

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Изотова Ивана Владимировича
«РАЗВИТИЕ РАЗРЯДА В МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ ИОННОГО ИСТОЧНИКА
В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОННОГО ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСА»,
представленной на соискание учёной степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.04.08-физика плазмы

Актуальность темы исследования

Темой диссертационной работы является исследование электронного циклотронного разряда (ЭЦР), возбуждаемого и поддерживаемого мощным микроволновым излучением в пробкотроне, как источника одно- и многозарядных ионов. Не прекращающийся – и более того непрерывно возрастающий – интерес к проблеме, являющейся основной для диссертации, объясняется прежде всего значительным числом физических направлений – как традиционных, так и появившихся в последние годы, а также широкой областью приложений, в которых ЭЦР ионный источник представляется устройством, способным решить стоящие перед наукой и техникой задачи. Подобные источники применяются в медицине в качестве преинжекторов в ускорители и для санации поверхностей, в микроэлектронике (ионная имплантация), в ядерной физике (инжекторы в ускорителях) и т.д.

Очевидным свидетельством несомненной актуальности диссертационной работы является её востребованность в целом ряде известных и весьма значительных зарубежных проектов. К их числу относится Европейский испарительный источник нейтронов (“European Spallation Source”), Европейский проект по исследованию осцилляций нейтрино (“Beta Beam”), установка “HIF” (“Heavy Ion Facility”) в Церне.

Исходя из возможности диссертанта удовлетворить в рамках проведённых исследований запросы как фундаментальной газоразрядной физики, так и её приложений, представленную работу можно смело отнести к одной из наиболее значимых из осуществлённых в России за последние годы.

Структура и содержание диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка основных публикаций по теме работы и списка литературы. Общий объём диссертации составляет 104 страницы, включая 49 рисунков. Список публикаций автора по теме диссертации содержит 16 наименований, список литературы содержит 68 наименований.

Остановимся кратко на результатах, представленных диссертантом. Первая глава диссертации посвящена построению численной модели, описывающей развитие ЭЦР в открытой магнитной ловушке. Обсуждаются особенности функции распределения электронов по энергиям на начальной стадии разряда. Разработана численная модель, выявляющая особенности формирования функции распределения на этой стадии. Работы, вошедшие в

первую главу, закладывают теоретическую основу ЭЦР ионного источника. Результаты используются при анализе экспериментов, описанных и обсуждённых в последующих главах.

В главе 2 описываются экспериментальные исследования начальной стадии ЭЦР в пробкотроне. Результаты, вошедшие в главу, относятся к открытому автором с коллегами нового режима работы ЭЦР источника ионов, заключающемуся в сильном всплеске ионного тока, возникающем в самом начале пробоя газа. Режим, названный режимом "Preglow", характеризуется относительно малыми временами существования с переходом – релаксацией – к стационарному состоянию с существенно меньшими ионными токами.

Приводятся результаты моделирования экспериментальных пиков "Preglow" с помощью описанной в главе 1 модели. Для ионов гелия и ионов аргона 4^+ и ниже получено хорошее согласие между численным моделированием и экспериментальными результатами. Тщательные экспериментальные исследования на трёх установках, сопоставленные по результатам с результатами численного моделирования, позволили высказать автору полукачественные соображения о механизме формирования "Preglow".

Безусловная ценность материала, приведённого в главе, заключается в открытии нового (не описанного ранее) фундаментального газоразрядного явления. На основании полученных результатов Изотовым И.В. предложен новый тип ЭЦР источника ионов, позволяющий создавать плазму с плотностью выше 10^{13} см^{-3} и температурой в диапазоне от нескольких сотен эВ до нескольких кэВ, экстрагируя из неё импульсные пучки ионов с плотностью тока выше 1 А/см^2 .

Результаты, представленные в главе 2, на наш взгляд относятся к наиболее значимым в диссертационном труде Изотова И.В.

И, наконец, глава 3 диссертации содержит в себе обсуждение физики возникновения эффекта "Preglow" и оценке его параметров от условий эксперимента. На основе проведённого анализа обсуждается источник ионов нового типа и приводятся результаты первых экспериментов на прототипе такого источника "SEISM".

В заключении приведены основные результаты и положения, выносимые на защиту.

Степень обоснованности научных положений, рекомендаций и выводов, полученных соискателем, может быть охарактеризована как **достаточная**.

Достоверность и новизна научных результатов

Обоснованность научных положений, выводов и **достоверность теоретических результатов** исследований подтверждается их сравнением с многочисленными экспериментальными данными, полученными в диссертации и опубликованными научными коллективами в России и за рубежом.

Достоверность экспериментальных результатов подтверждается тем, что они получены независимыми методами на различных установках и подтверждается их сравнением с результатами расчетов и измерений, выполненных в диссертации и за рубежом.

Результаты исследования изложены в научных статьях, опубликованных в ведущих российских и зарубежных журналах: Журнал Технической Физики, Physical Review, Physics of Plasmas, Plasma Physics and Controlled Fusion, IEEE Transactions on Plasma Science, Review of Scientific Instruments. Всего по теме диссертации опубликовано 34 работы, включая 16 статей в рецензируемых журналах и 18 статей в сборниках трудов международных конференций.

Новизна диссертационной работы определяется прежде всего тремя полученными впервые результатами, а именно:

- Экспериментальным обнаружением эффекта "Preglow", на основании которого предложен новый тип ЭЦР ионного источника;
- Первыми измерениями тормозного излучения ЭЦР плазмы с высоким энергетическим и временным разрешением;
- Первыми прямыми измерениями энергии горячих электронов, покидающих магнитную ловушку вдоль оси на начальной стадии разряда.

Научная и практическая значимость

Результаты, описанные в диссертации, использованы в ряде лабораторий ИПФ РАН, а также в Лаборатории субатомной физики и космологии (LPSC, г. Гренобль, Франция), Институте тяжёлых ионов (GSI, г. Дармштадт, Германия), Институте Физики Плазмы, (г. Милан, Италия) и Университете г. Ювяскюля (Финляндия).

На основе полученных в диссертационной работе результатов в LPSC в совместном с ИПФ РАН проекте запущен новый тип короткоимпульсного ЭЦР источника многозарядных ионов.

Оценивая работу Изотова И.В. в целом, следует подчеркнуть то, что она представляет собой проведённое на высоком уровне физическое исследование, которое безусловно может быть отнесено к одним из наиболее значительных работ, выполненных в последнее время в России в области газоразрядной низкотемпературной плазмы. Особой отличительной чертой диссертационного исследования, выделяющего его из большинства газоразрядных исследований

российских физиков, проводимых в настоящее время, является тесная связь с целым рядом зарубежных физических центров, существенно нарушенная в целом по России в последние годы.

Вместе с тем диссертационная работа не лишена недостатков, к числу которых можно отнести следующие:

1. Центральное место в диссертации принадлежит обнаружению и использованию явления генерации пучков энергичных ионов на ранней стадии ЭЦР (эффект "Preglow"). Относя открытие автора с коллегами к одной из главных ценностей диссертации, нельзя не заметить, что в представленном труде нет убедительного достаточно развёрнутого описания модели, объясняющей эффект «всплеска» ранней генерации выходящего из пробкотрона ионного тока. При этом нет сомнения в том, что модель, основанная на предположении об определяющем значении газовых поступлений с облучённых энергичными ионами стенок камеры, может претендовать на роль адекватно отражающей особенности эксперимента. Однако, хотелось бы иметь дополнительные экспериментальные данные, подтверждающие высказанные автором соображения о физике явления "Preglow". Если предполагается, что газовое поступление является результатом распыления металла – это, по-видимому, должно быть подтверждено исследованиями ионного состава или спектра излучения плазменного образования. Возможно, хотя и маловероятно, что определяющую роль играют десорбированные поверхностью газы. Хотелось бы, понимая природу "Preglow", найти способ существенным образом повлиять на параметры ионного «всплеска».

Не очень ясно на чём основано пренебрежение процессами неустойчивости плазмы на стадии "Preglow" и на более поздних стадиях.

2. Диссертационная работа написана аккуратно и легко читаема. Однако, вызывает некоторое отторжение «обогащение» её терминами, не имеющими на мой взгляд общефизического применения, и относящиеся скорее к «сленгу» местной значимости. Например:

«Квазимагнитодинамический режим», «Суперадиабатическое движение», «Квазилинейное плато» и др.

Сделанные замечания не должны снизить чрезвычайно высокой оценки рецензируемой работы.

Автореферат и опубликованные статьи правильно и полно отражают содержание диссертационной работы. Диссертация полностью отвечает требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание учёной

степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы. Изотов И.В. безусловно заслуживает присвоения ему искомой учёной степени кандидата физико-математических наук.

Работа представит несомненный интерес для Института Общей Физики РАН, Физического Института РАН, Института Высоких Температур РАН, Объединённого Института Ядерных Исследований , г. Дубна, Института Физики Высоких Энергий г. Протвино.

Доктор физ.-мат. наук
Зав. Лаб. ИОФ РАН
(119991, Москва, ул. Вавилова, 38)
Косый Игорь Антонович

Косый

14.09.2017

Тел.: (499) 135-4165
E-mail: kosyi@fpl.gpi.ru

Подпись Косого И.А. удостоверяю
Учёный секретарь Учёного совета ИОФ РАН
Доктор физ.-мат. наук



/С.Н.Андреев, /