

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Водопьянова Александра Валентиновича на тему: «**ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ РАЗРЯД, ПОДДЕРЖИВАЕМЫЙ МИЛЛИМЕТРОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ: ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ**» представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Не смотря на длительную историю исследований, изучение плазмы ЭЦР разряда остаётся актуальным в настоящее время и представляет большой интерес, как с прикладной, так и с фундаментальной точек зрения. Интерес к ЭЦР разрядам, поддерживаемым излучением миллиметрового диапазона длин волн обусловлен уникальностью параметров плазмы, которую можно создать и поддерживать мощным излучением современных генераторов - гиротронов. Основные отличительные особенности таких разрядов – это высокая эффективность нагрева электронов, высокий удельный энергозатрат, неравновесность и высокая плотность плазмы. На данный момент решена задача разработки и создания надёжных генераторов излучения практически на любую длину волны миллиметрового диапазона, стабильно работающих в импульсном и непрерывном режимах. Это дополнительно стимулирует развитие прикладных исследований плазмы ЭЦР разряда. Перечисленные обстоятельства делают тему диссертации А. В. Водопьянова, посвященной исследованиям уникальных свойств ЭЦР разрядов и разработке их разнообразных приложений, безусловно, **актуальной**.

### **Структура и содержание работы.**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка основных публикаций автора по теме диссертации и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 282 страницы, включая 121 рисунок, 2 таблицы, список основных публикаций автора по теме диссертации из 36 наименований и библиографический список из 172 наименований.

Во **Введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются цели и задачи, перечислены положения, выносимые на защиту, обосновывается научная новизна и практическая ценность работы.

В **первой главе** диссертации описаны исследования направленные на создание источника многозарядных ионов нового поколения. В этой главе рассматриваются физические особенности ЭЦР разряда в тяжелых газах, поддерживаемого миллиметровым излучением, в работе приводятся результаты экспериментов с нагревом плазмы СВЧ излучением с частотой 37 ГГц. Достаточно много внимания в этой главе уделено описанию созданной экспериментальной установки и диагностических методов, использованных в исследовании. В этой главе исследуется образование многозарядных ионов в плазме и описывается квазигазодинамический режим удержания плазмы, который реализуется в установке. Измерения параметров плазмы по спектрам тормозного излучения свидетельствуют, что в плазме имеется две фракции электронов. Первая, «тёплая» фракция, имеет температуру  $T_w \approx 300$  эВ и концентрацию  $N_w \approx 4 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>, вторая, «горячая» фракция, имеет температуру  $T_h \approx 10$  кэВ и концентрацию  $N_h \approx 1.5 \cdot 10^9$

см<sup>-3</sup>. Также глава содержит описание экспериментов по формированию ионного пучка из плазмы ЭЦР разряда. В экспериментальной установке используется двухэлектродная система пирсовой геометрии. Продемонстрирована возможность формирования пучка ионов. Полный ток пучка составил 0.45 мА, нормализованный эмиттанс - 0.25 п.мм·мрад.

Во **второй главе** диссертации предлагается и опробуется новая схема получения многозарядных ионов тяжёлых металлов. Схема основана на инъекции плазмы вакуумно-дугового разряда в магнитную ловушку, где в дальнейшем под действием нагретых в условиях ЭЦР электронов происходит дополнительная ионизация ионов металлов. В этой главе описываются исследования многократной дополнительной ионизации ионов плазмы вакуумно-дугового разряда в магнитной ловушке с нагревом электронов в условиях ЭЦР. Найдены оптимальные условия для образования многозарядных ионов как легкоплавкого (свинец), так и тугоплавкого (платина) металла. Первые эксперименты проводились на экспериментальной установке с нагревом плазмы СВЧ излучением с частотой 37.5 ГГц, а во второй части второй главы описываются эксперименты с нагревом плазмы излучением с частотой 75 ГГц. Для проведения этих экспериментов потребовалось, по сути, создать еще одну экспериментальную установку. Повышение частоты греющего излучения в два раза привело к существенному сдвигу распределения ионов по зарядовым состояниям в сторону больших кратностей ионизации. При оптимальных параметрах эксперимента получен пучок металлических ионов (платина) со средним зарядом +7. Максимальная достигнутая кратность ионизации металлических ионов составила 10+.

В **третьей главе** исследуется возможность формирования короткоимпульсных пучков многозарядных ионов с высоким средним зарядом. Для снижения времени развития разряда предложено использовать разрядную систему на основе отражательных разрядов (пенинговский разряд) в скрещенных ЕхН полях. Система позволяет при низком давлении  $\sim 10^{-5}$  торр создавать непрерывно горящий разряд в магнитной ловушке с концентрацией на уровне  $10^{12}$  см<sup>-3</sup>. В третьей главе приводится описание экспериментального исследования ЭЦР разряда в гелии при сильной предварительной ионизации разряда в разряде пеннинговского типа. В экспериментах получена плазма, состоящая из полностью "ободранных" ионных остовов – альфа частиц и электронов. Средний заряд ионов в плазме равнялся 2.

**Четвертая глава** посвящена описанию исследования возможности использования ЭЦР разряда, поддерживаемого миллиметровым излучением гиротронов в магнитной ловушке в качестве источника мягкого рентгеновского излучения. Приводится описание экспериментального исследования ЭЦР разряда относительно большого объёма в тяжёлых газах, как источника мягкого рентгеновского излучения. В качестве источника СВЧ излучения использовался гиротрон с частотой излучения 37.5 ГГц, мощность свыше 100 кВт. Определены спектральный состав излучения и абсолютная интенсивность. Показано, что эффективность преобразования мощности СВЧ пучка в мощность мягкого рентгена составляет 12%, основная часть рентгеновского излучения плазмы генерируется в интервале длин волн приблизительно  $\lambda \approx 4.5 - 12$  нм. Кроме того в этой главе приводится описание исследований плазмы вакуумно-дугового разряда в парах олова,

дополнительно нагреваемой в условиях ЭЦР, как источника мягкого рентгеновского излучения. Для дополнительного нагрева плазмы вакуумно-дугового разряда использовалось излучение гиротрона с частотой излучения 75 ГГц, Интенсивность излучения плазмы в спектральном диапазоне 13.5 нм  $\pm 1\%$  достигала  $\approx 50$  Вт в телесный угол  $4\pi$  ст.рад.

**Пятая глава** диссертации посвящена исследованиям перспектив использования ЭЦР разряда в качестве источника активного азота для металлорганической газофазной эпитаксии. Предлагается для активации азота использовать ЭЦР разряд, поддерживаемый излучением с частотой излучения 24 ГГц и мощностью до 5 кВт. В этой главе описаны экспериментальные исследования параметров плазмы в источнике. Максимальная концентрация электронов  $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  достигается при давлении газа  $2 \cdot 10^{-4}$  мбар, и уровне мощности 1.1 кВт, температура электронов при этом составляет около 5,3 эВ. Эта глава содержит описание исследований, посвящённых поиску оптимальных условий, при которых достигается максимальный поток атомарного азота из источника. Измерения величины потока атомарного азота из плазмы ЭЦР разряда проводились методом титрации по реакции восстановления из монооксида. Эксперимент показал, что на величину потока атомарного азота из плазмы ЭЦР разряда влияют, прежде всего, две величины – это мощность СВЧ излучения, вкладываемого в разряд и величина потока газа через плазму. При оптимальных условиях работы установки продемонстрирована производительность источника атомарного азота на уровне  $4 \cdot 10^{18}$  шт/с. Далее в этой главе приводится описание экспериментов по выращиванию монокристаллов нитрида индия методом металлорганической газофазной эпитаксии с плазменной активацией азота. Показано, что такой метод позволяет выращивать эпитаксиальные плёнки InN высокого качества при **рекордных** скоростях роста, достигающих значений  $10 \text{ мкм} \cdot \text{ч}^{-1}$ .

Как всякий крупный научный труд, диссертационная работа А.В. Водопьянова не свободна от недостатков. Наиболее значительный из них состоит в отсутствии подробного сравнения полученных результатов с достижениями коллег, использовавших альтернативные подходы. Так на стр. 119, при подведении итогов главы 1, говорится о близости полного тока многозарядных ионов, полученного автором, к значениям, получаемым в других ЭЦР источниках, и о существенно меньших эмиттансах, но сравнения конкретных значений не проводится. В главе 2, на стр. 144, говорится, что: «Плотность тока ионного пучка, который можно было бы экстрагировать из нашей плазмы, также на несколько порядков превосходит плотность тока, достигаемую в существующих в настоящее время источниках МЗИ», однако сравнение соответствующих значений отсутствует. Нет такого сравнения и на стр. 161, в выводах по главе 2, посвящённой многократной дополнительной ионизации металлических ионов плазмы вакуумно-дугового разряда. Отсутствие сколь-нибудь детальных сопоставлений с результатами коллег, способных украсить диссертацию, тем более обидно, что автору явно есть чем блеснуть.

Отмеченные недостатки ни в коей мере не снижают важности и достоверности полученных в диссертации А.В. Водопьянова результатов. В целом, диссертационная

работа производит очень хорошее впечатление. Её характеризует весьма глубокое изучение физики волнового ЭЦР разряда, оптимизация на этой основе параметров разрядной плазмы и доведение их во многих случаях до уровня достаточного для использования в приложениях, что типично для нижегородской плазмофизической школы. Результаты А.В. Водопьянова, изложенные в диссертации, соответствуют мировому уровню исследований ЭЦР разряда, поддерживаемого миллиметровым излучением и, в значительной степени, определяют его.

Отметим важнейшие полученные в диссертации **научные результаты**:

1. Впервые продемонстрирована эффективность дополнительной ионизации ионов металлов плазмы вакуумной дуги, инжектируемой в магнитную ловушку, за счёт ЭЦР нагрева электронов плазмы СВЧ излучением. Эффект повышения кратности ионизации продемонстрирован как для легко-плавкого (свинец), так и для тугоплавкого (платина) материалов.
2. Экспериментально установлено, что плазма вакуумно-дугового разряда с катодом, выполненным из олова, дополнительно нагреваемая СВЧ излучением с частотой излучения 75 ГГц в условиях ЭЦР, при оптимальных условиях содержит ионы олова с кратностями ионизации от +7 до +9 и излучает в диапазоне длин волн  $13.5 \text{ нм} \pm 1\% \approx 50 \text{ Вт}$  в телесный угол  $4\pi$  ст.рад. Проведённые расчёты показывают, что использование для нагрева плазмы излучения существующих гиротронов (например, с частотой излучения 170 ГГц, мощностью 20 кВт) позволяет поддерживать плазму с характерными размерами 1 мм x 1 мм x 10 мм с  $\langle Z \rangle = 9$ ,  $T_e = 200 - 300 \text{ эВ}$ . Такая плазма будет излучать 1 кВт в диапазоне  $13.5 \text{ нм} \pm 1\%$  при эффективности преобразования СВЧ излучения в мягкое рентгеновское на уровне 5 %.
3. Проведены исследования параметров плазмы источника атомарного азота на основе ЭЦР разряда, поддерживаемого излучением технологического гиротрона с частотой 24 ГГц и мощностью излучения до 5 кВт. При этом продемонстрирован источник атомарного азота с максимальной производительностью  $4 \cdot 10^{18}$  шт./с, что является рекордным значением на данный момент.

Представленные в диссертации результаты являются, несомненно, новыми и обладают большой научной значимостью. Результаты диссертационной работы могут использоваться в исследовательских, проектных и конструкторских организациях, работающих в области физики плазмы и применения плазмы

Результаты диссертации докладывались на многочисленных российских и международных конференциях и представлены в 34 научных статьях в международных и российских журналах (в том числе и в журналах из перечня ВАК РФ).

Диссертация Водопьянова А.В. является научно-квалификационной работой, в которой получены результаты, совокупность которых можно квалифицировать как решение важных научных проблем, связанных с исследованием плазмы электронно-циклотронного резонансного разряда, поддерживаемого СВЧ излучением миллиметрового диапазона длин волн и изучением перспектив его применения. Это соответствует требованиям к докторским диссертациям, изложенным в п.9 «Положения о присуждении

ученых степеней» (утверждено постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г.).

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 01.04.08- «Физика плазмы» в части физико-математических наук, а автор диссертационной работы, Водопьянов А.В., заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – Физика плазмы.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертационной работы.

Официальный оппонент  
профессор,  
доктор физико-математических наук

Е.З. Гусаков

Сведения о составителе отзыва:

Гусаков Евгений Зиновьевич, профессор, доктор физико-математических наук, наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, почтовый адрес: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26, должность: заведующий лабораторией, телефон +7812 2927389, адрес электронной почты: evgeniy.gusakov@mail.ioffe.ru

Подпись д.ф.-м.н. Е.З. Гусакова заверяю.

Ученый секретарь ФТИ им А.Ф. Иоффе РАН  
д.ф.-м.н.



А.П. Шергин