

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.

Разряды, поддерживаемые в режиме электронно-циклотронного резонанса, известны давно и уже заняли место среди генераторов плазмы для различных приложений – это и плазмохимия, и получение покрытий, и источника ионов. Как правило, эти устройства поддерживаются СВЧ генераторами с частотами 915 МГц и 2.45 ГГц. Во многих задачах уже достигнуты предельные результаты. В последние два десятилетия появились новые мощные генераторы миллиметрового диапазона длин волн. Это открывает новые перспективы для применения ЭЦР источников плазмы, поскольку позволяет получать большие концентрации электронов в плазме. Описанию таких источников и плазме и рассмотрению использования их для решения некоторых задач и посвящена диссертационная работа Водопьянова А.В. Как показано, с помощью таких источников могут быть получены рекордные результаты. Тема диссертационной работы, безусловно, **актуальна**

Структура и содержание работы.

Диссертация состоит из Введения, 5 глав, заключения и списка литературы (объем 282 стр.). Она содержит 2 таблицы, и 121 рисунок. Список литературы включает 172 наименования.

Во **Введении** сформулированы общие положения диссертации, такие, как актуальность работы, научная новизна, практическая значимость, цели исследования, задачи исследования, апробацию работы, положения, выносимые на защиту, вклад автора в выполненные исследования. Автор внес основной вклад в постановку задач, в подготовку и проведение экспериментов, обработку и интерпретацию результатов.

Первая глава посвящена источнику многозарядных ионов тяжелых газов. Дан краткий обзор источников многозарядных ионов и показано, что перспективным является использование ЭЦР разрядов с мощными гиротронами миллиметрового диапазона длин волн. Представлена и подробно описана схема экспериментальной установки SMIS-37 (система ввода СВЧ мощности, магнитная ловушка, вакуумная система, система напуска газа, система предионизации, система синхронизации, система экстракции ионов) на основе ЭЦР разряда в прямой магнитной ловушке с накачкой мощным СВЧ излучением с частотой 37.5 ГГц, в которой использован гиротрон БАЛЬЗАМ 3С (максимальная мощность 130 кВт). Установка оснащена большим количеством диагностических методик: СВЧ и ленгмюровские зонды, детектор жесткого рентгеновского излучения, различные фоторегистраторы, цилиндры Фарадея, анализатор ионного пучка. Описаны результаты калибровки измерительных систем. Все это позволяло определять ионный и зарядовый состав плазмы и ее энергетические характеристики.

В этой главе приведены результаты экспериментального исследования параметров плазмы в квазигидродинамическом режиме. Энергетическое распределение электронов определялось по спектру тормозного излучения плазмы и показано присутствие двух групп электронов: теплой (температура 300 эВ, концентрация электронов $4 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$) и горячей (10 кэВ, $1.5 \times 10^9 \text{ см}^{-3}$). О наличии двух функций говорят и результаты исследования распада плазмы. Приведены распределения ионов аргона по зарядовым состояниям при разных скоростях напуска газа. Показано существование двух стадий разряда в зависимости от давления - появляется выраженное разделение длительности горения разряда на две стадии. Для первой стадии разряда характерны высокий средний заряд ионов и высокая температура электронов, а вторая стадия характеризуется более высокой концентрацией плазмы и низкой температурой. Распределения ионов по кратностям ионизации разлетающейся плазмы для двух стадий разряда также существенно различаются. Исследованы причины ограничения длительности первой стадии разряда, оптимальной с точки зрения формирования многозарядных ионов. Показано изменение светимости разряда в видимой области при переходе от одной стадии к другой - отмечено появление излучения на периферии во второй стадии. Рассмотрены механизмы, которые могут привести к этому явлению. Сделан вывод о том, что газовыделение со стенок может играть определяющую роль в динамике ЭЦР разряда с большой плотностью и препятствовать образованию многозарядных ионов. Продемонстрирован пучок ионов, извлеченных из плотной плазмы ЭЦР разряда с током 0.5 мА и нормализованным эмиттансом менее $0.25 \text{ п} \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$.

Глава 2 посвящена исследованию дополнительной ионизации ионов металлов, полученных в вакуумно-дуговом разряде в магнитной ловушке с нагревом электронов режиме ЭЦР. Такой подход позволяет преодолеть трудности получения многозарядных ионов тугоплавких металлов, находящихся в твердом состоянии при нормальных условиях. Идея понятна: пучок ионов низкой кратности ионизации из вакуумного дугового разряда инжектируется в ЭЦР разряд, где и происходит дополнительная ионизация. Попытки реализовать такой подход были, но особого успеха добиться не удалось. По мнению автора, это было связано с малым параметром удержания ионов в ловушке в известных экспериментах. Как показано автором в главе 2, этот недостаток может быть устранен при использовании ЭЦР разрядов на основе мощных гиротронов.

Для реализации экспериментов была создана установка с гиротроном на частоте 37.5 ГГц (мощность 60 кВт), позволяющая вводить в ЭЦР разряд поток ионов из дугового разряда. Система позволяла с одного торца магнитной ловушки одновременно осуществлять ввод микроволнового излучения в плазму со стороны большего магнитного поля и инжектировать металлическую плазму в ловушку. Проведены эксперименты по измерению времени пролета ионов через магнитную ловушку и концентрации плазмы. Эксперименты по дополнительной ионизации ионов проводились с двумя металлами – свинцом и платиной, существенно отличающимися по температуре плавления. Показано, что использование предложенной системы увеличивает средний заряд ионов примерно в 4 раза и для получения максимального среднего заряда необходимо уменьшать ток вакуумно-дугового разряда до минимально возможного значения, увеличивать

напряженность магнитного поля ловушки до максимально возможной величины, подбирать оптимальную СВЧ мощность. Как и в предыдущей главе, показана важная роль примесей в определении оптимального режима работы устройства. Экспериментально показано, что увеличение времени пролета ионов сквозь магнитную ловушку сдвигает распределение ионов по кратностям ионизации в сторону больших зарядностей. Плотность тока ионного пучка, который получить, на несколько порядков превосходит плотность тока, достигаемую в существующих в настоящее время источниках многозарядных ионов.

Другая серия экспериментов проводилась на новой разработанной и созданной установке с использованием гиротрона БРИДЕР-1 с частотой 75 ГГц (мощность до 200 кВт) и миниатюрного источника плазмы тяжелых металлов. Показано, что кратность ионизации смещается в область больших значений по сравнению с полученной на частоте 37.5 ГГц и при меньшей мощности. Здесь же показано, что доля примесных газов значительно уменьшается при увеличении частоты повторения разрядных импульсов.

В **Третьей главе** исследуется возможность формирования короткоимпульсных пучков многозарядных ионов с высоким средним зарядом. Были разработаны и изготовлены 4 конструкции разрядных систем на основе отражательных разрядов (пенинговский и магнетронный разряды) в скрещенных ЕН полях. Системы предназначены для инициирования (предионизации) ЭЦР разряда в открытой магнитной ловушке, что позволило понизить давление в разряде. Показано, что случае использования гелия в качестве рабочего газа, получена плазма, состоящая из ионных остовов – альфа частиц и электронов.

В **четвертой главе** описываются возможности использования импульсного ЭЦР разряда в качестве источника многозарядных ионов для генерации мягкого рентгеновского излучения, которое может использоваться в задачах проекционной литографии. Исследование спектра мягкого рентгеновского излучения ЭЦР разряда в воздухе, кислороде и аргоне показали, что основная часть рентгеновского излучения плазмы генерируется в интервале длин волн приблизительно 45 – 120 Å, а максимум излучения принадлежит области 70 – 100 Å. В случае аргона основное рентгеновское излучение лежит в интервале 70 – 110 Å с максимумом спектральной мощности 730 Вт/Å на длине волны 90 Å, а интегральная излучаемая мощность достигает 16 кВт с эффективностью преобразования СВЧ мощности в мощность излучения составляет 12 %. Таким образом показана возможность получения мягкого рентгеновского излучения, однако размер области излучения оказывается большой.

В главе описываются исследования возможности использования плазмы вакуумно-дугового разряда в олове, дополнительно нагреваемой в условиях ЭЦР излучением мощных гиротронов (система подробно описана в главе 2), как источника излучения с длиной волны 13.5 нм. Показано, что использование предлагаемого метода позволяет увеличить кратность ионов до оптимального значения и получить требуемое излучение и получить интенсивность излучения 50 Вт в угол 4π ст. рад. Объемом излучающей плазмы 0.35 см³.

Для анализа возможностей построения источника излучения мягкого рентгеновского излучения проведено нульмерное моделирование плазмы. Показано, что теоретический предел эффективности источника на длине волны может достигать 5 % с почти полной трансформация энергосклада в излучение в области мягкого рентгеновского излучения. Предлагается концепция построения источника излучения, удовлетворяющего требованиям проекционной литографии с использованием гиротрона с частотой 170 ГГц.

В Главе 5 ЭЦР разряд рассматривается в качестве источника атомарного азота. Цель – использование атомов для получения нитридов металлов III группы. Описано получение нитрида индия. Для получения атомов азота используется ЭЦР разряд, поддерживаемый излучением технологического гиротрона с частотой излучения 24 ГГц с мощностью 100 Вт - 5 кВт. Приведены результаты измерений параметров плазмы. Показано, что температура электронов и концентрация электронов растут при увеличении СВЧ мощности и уменьшаются при увеличении давления. Описана модификация установки, позволившая увеличить концентрацию электронов. Поток атомов азота измерялся титрованием с использованием NO. Показано, что на величину потока атомарного азота из плазмы ЭЦР разряда влияют, в основном, мощность СВЧ излучения, вкладываемого в разряд и величина потока газа через плазму.

Исследован процесс роста пленки нитрида индия. Изучалось влияние материала подложки и буферных слоев на морфологию, структуру и фотолуминисцентные свойства пленок и показано, что одним из основных параметров, влияющих на свойства пленки, является температура подложки. Метод позволяет получать пленки InN высокого качества при скоростях роста, достигающих значений $10 \mu\text{m}\cdot\text{ч}^{-1}$.

Диссертация не свободна от недостатков. Ниже приводятся некоторые из них.

Замечания.

1. Автор проводит нульмерное моделирование, описываемое в главах 2 и 4. Желательно приводить используемые константы, без чего система уравнений выглядит слепой. Желательно также обсудить погрешность результатов расчетов.
2. Обычно эффективность источников активных частиц сопоставляется не по их количеству и потоку на выходе устройств, а по энергозатратам на образование одной частицы. Такое сопоставление в главе 5, к сожалению, отсутствует.
3. При использовании тормозного излучения для диагностики плазмы используется предположение о максвелловском распределении. Желательно было бы обосновать возможность использования такого приближения, т.к. известно, что распределение имеет длинный «хвост» в области высоких энергий электронов. Этот же результат дает, проделанный автором анализ (рис. 1.17).
4. Не очень удачное название имеет Глава 3, поскольку целью является создание источника многозарядных ионов с малым временем формирования (это формулировка автора на стр.164). Только в конце главы показано, что разряд в гелии быть использован в качестве источника альфа-частиц.
5. Глава 5 называется «Источник активного азота», но в ней говорится только об атомах азота и нет информации, например, о метастабильном состоянии $\text{N}_2(\text{A}^3\Sigma)$, концентрации которого велики и они играют большую роль во всех

плазмохимических процессах.

6. Обозначения в подписи рис.1.1. не соответствуют рисунку (обилие деталей с номером «1»).

Отмеченные замечания не снижают важности и достоверности полученных в диссертации результатов.

Можно выделить **некоторые из основных научных результатов:**

1. Создание источника многозарядных ионов на основе ЭЦР разряда в квазигидродинамическом режиме.
2. Демонстрация дополнительной ионизации ионов из вакуумного дугового разряда в ЭЦР и использование этого факта для получения многозарядных ионов металлов..
3. Исследование роли предварительной ионизации для генерации многозарядных ионов.
4. Разработка источника атомарного азота.

Новизна представленных в диссертации результатов не вызывает сомнений и они открывают перспективы для практического применения ЭЦР разрядов миллиметровых длин волн. Результаты диссертационной работы могут использоваться в исследовательских, проектных и конструкторских организациях, работающих в области физики и применения низкотемпературной плазмы (ОИВТ РАН, ИРЭ РАН, ИОФ РАН, ИСЭ РАН, МРТИ РАН, ФИ РАН, ИНХС РАН, МГУ, МФТИ, МГТУБ ФГУП «Исток» и др.).

Результаты диссертации докладывались на многочисленных российских и международных конференциях и представлены в 34 журнальных публикациях в международных и российских журналах (в том числе и в журналах из перечня ВАК РФ). Результаты работы были доложены на 448 заседании Всероссийского семинара «Получение, исследование и применение низкотемпературной плазмы» им. Проф. Л.С. Полака в ИНХС РАН (31.10.2016 г.) и получили поддержку участников семинара. Научная новизна полученных результатов подтверждается двумя патентами. В 2006 году цикл работ «Неравновесная плазма в магнитных ловушках пробочной конфигурации» был удостоен медали РАН с премией для молодых учёных.

Диссертация Водопьянова А.В. является научно-квалификационной работой, в которой получены результаты, совокупность которых можно квалифицировать как решение важных научных проблем, связанных с исследованием физических особенностей плазмы электронно-циклотронного резонансного разряда, поддерживаемого СВЧ излучением гиротронов миллиметрового диапазона длин волн и исследованием перспектив применения разрядов. 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

зав. лабораторией "Плазмохимии и физикохимии
импульсных процессов" ИНХС РАН,
доктор физико-математических наук



Ю. А. Лебедев

Сведения о составителе отзыва:

Лебедев Юрий Анатольевич, доктор физико-математических наук, наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук (ИНХС РАН), почтовый адрес: 119991, Москва, Ленинский проспект, 29, должность: заведующий лабораторией, телефон 8(495)6475927 доб. 322, адрес электронной почты: lebedev@ips.ac.ru.

Подпись д.ф.м.н. Ю. А. Лебедева заверяю.

Ученый секретарь ИНХС РАН
кандидат химических наук



И.С. Калашникова