данный вывод кажется преждевременным до демонстрации результатов с градиентом противоположного знака. Также представляется целесообразным обсудить местоположение зонда и влияние изменения сечения магнитной силовой трубки на локальную плотность плазмы. Не требуется ли введение поправочного коэффициента при сравнении измеряемой в области зонда плотности с измеряемой с помощью СВЧ-отсечки?

Отмеченные недостатки ни в коей мере не снижают важности и достоверности полученных в диссертации Е. И. Кузьмина результатов. В целом, диссертационная работа производит очень хорошее впечатление.

Оценка автореферата диссертации:

Автореферат полностью раскрывает основные положения диссертации.

Заключение оппонента по диссертации Е. И. Кузьмина на соискание ученой степени кандидата наук:

Диссертация Кузьмина Евгения Игоревича «Генерация плазмы геликонного ВЧ разряда в неоднородном магнитном поле» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. Физика плазмы является научно-квалификационной работой, совокупность результатов которой можно квалифицировать как решение важных научных проблем, связанных с разработкой


источников плазмы на основе геликонного ВЧ разряда и их применения для материаловедческих исследований в области термоядерного синтеза.

Диссертационная работа Е. И. Кузьмина «Генерация плазмы геликонного ВЧ разряда в неоднородном магнитном поле» полностью соответствует требованиям п. 9 «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.

Я, Изотов Иван Владимирович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Кузьмина Евгения Игоревича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,
Изотов Иван Владимирович
Кандидат физико-математических наук
Специальность 01.04.08 «Физика плазмы»,
адрес: 603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46
тел: +7 (910) 398-45-51
эл. почта: ivizot@ipfran.ru
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной
физики Российской академии наук»
Заведующий лабораторией ионных источников

«14» ноября 2022 г.

 _____ И. В. Изотов

Подпись И. В. Изотова заверяю
Ученый секретарь ИИФ РАН



 _____ И. В. Корюкин