

На правах рукописи

ВОДОПЬЯНОВ Александр Валентинович

**ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ РАЗРЯД,
ПОДДЕРЖИВАЕМЫЙ МИЛЛИМЕТРОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ:
ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ**

01.04.08 – физика плазмы

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Нижний Новгород – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», г. Нижний Новгород

Официальные оппоненты:

Гусаков Евгений Зиновьевич, доктор физико-математических наук, профессор (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе)

Багрянский Петр Андреевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук)

Лебедев Юрий Анатольевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики имени А.М. Прохорова Российской академии наук.

Защита состоится 21 ноября 2016 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д002.069.02 в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» по адресу: 603950 г. Н. Новгород, ул. Ульянова 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПФ РАН.

Автореферат разослан «___» октября 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д002.069.02
доктор физико-математических наук,
профессор



Ю.В. Чугунов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Несмотря на длительную историю изучения взаимодействия частиц плазмы со сверхвысокочастотными полями в магнитном поле в условиях электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР), изучение плазмы ЭЦР разряда остаётся актуальным в настоящее время и представляет большой интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Широкий интерес к ЭЦР разрядам, поддерживаемым излучением гиротронов миллиметрового диапазона длин волн, обусловлен уникальными параметрами плазмы, которую можно создать и поддерживать мощным излучением современных генераторов. Отличительной особенностью таких разрядов является высокий удельный энергозатрат, значительная неравновесность плазмы, высокая эффективность нагрева электронного компонента плазмы. А создание надёжных генераторов излучения – гиротронов, стабильно работающих в импульсном и непрерывных режимах, дополнительно стимулируют развитие прикладных исследований плазмы ЭЦР разряда и возможных приложений такого разряда.

Одна из возможностей использования неравновесной плазмы ЭЦР разряда – создание на его основе источника ионов. Пучки ионов востребованы при обработке и модификации твёрдых тел [1, 2], в медицине [3], для нагрева специальных мишеней в установках инерционного термоядерного синтеза [4], для синтеза новых сверхтяжёлых элементов [5]. Актуальной является задача создания источников многозарядных ионов (МЗИ) тяжёлых элементов [6–8], которые находят широкое применение, как в науке, так и в технике. Энергия ускоряемых ионов зависит от заряда иона и растёт с ростом заряда. Использование многозарядных ионов позволяет при тех же ускоряющих напряжениях получать существенно большие энергии ионов. ЭЦР источники ионов выгодно отличаются от источников других типов в тех случаях, когда требуется умеренно высокий средний заряд ионов (например, 7–9 для аргона) при достаточно большом токе пучка (~ 100 мкА). Они имеют большой ресурс работы, стабильны, позволяют легко менять рабочее вещество. В настоящее время более 50 источников МЗИ на основе ЭЦР работают в ускорительных центрах мира, а все новые циклотронные комплексы создаются в расчёте на работу с источниками многозарядных ионов этого типа. Согласно современным представлениям, для повышения эффективности работы плазменных источников МЗИ необходимо создание плотной, достаточно долгоживущей неравновесной плазмы, температура электронов в которой существенно превосходит температуру ионов. Один из путей создания такой плазмы в ЭЦР источниках ионов связан с увеличением частоты и мощности используемого СВЧ излучения. Так в серии экспериментальных работ [9, 10], был значительно увеличен выход многозарядных ионов при изменении частоты от 10 до 18 ГГц. Представляется весьма перспективным и актуальным проведение исследова-

ний ЭЦР разряда, поддерживаемого мощным излучением гиротронов миллиметрового диапазона длин волн, как с точки зрения возможных приложений, так и с точки зрения развития фундаментальной науки. Действительно, использование мощного коротковолнового излучения позволяет проводить исследования ЭЦР разряда при больших интенсивностях СВЧ излучения (до сотен кВт/см²) и обеспечивать удельный энерговклад в плазму на уровне 10 кВт/см³. В случае разряда в тяжёлых газах можно надеяться на получение плазмы с уникальными параметрами: электронной плотностью на уровне 10¹³ см⁻³ и энергией электронов порядка сотен эВ (оптимальной для образования МЗИ).

Как уже отмечалось выше, основным применением источников многозарядных ионов является их применение в ускорителях. Для успешного решения целого ряда задач на ускорительных комплексах (в частности, синтеза новых элементов) требуются источники многозарядных металлических ионов, в том числе и тугоплавких. Для решения этой задачи наиболее привлекательным представляется идея использования вакуумно-дугового плазмогенератора для инъекции плазмы тугоплавких металлов (в катодных пятнах вакуумно-дугового разряда интенсивно испаряется и ионизуется любой тугоплавкий металл) [11] в ЭЦР источник с целью дополнительной ионизации ионов. В плотной плазме ЭЦР разряда, поддерживаемого излучением гиротронов, за время пролёта ионами размера ловушки успевает происходить заметная дополнительная ионизация. То есть, использование плотной плазмы позволяет достичь необходимого значения параметра удержания и при малых временах жизни ионов в ловушке и обеспечить получение многозарядных ионов тугоплавких металлов.

Другим перспективным применением ЭЦР разряда, поддерживаемого излучением миллиметрового диапазона длин волн, является использование его в качестве источника ультрафиолетового излучения для проекционной литографии высокого разрешения. Речь, в основном, пойдёт об излучении в спектральной полосе 13.5 нм ± 1%. В настоящее время в мире ведутся интенсивные исследования, направленные на создание источника излучения для проекционной литографии высокого разрешения с длиной волны 13.5 нм. Такая длина волны задана в стандартах развития отрасли [12], что, отчасти, обусловлено развитием оптических элементов для данной длины волны [13]. В наиболее эффективных источниках излучения используется линейчатое излучение многозарядных ионов олова (более 100 линий излучения ионов олова с зарядом от +6 до +11 попадают в указанный диапазон). В основном, для получения такой плазмы используются установки с мощными лазерами или с различного типа пинчами (см., например, книги [14, 15], современный обзор [16]).

Наряду с осязаемым прогрессом в этом направлении у разрабатываемых схем есть ряд недостатков, которые не позволяют считать проблему создания источника экстремального ультрафиолета решённой. Прежде всего, отметим

проблемы, связанные с малым ресурсом работы источника, с загрязнением элементов оптической системы распыляемыми веществами, с бомбардировкой поверхности зеркал быстрыми ионами. Поиски новых источников мягкого рентгеновского излучения остаются актуальными в настоящее время.

Другой задачей, демонстрирующей преимущества использования ЭЦР разряда, поддерживаемого излучением гиротрона, является задача активации азота в плазме для выращивания нитридов металлов III группы. Нитриды металлов III группы периодической системы элементов (AlN, GaN, InN), их твердые сплавы (AlGa₂N, InGa₂N), считаются наиболее перспективными материалами для создания новых типов оптоэлектронных устройств, работающих в широком диапазоне длин волн от видимой до дальней УФ областей спектра, а также мощных СВЧ приборов, способных функционировать в агрессивных средах и при высоких температурах [17-28]. Одной из ключевых проблем синтеза нитридов металлов III группы является создание эффективных источников атомарного азота, необходимого для встраивания в кристаллическую решётку металлов (In, Ga) и образования нитридов (InN, GaN).

Цели и задачи исследования

Целью диссертационной работы является исследование физических особенностей плазмы электронно-циклотронного резонансного разряда, поддерживаемого СВЧ излучением гиротронов миллиметрового диапазона длин волн и исследование перспектив применения разрядов. Основные задачи исследования состоят в следующем:

1. Исследовать плазму ЭЦР разряда в магнитной ловушке типа пробкотрон, поддерживаемую излучением гиротронов миллиметрового диапазона длин волн; показать, что в эксперименте реализуется квазигазодинамический режим удержания плазмы в зеркальной магнитной ловушке; исследовать возможности генерации многозарядных ионов в плазме; исследовать динамику такого разряда; продемонстрировать возможность извлечения пучков многозарядных ионов из такой плазмы.

2. Исследовать возможность дополнительной ионизации ионов металлов плазмы вакуумной дуги, инжектируемой в магнитную ловушку, за счет ЭЦР нагрева электронов плазмы СВЧ излучением; продемонстрировать эффект повышения кратности ионизации для легкоплавких и тугоплавких металлов; исследовать удержание плазмы вакуумно-дугового разряда, инжектируемой в прямую магнитную ловушку; исследовать влияние частоты греющего поля на эффективность дополнительной ионизации металлических ионов; продемонстрировать возможность извлечения пучков многозарядных металлических ионов из такой плазмы.

3. Найти пути снижения примесей в пучке металлических ионов, извлекаемых из плазмы вакуумно-дугового разряда, дополнительно нагреваемого СВЧ излучением гиротронов в условиях ЭЦР.

4. Проанализировать плазму импульсного ЭЦР разряда при низком (ниже пробойного при заданной длительности импульса) давлении в условиях сильной предварительной ионизации газа с помощью непрерывно горящего разряда пеннинговского типа; исследовать возможность получения пучка ионов с максимально возможным средним зарядом ионов.

5. Исследовать свечение ЭЦР разряда в газах, поддерживаемого миллиметровым излучением, в диапазоне мягкого рентгеновского излучения; определить спектральный состав излучения; определить эффективность преобразования СВЧ излучения в мягкое рентгеновское излучение.

6. Провести исследование ионного состава плазмы вакуумно-дугового разряда с катодом из олова, инжектированную в магнитную ловушку и дополнительно нагреваемую в условиях ЭЦР излучением миллиметрового диапазона длин волн; исследовать свечение такой плазмы в диапазоне мягкого рентгеновского излучения; определить эффективность преобразования СВЧ излучения в мягкое рентгеновское излучение; определить перспективность использования такого источника мягкого рентгеновского излучения для литографии высокого и определить дальнейшие пути повышения эффективности такого источника.

7. Проанализировать параметры плазмы ЭЦР разряда в азоте, поддерживаемого излучением технологического гиротрона с частотой 24 ГГц и мощностью излучения до 5 кВт; исследовать потоки атомарного азота из плазмы, определить оптимальные условия, при которых можно получить максимальный поток атомарного азота.

8. Исследовать процессы роста плёнок нитрида индия методом металлоорганической газофазной эпитаксии при активации азота в плазме, создаваемой с помощью источника атомарного азота на основе ЭЦР разряда; определить максимальную скорость роста плёнок.

Научная ценность и новизна результатов

В диссертации представлены результаты исследования физических особенностей ЭЦР разрядов, поддерживаемых излучением миллиметрового диапазона длин волн. С единых позиций исследуются неравновесные разряды, поддерживаемые в излучением с частотами 24 ГГц, 37,5 ГГц и 75 ГГц, в импульсном и непрерывном режимах работы. Благодаря использованию гиротронов – мощных источников излучения миллиметрового диапазона длин волн появилась возможность проводить исследования разрядов с уникальными, ранее недоступными параметрами. Все полученные в диссертационной работе результаты обладают научной ценностью и новизной, что подтверждается публикациями в высокорейтинговых международных научных журналах и выступлениями на профильных международных конференциях.

Достоверность предложенных методов и решений

Все полученные результаты обладают высокой степенью достоверности и являются обоснованными. Достоверность получаемых результатов обеспечивается обоснованным применением как стандартных методов измерения, так и оригинальных методик. Для повышения достоверности получаемых результатов измерения проводились, как правило, несколькими способами. Имеется хорошее качественное и количественное совпадение теоретических результатов с экспериментально полученными данными. Результаты диссертации опубликованы в рецензируемых российских и зарубежных научных журналах, докладывались на международных и всероссийских конференциях, обсуждались на семинарах ИПФРАН.

Практическое значение работы

Результаты, полученные в первой, второй и третьей главах, дают научную основу построения источников многозарядных ионов нового поколения с рекордными выходными параметрами. Такие источники, несомненно, найдут своё применение, как в научных исследованиях, так и в технологиях. Например, для нагрева специальных мишеней в установках инерционного термоядерного синтеза, для синтеза новых сверхтяжёлых элементов таблицы Менделеева и т.д. Результаты, полученные в четвертой главе, открывают перспективы и демонстрируют возможность построения источника мягкого рентгеновского излучения нового типа на основе ЭЦР разряда, поддерживаемого излучением миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн. Такой источник необходим для проекционной литографии высокого разрешения. Результаты, полученные в пятой главе, являются научной основой для создания установок для выращивания нитридных соединений с рекордными скоростями роста. Такие установки могут найти своё применение в полупроводниковой промышленности.

Личный вклад

Все изложенные в диссертационной работе оригинальные результаты получены автором лично, либо при его непосредственном участии. При получении результатов, описанных в главе 1, автор участвовал в постановке задач, проведении экспериментальных исследований, интерпретации полученных результатов и написании научных статей. Вклад автора в исследование СВЧ вакуумной дуги (разделы 1.4.2 – 1.4.4) – определяющий, им предложена основная идея, проведены экспериментальные исследования и численное моделирование.

При проведении исследований ЭЦР разряда в тяжёлых газах как источника мягкого рентгеновского излучения (глава 4) автор предложил и обосновал использование в качестве источника плазмы, содержащего ионы олова, миниатюрного вакуумно-дугового плазмогенератора, разработка и изготов-

ление которого осуществлялась в ИСЭ СО РАН. Подготовка и проведение экспериментальных исследований ЭЦР разряда как источника мягкого рентгеновского излучения проводились под руководством автора. Абсолютные измерения интенсивности экстремального ультрафиолетового излучения проводились с использованием аппаратуры, разработанной в ИФМ РАН. В интерпретации полученных результатов, проведении необходимых расчётов, обработке результатов, в написании научных статей и патентов вклад автора являлся определяющим.

Вклад автора в получение результатов, описанных в главах 2, 3 и 5, является определяющим: автор участвовал в постановке задач, организовывал и проводил эксперименты, проводил обработку экспериментальных данных и необходимые численные расчёты, участвовал в интерпретации результатов и написании научных статей. Конструкции разрядных систем на основе отражательных разрядов в скрещенных $E \times H$ полях, используемых в экспериментах, описанных в главе 3, предложил и разработал Юшков Г.Ю. (ИСЭ СО РАН).

Апробация

Результаты диссертационной работы были представлены на конференциях по ионным источникам (ICIS) в 1999, 2001, 2003, 2007, 2011 и 2013 годах; на международных совещаниях по ЭЦР источникам ионов (ECRIS) в 2000, 2002, 2004, 2006 и 2010 годах; на 13-й международной конференции “Beams 2000” (Япония, 2000); на международном совещании “Sources 2000” (Япония, 2000); на международном совещании “Production of Intense Beams of Highly charged Ions” (Италия, 2000); на международной конференции по плазменной обработке поверхностей (PSE 2010) (Германия, 2010); на международной конференции по физике плазмы (ICOPS, Германия, 2008); на международной конференции по нитридным полупроводникам (IWN) в 2012 и 2014 годах; на международной конференции по плазмохимии (ISPC) (Бельгия 2015); на международном совещании “Strong Microwaves in Plasmas” в 2002, 2005 и 2014 годах; на международной конференции «Frontiers of Nonlinear Physics» (Россия, 2013) и пр.

В 2006 году цикл работ “Неравновесная плазма в магнитных ловушках пробочной конфигурации” был удостоен медали РАН с премией для молодых учёных.

Объем и структура диссертации

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.

ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Использование для нагрева плазмы в ЭЦР разряде мощного миллиметрового излучения современных гиротронов позволяет существенно, более чем на порядок по сравнению с традиционными источниками многозарядных ионов, поднять плотность плазмы и реализовать квазигазодинамический режим удержания плазмы в зеркальной магнитной ловушке с высоким параметром удержания, обеспечивающем возможность образования многозарядных ионов с высокой кратностью ионизации, и позволяющем извлекать из плазмы пучки многозарядных ионов с высоким током и низким эмиттансом.

2. Использование для дополнительного нагрева электронов плотной (свыше 10^{13} см^{-3}) плазмы вакуумно-дугового разряда, инжектируемой в магнитную ловушку, мощного коротковолнового электромагнитного излучения гиротронов обеспечивает многократную дополнительную ионизацию ионов как легкоплавкого (свинец), так и тугоплавкого (платина) материалов.

3. Предварительная ионизация газа с помощью непрерывно горящего разряда пеннинговского типа в магнитной ловушке позволяет реализовать плазмы импульсного ЭЦР разряда при низком (ниже пробойного при заданной длительности импульса) давлении, позволяющем существенно сдвинуть распределение ионов по кратностям ионизации в сторону больших зарядностей. В частности, получена плазма гелия, состоящая из полностью "ободранных" ионных остовов и электронов.

4. Инжектирование вакуумно-дугового разряда с катодом, выполненным из олова, в магнитную ловушку и последующий нагрев плазмы в условиях ЭЦР излучением миллиметрового диапазона длин волн позволяет получать плазму олова с высокими кратностями ионизации ионов (+7 - +9), эффективно излучающую в диапазоне мягкого рентгеновского излучения ($\approx 50 \text{ Вт}$ в телесный угол $4\pi \text{ ст.рад}$ длин волн $13.5 \text{ нм} \pm 1\%$) при малых размерах излучающей области (0.35 см^3).

5. Метод металлоорганической газофазной эпитаксии при активации азота в плазме, создаваемой с помощью нового плазменного источника на основе ЭЦР разряда, поддерживаемого непрерывным излучением гиротрона, позволяет получать пленки InN высокого качества при рекордных скоростях роста, достигающих значений $10 \text{ мкм} \cdot \text{ч}^{-1}$.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

Первая глава диссертации посвящена исследованию возможности использования ЭЦР разряда в газах, поддерживаемого миллиметровым излучением гиротронов, в качестве источника многозарядных ионов. В этой главе рассматриваются физические особенности ЭЦР разряда, поддерживаемого миллиметровым излучением, в работе приводятся результаты экспериментов с нагревом СВЧ излучением с частотой 37 ГГц. В **разделе 1.1** изложено введение в проблему, ставится задача исследования. В **разделе 1.2** описана созданная экспериментальная установка "SMIS 37" (Simple Mirror Ion Source), работающая на основе ЭЦР разряда в прямой магнитной ловушке с накачкой мощным СВЧ излучением с частотой 37.5 ГГц с мощностью до 130 кВт, плотность мощности порядка 10 кВт/см^2 .

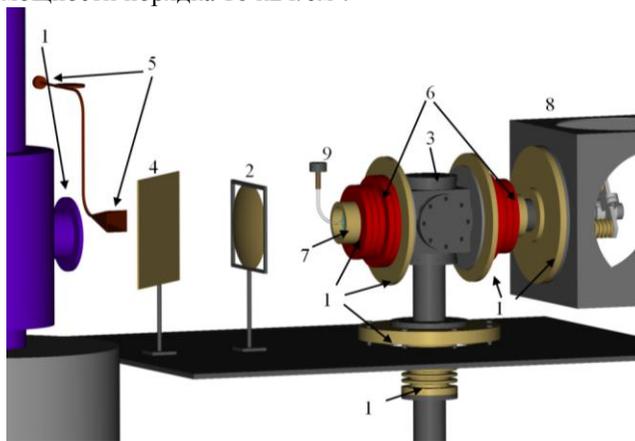


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 - гиротрон (стрелка указывает на выходное окно), 2 - фокусирующая линза, 3 - разрядная вакуумная камера, 4 - ответвитель СВЧ, 5 - измерительный тракт, 6 - магнитные катушки, 7 - входное кварцевое СВЧ окно, 8 - диагностическая вакуумная камера, 9 - импульсный клапан напуска газа.

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки. В разрядную вакуумную камеру, помещённую в прямую осесимметричную магнитную ловушку, вводится квазигауссов волновой пучок, туда же вводится рабочий газ. В условиях ЭЦР происходит пробой газа низкого давления и сильный нагрев электронов. Электроны и ионы удерживаются в магнитной ловушке достаточное для многократной ионизации ионов время. В разделе приводится описание: магнитной ловушки, вакуумной системы, системы напуска газа, система предыонизации, системы синхронизации исполнительных устройств, системы экстракции ионов. **Раздел 1.3** посвящён описанию диагностических методов. Диагностики, используемые в работе: СВЧ зонд плазмы, ленгмюровские зонды - подвижный и опорный, детектор жёсткого рентгеновского излучения, фотокамера, фотоэлектронный умножитель, фотоэлектрон-

ный регистратор, анализатор разлетающейся плазмы, различные цилиндры Фарадея, анализатор ионного пучка. **Раздел 1.4** посвящён исследованию образования многозарядных ионов в плазме ЭЦР разряда, поддерживаемого миллиметровым излучением гиротрона. В **разделе 1.4.1** описан квазигазодинамический режим удержания плазмы, который реализуется в нашей установке. Квазигазодинамический режим удержания плазмы в отличие от пастуховского характеризуется большим временем выноса плазмы с ионно-звуковой скоростью по сравнению со временем заполнением конуса потерь. Конус потерь остаётся заполненным. При этом длина свободного пробега электрона значительно превосходит размер магнитной ловушки в отличие от газодинамических ловушек в которых электрон испытывает много столкновений. Глубокая обдирка ионов в ЭЦР разряде в магнитной ловушке происходит преимущественно электронным ударом. Определяющими факторами, влияющими на эффективность образования МЗИ в плазме, являются: достаточная температура электронов T_e и параметр удержания плазмы в ловушке $N_e \tau_i$ (N_e – концентрация плазмы, τ_i - время удержания ионов в ловушке). T_e должна в несколько раз превосходить энергию связи "последнего отрываемого" электрона с ионом, в этом случае скорость обдирки ионов будет максимальна. Параметр удержания плазмы в ловушке $N_e \tau_i$, т.е. время взаимодействия горячих электронов с ионами, помноженное на концентрацию плазмы N_e , должен быть достаточным для достижения максимального заряда в процессе ступенчатой ионизации. Использование в нашем случае более коротковолнового и более мощного источника излучения для нагрева плазмы позволило увеличить концентрацию плазмы более чем на порядок по сравнению с традиционными источниками МЗИ, при этом реализуется квазигазодинамический режим удержания плазмы. Описание проведённых экспериментов, приведённое в **разделе 1.4.2**, доказывает реализацию в нашем случае именно квазигазодинамического режима удержания плазмы. 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 $N_w \approx 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, вторая, «горячая» фракция, имеет температуру $T_h \approx 10$ кэВ и концентрацию $N_h \approx 1.5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$. В условиях, оптимальных для генерации МЗИ, появляется выраженное разделение длительности горения разряда на две стадии. Исследованию динамики плазмы посвящён **раздел 1.4.3**. Показано, что параметры плазмы на двух стадиях разряда составляют: на первой: $Z_i = 7.5$, $T_e = 400$ эВ, $N_e = 5 \cdot 10^{12} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$; на второй: $Z_i = 6$, $T_e = 250$ эВ, $N_e = 10^{13} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$. На обеих стадиях разряда реализуется квазигазодинамический режим удержания плазмы с заполненным конусом потерь. Параметр удержания $N_e \tau_i$ составляет $1.5 \cdot 10^8$ и $1.6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}$ соответственно. **Раздел 1.4.4** посвящён исследованию причин ограничения длительности первой стадии разряда, оптимальной с точки зрения формирования

МЗИ, исследованию механизмов, приводящих к резкой смене параметров плазмы при переходе горения разряда из одной стадии в другую. В разделе приведены результаты исследования при помощи скоростной фотографии, ионного анализа. Делается вывод о том, что развитие разряда на второй стадии связано с газовой выделением со стенок разрядной вакуумной камеры. Делается вывод о существовании мощного источника нейтральных атомов в течение второй стадии разряда. Влияние выбиваемых из стенок вакуумной камеры атомов на динамику ЭЦР пробоя исследуется при помощи решения системы балансных уравнений для концентрации плазмы и нейтралов. На нольмерной модели удалось показать, что газовыделение со стенок может играть определяющую роль в динамике ЭЦР разряда с большой плотностью и препятствовать образованию МЗИ в ЭЦР источниках. **Раздел 1.5** содержит описание экспериментов по формированию ионного пучка из плазмы ЭЦР разряда. В экспериментальной установке используется двухэлектродная система пирсовой геометрии. Продемонстрирована возможность формирования пучка ионов экстрагированных из плотной плазмы ЭЦР разряда, - полный ток пучка составил 0.45 мА, плотность тока в зоне экстракции - 60 мА/см², а нормализованный эмиттанс - не более 0.25 п·мм·мрад. В **разделе 1.6** подводятся итоги первой главы.

Во **второй главе** диссертации описываются исследования многократной дополнительной ионизации ионов плазмы вакуумно-дугового разряда в магнитной ловушке с нагревом электронов в условиях ЭЦР. В **разделе 2.1** обосновывается идея использования вакуумнодугового плазмогенератора для инжекции плазмы тугоплавких металлов в ЭЦР источник с целью повышения кратности ионизации металлических ионов в магнитной ловушке за счёт дополнительной ионизации горячими электронами. За счёт использования более мощного и более коротковолнового излучения гиротрона, нам удаётся проводить исследования при существенно (более чем на порядок по сравнению с традиционными ионными ЭЦР источниками) большей плотности плазмы, так что ионы за время пролёта длины ловушки испытывают достаточное число ионизирующих столкновений. Инжекция плазмы вакуумной дуги в ЭЦР источник с накачкой излучением гиротрона позволяет надеяться на достижение необходимого значения параметра удержания и при малых временах жизни ионов в ловушке. **Раздел 2.2** посвящён описанию вакуумно-дугового плазмогенератора, используемого в экспериментах. Источники ионов этого типа функционируют благодаря аномальным ионам. По современным представлениям, потоки аномальных ионов образуются в результате взрывной катодной эмиссии, при которой и формируются плазменные струи, содержащие ионы материала катода. Для интегрирования плазмогенератора в ЭЦР источник МЗИ потребовалось разработать новую систему ввода СВЧ излучения в плазменную камеру, которая сочетала в себе квазипродольный по отношению к магнитному полю ввод СВЧ излучения и продольный впрыск плазмы. По сравнению с предыдущей системой ввода СВЧ излучения в плазму, удалось

повысить плотность мощности в области ЭЦР резонанса на порядок и достичь значения 100 кВт/см^2 . В **разделе 2.3** описываются эксперименты по дополнительной ионизации ионов металлов плазмы вакуумно-дугового разряда в магнитной ловушке с нагревом электронов излучением гиротрона в условиях ЭЦР, эксперименты проводились как с легкоплавким (свинец), так и с тугоплавким (платина) катодом. **Раздел 2.4** посвящён обсуждению полученных результатов. Нагрев электронов металлической плазмы СВЧ волной в условиях ЭЦР приводит к дополнительной обдирке ионов и к повышению концентрации плазмы. Достигнутое значение параметра удержания в эксперименте $N_e \tau_i = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3} \cdot 15 \text{ мкс} = 3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$, приблизительно соответствует полученному максимальному среднему заряду ионов. На спектрах отчётливо виден значительный сигнал иона Pt^{7+} . Плотность тока ионного пучка, который можно было бы извлечь из такой плазмы, составляет $J_e = e \cdot N_e \cdot V_{\text{Pt}} \approx 4 \text{ еА/см}^2$. Дальнейшее улучшение параметров источников многозарядных ионов может быть связано с увеличением частоты греющего излучения. В **разделе 2.5** обосновывается перспективность использования гиротрона с в два раза большей частотой излучения – 75 ГГц для дальнейшего улучшения работы источника металлических МЗИ. В **разделе 2.6** приводятся результаты оценочного расчёта зарядового состава плазмы для различных условий эксперимента. **Раздел 2.7** посвящён описанию экспериментальной установки, созданной для проведения этих экспериментов. Описываются новая магнитная система (**раздел 2.7.1**), новая система ввода СВЧ энергии в плазму (**раздел 2.7.2**), новый миниатюрный вакуумно-дуговой плазмогенератор (**раздел 2.7.3**). В **разделе 2.8** приведены результаты экспериментальных исследований генерации многозарядных ионов металлов, в которых для нагрева плазмы вакуумного дугового разряда использовалось излучение гиротрона с большей частотой (75 ГГц) и с более высокой мощностью (до 200 кВт). При оптимальных параметрах эксперимента получен пучок металлических ионов со средним зарядом +7. Максимальная достигнутая кратность ионизации металлических ионов составила 10+. На рис. 2 приведён спектр ионов платины.

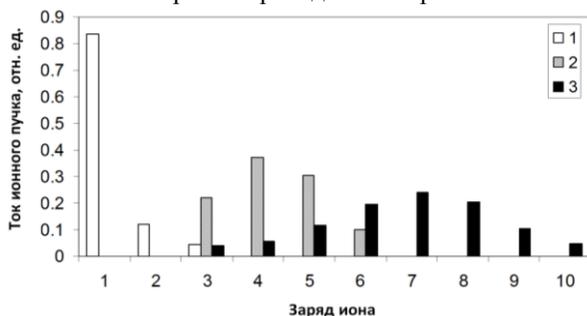


Рис. 2. Распределение ионов платины по кратностям ионизации при оптимальных условиях. 1 - без СВЧ нагрева, 2 - нагрев излучением с частотой 37 ГГц, мощностью 65 кВт, 3 - нагрев излучением с частотой 75 ГГц, мощностью 200 кВт.

Раздел 2.9 содержит выводы главы 2. Экспериментально удалось показать перспективность данного метода получения МЗИ тугоплавких металлов. Повышение частоты греющего поля в два раза привело к существенному сдвигу распределения ионов по зарядовым состояниям в сторону больших кратностей ионизации.

Третья глава посвящена описанию экспериментов с разрядом в газах с нагревом в условиях ЭЦР импульсным излучением гиротрона с частотой 75 ГГц. Основная идея состоит в том, что использование большей частоты греющего поля позволяет поддерживать электронную температуру плазмы на высоком уровне при большей концентрации плазмы. **Раздел 3.1** содержит введение в данную проблему. Время, необходимое для нарастания концентрации плазмы в ловушке с затравочного значения до стационарного значения, определяется начальной концентрацией электронов и давлением газа в вакуумной камере. При достаточно низких давлениях, необходимых для достижения высокой кратности ионизации ионов, в случае использования импульсного источника микроволнового излучения время развития разряда может стать существенным параметром, ограничивающим пространство параметров эксперимента. **Раздел 3.2** посвящён исследованию развития ЭЦР разряда в магнитной ловушке при низком давлении. Показано, что для развития разряда при понижении давления требуется все большее время. Данная проблема может быть решена за счёт быстрой предварительной ионизации газа в магнитной ловушке с сильным полем. **Раздел 3.3** посвящён описанию исследованных разрядных систем, позволяющих реализовать предварительную ионизацию газа за счёт использования разряда пеннинговского типа. Ключевой особенностью разряда пеннинговского типа является возможность горения в сильном магнитном поле, - чем выше магнитное поле, тем лучше условия для горения разряда. **Раздел 3.4** содержит описание экспериментального исследования ЭЦР разряда в гелии при сильной предварительной ионизации разряда в разряде пеннинговского типа. В экспериментах получена плазма, состоящая из полностью "обданных" ионных остовов – альфа частиц и электронов. Средний заряд ионов в плазме равнялся 2. **Раздел 3.5** содержит выводы главы 3.

Четвертая глава посвящена описанию исследования возможности использования ЭЦР разряда, поддерживаемого миллиметровым излучением гиротронов в магнитной ловушке в качестве источника мягкого рентгеновского излучения. **Раздел 4.1** содержит постановку задачи этого исследования. В **разделе 4.2** описывается экспериментальное исследование 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 излу-

чения плазмы генерируется в интервале длин волн приблизительно $\lambda \approx 45\text{--}120 \text{ \AA}$, а максимум излучения принадлежит области $\lambda \approx 70\text{--}100 \text{ \AA}$. **Раздел 4.3** посвящён экспериментальному исследованию плазмы вакуумно-дугового разряда в парах олова, дополнительно нагреваемой в условиях ЭЦР, как источника мягкого рентгеновского излучения. В данном случае мы использовали миниатюрный плазмогенератор с катодом из высокочистого олова. Для дополнительного нагрева плазмы вакуумно-дугового разряда использовалось излучение гиротрона с частотой излучения 75 ГГц, мощностью до 50 кВт, длительностью импульса 150 мкс. Интенсивность излучения плазмы в спектральном диапазоне $13.5 \text{ нм} \pm 1\%$ достигала $\approx 50 \text{ Вт}$ в телесный угол $4\pi \text{ ст.рад}$. На рис. 3 приведена схема этого эксперимента. **Раздел 4.4** посвящён моделированию плазмы вакуумно-дугового разряда в парах олова, нагреваемой СВЧ излучением в условиях ЭЦР. На основании проведённых расчётов и проделанных экспериментов предложена концепция источника непрерывного мощного МРИ для проекционной литографии высокого разрешения. **Раздел 4.5** содержит выводы главы 4.

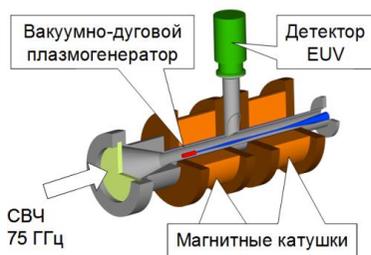


Рис. 3. Схема исследования свечения плазмы в диапазоне мягкого рентгеновского излучения.

Пятая глава диссертации посвящена исследованиям перспектив использования ЭЦР разряда в качестве источника активного азота для металлургической газофазной эпитаксии. **Раздел 5.1** содержит описание проблемы и используемых подходов. Мы предлагаем для активации азота использовать ЭЦР разряд, поддерживаемый излучением технологического гиротрона непрерывного действия с частотой излучения 24 ГГц и мощностью до 5 кВт. Такой разряд обладает рядом преимуществ по сравнению с другими типами разрядов. ЭЦР резонанс обеспечивает высокую эффективность взаимодействия СВЧ излучения с электронным компонентом плазмы. Обеспечивается высокий коэффициент поглощения СВЧ излучения в широком диапазоне длин волн. Это даёт возможность осуществить быстрый высокий удельный энерговыход в плазму, и, тем самым, обеспечить высокий темп диссоциации и возбуждения молекул. Иначе говоря, можно обеспечить высокую скорость продува газа через плазму с заметной долей диссоциации и возбуждения молекул при достаточно низком давлении (оптимальном с точки зрения диссо-

циации). **Раздел 5.2** содержит описание экспериментальной установки. В установке используется технологический гиротрон непрерывного действия с частотой излучения 24 ГГц и мощностью до 5 кВт. Описана линия передачи СВЧ энергии, узел согласования СВЧ излучения с плазмой, магнитная система однопробочной конфигурации, устройство камеры роста и откачная система. В **разделе 5.3** 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 1100 Вт, температура электронов при этом составляет около 5,3 эВ. **Раздел 5.4** содержит описание исследований и поиск 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 с на уровне $4 \cdot 10^{18}$ шт./с. **Раздел 5.5** посвящён экспериментам по росту кристаллов нитрида индия. В результате выполненного цикла работ было показано, что метод металлорганической газофазной эпитаксии при активации азота в плазме, создаваемой с помощью нового плазменного источника на основе гиротрона, позволяет получать плёнки InN высокого качества при рекордных скоростях роста, достигающих значений $10 \text{ мкм} \cdot \text{ч}^{-1}$. При этом качество получаемых плёнок оказывается на высоком уровне. Для пленок InN на фианите минимальное значение ширины рентгенодифракционной кривой качания составляет 0,26 deg. При этом значение среднеквадратичной шероховатости поверхности составляет всего 1,25 нм. Высокая производительность источника активного азота на основе плазмы ЭЦР разряда, поддерживаемого СВЧ излучением гиротрона, позволило выйти на качественно новый уровень – поставить и решить задачу роста объёмного кристалла нитрида индия. На рис. 4 приведена микрофотография выращенного толстого эпитаксиального слоя нитрида индия. **Раздел 5.6** содержит выводы главы 5.

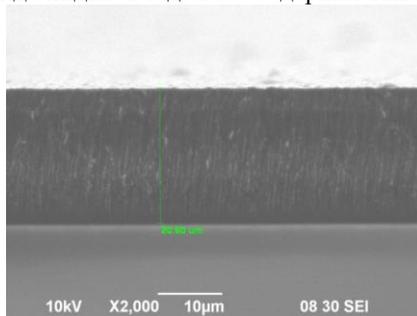


Рис. 4. Микрофотография скола слоя нитрида индия.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Исследована плазма ЭЦР разряда в магнитной ловушке типа пробкотрон, поддерживаемая излучением миллиметрового диапазона длин волн. Показано, что в условиях эксперимента реализуется квазигазодинамический режим удержания плазмы в зеркальной магнитной ловушке. При уменьшении давления напускаемого газа распределение ионов смещается в сторону больших кратностей ионизации. В эксперименте удалось продемонстрировать средний заряд ионов азота +4, в аргоновой плазме средний заряд ионов был +8. Продемонстрирован пучок ионов, извлечённых из плотной плазмы ЭЦР разряда с током 0.5 мА и нормализованным эмиттансом менее 0.25 п·мм·мрад. Высокий средний заряд получаемых ионов и большая эмиссионная способность плазмы позволяет использовать такой разряд в источнике многозарядных ионов

2. Впервые продемонстрирована эффективность дополнительной ионизации ионов металлов плазмы вакуумной дуги, инжектируемой в магнитную ловушку, за счёт ЭЦР нагрева электронов плазмы СВЧ излучением. Использование в экспериментах мощного коротковолнового электромагнитного излучения гиротронов позволило работать с большой (порядка 10^{13} см⁻³) концентрацией плазмы и обеспечить многократную дополнительную ионизацию. Эффект повышения кратности ионизации продемонстрирован как для легкоплавкого (свинец), так и для тугоплавкого (платина) материалов.

3. Установлено, что время удержания плазмы вакуумно-дугового разряда, инжектируемой в прямую магнитную ловушку, определяется пролётом ионов вдоль оси системы. При плотности плазмы в ЭЦР разряде более 10^{13} см⁻³ этого времени достаточно для дополнительной многократной ионизации ионов. Проведённые эксперименты продемонстрировали перспективность данного метода получения МЗИ тугоплавких металлов. Повышение частоты греющего поля 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 со средним зарядом +7. Максимальная достигнутая кратность ионизации металлических ионов составила 10+.

4. Повышение частоты повторения следования разрядных импульсов до 1 Гц позволило снизить содержание газовых примесей в разряде, что, в свою очередь, увеличило стабильность работы источника многозарядных металлических ионов.

5. Проведены исследования ионного состава плазмы импульсного ЭЦР разряда при низком (ниже пробойного при заданной длительности импульса) давлении в условиях сильной предварительной ионизации газа с помощью

непрерывно горящего разряда пеннинговского типа. Продемонстрирован существенный сдвиг распределения ионов по кратностям ионизации в сторону больших зарядностей. Так, в случае использования гелия в качестве рабочего газа, получена плазма, состоящая из полностью "ободранных" ионных остовов и электронов. Средний заряд ионов в плазме равнялся 2. Благодаря непрерывно горящему разряду пеннинговского типа между импульсами ЭЦР разряда, удаётся избавиться от большей части примесей в разряде.

6. Исследованные в ходе экспериментов рентгеновские спектры излучения плазмы ЭЦР разряда в тяжёлых (воздух, кислород, аргон) газах и проведённые абсолютные измерения интенсивностей рентгеновского излучения в диапазонах длин волн $\lambda = 6,5\text{--}20$ нм и $\lambda \approx 0,1\text{--}0,6$ нм показали, что такой разряд является эффективным источником мягкого рентгеновского излучения, максимум светимости приходится на область длин волн 10 нм. Наиболее интенсивное мягкое рентгеновское излучение наблюдалось в эксперименте с разрядом в аргоне. В воздухе и кислороде интегральная по длинам волн интенсивность МР излучения была меньше в 3 – 4 раза. Абсолютные измерения продемонстрировали эффективность преобразования СВЧ излучения в мягкое рентгеновское излучение на уровне 10%.

7. Экспериментально установлено, что плазма вакуумно-дугового разряда с катодом, выполненным из олова, дополнительно нагреваемая СВЧ излучением в условиях ЭЦР, при оптимальных условиях содержит ионы олова с кратностями ионизации от +7 до +9 и излучает в диапазоне длин волн $13,5 \text{ нм} \pm 1\% \approx 50$ Вт в телесный угол 4π ст.рад. Поперечный размер излучающей области плазмы составлял 3 мм, а продольный - 5 см, объем излучающей плазмы - $0,35 \text{ см}^3$, удельная мощность свечения в указанном спектральном диапазоне достигала $\sim 100 \text{ Вт/см}^3$.

8. 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 $\langle Z \rangle = 9$, $T_e = 200 - 300$ эВ. Такая плазма будет излучать 1 кВт в диапазоне $13,5 \text{ нм} \pm 1\%$ при эффективности преобразования СВЧ излучения в МРИ на уровне 5%. Такие параметры источника излучения близки к требуемым для успешного коммерческого применения.

9. 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. Показано, что в таком ЭЦР разряде в азоте возможно получение плазмы с уникальными параметрами: электронной плотностью на уровне до 10^{12} см^{-3} и температурой электронов от 1 до 10 эВ в диапазоне давлений газов от 10^{-3} до 10 Торр.

10. Методом масс-спектрометрического анализа продуктов реакции титрации монооксида азота измерен поток атомарного азота в зависимости от

мощности СВЧ нагрева и потока молекулярного азота через плазму. Продемонстрирован источник атомарного азота с максимальной производительностью $4 \cdot 10^{18}$ шт./с, что является рекордным значением на данный момент.

11. Показано, что метод металлоорганической газофазной эпитаксии при активации азота в плазме, создаваемой с помощью нового плазменного источника на основе ЭЦР разряда, поддерживаемого излучением гиротрона, позволяет получать плёнки InN высокого качества при рекордных скоростях роста, достигающих значений $10 \text{ мкм} \cdot \text{ч}^{-1}$.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах:

1. S. Golubev, I. Izotov, S. Razin, A. Sidorov, V. Skalyga, A. Vodopyanov, V. Zorin, and A. Bokhanov, "High current ECR source of multicharged ion beams," Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms, vol. 256, no. 1, pp. 537–542, 2007.
2. Водопьянов А.В., Голубев С.В., Зорин В.Г., Разин С.В., Шилов М.А., "Параметры плазмы электронно-циклотронного резонансного разряда в открытой магнитной ловушке в квазигазодинамическом режиме удержания," Письма в журнал технической физики., т. 25, стр. 90-94, 1999.
3. V. G. Zorin, A. F. Bokhanov, S. V. Golubev, I. V. Izotov, D. A. Mansfeld, S. V. Razin, A. V. Sidorov, V. A. Skalyga, A. V. Vodopyanov, A. Physics, and U. St., "Gasdynamic Ecr Sources of Multicharged Ions," High Energy Phys. Nucl. Phys., vol. 2007, no. 7, pp. 128–130, 2007.
4. M. A. Dorf, A. V. Sidorov, V. G. Zorin, A. F. Bohanov, A. V. Vodopyanov, I. V. Izotov, S. V. Razin, and V. A. Skalyga, "Noise suppression and stabilization of an ion beam extracted from dense plasma," J. Appl. Phys., vol. 102, no. 5, pp. 1–5, 2007.
5. Водопьянов А.В., Голубев С.В., Господчиков Е.Д., Смолякова О.Б., Суворов Е.В. «О возможности электронного циклотронного нагрева критической плазмы в прямой магнитной ловушке», Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 6. С. 488.
6. Водопьянов А.В., Голубев С.В., Зорин В.Г., Разин С.В., Муругов В.М., Сеник А.В., Кравченко А.Г., Литвин Д.Н., Мисько В.Н., Петров С.И. и др., «Влияние газовой выделения со стенок вакуумной камеры на динамику ЭЦР разряда в магнитной ловушке», Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2003. Т. 46. № 8-9. С. 830-835.
7. S. V. Golubev, S. V. Razin, V. E. Semenov, A. N. Smirnov, A. V. Vodopyanov, and V. G. Zorin, "Formation of multi-charged ions and plasma stability at quasigasdynamic plasma confinement in a mirror magnetic trap," Rev. Sci. Instrum., vol. 71, no. 2, p. 669, 2000.

8. J. L. Bouly, J. C. Curdy, R. Geller, S. V. Golubev, A. Lacoste, T. Lamy, P. Sole, P. Sortais, S. V. Razin, J. L. Vieux-Rochaz, T. Thuillier, A. V. Vodopyanov, and V. G. Zorin, "High current density production of multicharged ions with ECR plasma heated by gyrotron transmitter," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 73, no. 2, p. 528, 2002.
9. V. Zorin, S. Golubev, S. Razin, A. Sidorov, V. Skalyga, and A. Vodopyanov, "High current density ion beam formation from plasma of electron cyclotron resonance discharge," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 75, no. 5, pp. 1675–1677, 2004.
10. А. В. Водопьянов, С. В. Голубев, В. Г. Зорин, А. Ю. Крячко, А. Я. Лопатин, В. И. Лучин, С. В. Разин, А. Н. Смирнов, "Электронно-циклотронный резонансный разряд в тяжёлых газах, поддерживаемый мощным микроволновым пучком в магнитной ловушке, как источник мягкого рентгеновского излучения," *Письма в ЖТФ*, Т. 26, В. 24, С. 7–12, 2000.
11. E. D. Gospodchikov, S. V. Golubev, O. B. Smolyakova, E. V. Suvorov, and A. V. Vodopyanov, "On the Possibility of ECR-Discharge with Overcritical Plasma Density in Axisymmetrical Magnetic Trap," *Fusion Sci. Technol.*, vol. 59, no. 1T, pp. 223–225, 2011.
12. A. V. Vodopyanov, S. V. Golubev, V. G. Zorin, S. V. Razin, A. V. Vizir, A. G. Nikolaev, E. M. Oks, and G. Y. Yushkov, "Multiple ionization of metal ions by ECR heating of electrons in vacuum arc plasmas," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 75, no. 5, p. 1888, 2004.
13. A. G. Nikolaev, K. P. Savkin, E. M. Oks, A. V. Vizir, G. Y. Yushkov, A. V. Vodopyanov, I. V. Izotov, and D. A. Mansfeld, "Generation of high charge state metal ion beams by electron cyclotron resonance heating of vacuum arc plasma in cusp trap," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 83, p. 02A309, 2012.
14. Водопьянов А.В., Голубев С.В., Мансфельд Д.А., Николаев А.Г., Окс Е.М., Разин С.В., Савкин К.П., Юшков Г.Ю., «Генерация многозарядных ионов тугоплавких металлов в электронно-циклотронном резонансном разряде в прямой магнитной ловушке», *Журнал технической физики*, 2005. Т. 75, стр. 101-105.
15. Водопьянов А.В., Голубев С.В., Мансфельд Д.А., Николаев А.Г., Окс Е.М., Хижняк В.И., Юшков Г.Ю., «Множественная ионизация ионов металлов вакуумной дуги в магнитной ловушке с нагревом мощным СВЧ-излучением», *Письма в журнал технической физики*, Т. 33, 2007, Стр. 44-49.
16. G. Y. Yushkov, A. V. Vodopyanov, A. G. Nikolaev, I. V. Izotov, K. P. Savkin, S. V. Golubev, and E. M. Oks, "Gyrotron microwave heating of vacuum arc plasma for high-charge-state metal ion beam generation," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 41, no. 8, pp. 2081–2086, 2013.
17. G. Y. Yushkov, K. P. Savkin, A. G. Nikolaev, E. M. Oks, A. V. Vodopyanov, I. V. Izotov, and D. A. Mansfeld, "Formation of Multicharged Metal Ions in

- Vacuum Arc Plasma Heated by Gyrotron Radiation,” *Plasma Sci. Technol.*, vol. 13, no. 5, pp. 596–599, Oct. 2011.
18. A. V. Vodopyanov, S. V. Golubev, V. I. Khizhnyak, D. A. Mansfeld, A. G. Nikolaev, E. M. Oks, K. P. Savkin, A. V. Vizir, and G. Y. Yushkov, “High current multicharged metal ion source using high power gyrotron heating of vacuum arc plasma,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 79, no. 2, p. 02B304, 2008.
 19. A. V. Vodopyanov, S. V. Golubev, V. I. Khizhnyak, D. A. Mansfeld, A. G. Nikolaev, and E. M. Oks, “Multiple Ionization of Metal Ions in SMIS 75,” *High Energy Phys. Nucl. Phys.*, vol. 2007, no. 7, pp. 159–161, 2007.
 20. A. V. Vodopyanov, I. V. Izotov, D. A. Mansfeld, and G. Y. Yushkov, “Multicharged ion source based on Penning-type discharge with electron cyclotron resonance heating by millimeter waves,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 83, p.02A325, 2012.
 21. A. V. Vodopyanov, S. V. Golubev, I. V. Izotov, A. G. Nikolaev, E. M. Oks, K. P. Savkin, and G. Y. Yushkov, “Glow plasma trigger for electron cyclotron resonance ion sources,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 81, no. 2, p. 02A305, 2010.
 22. A. V. Vodopyanov, “ECR Plasma with 75GHz Pumping,” *High Energy Phys. Nucl. Phys.*, vol. 2007, no. 2, pp. 152–155, 2007.
 23. A. V. Vodopyanov, S. V. Golubev, I. V. Izotov, D. A. Mansfeld, and G. Y. Yushkov, “He 2+ source based on Penning-type discharge with electron cyclotron resonant heating by millimeter waves,” *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 20, no. 3, p. 035014, 2011.
 24. Водопьянов А.В., Голубев С.В., Мансфельд Д.А., Николаев А.Г., Савкин К.П., Салашенко Н.Н., Чхало Н.И., Юшков Г.Ю., «Источник жесткого ультрафиолетового излучения на основе ЭЦР разряда», *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. Т. 88. С. 103-106. 2008.
 25. Скалыга В.А., Зорин В.Г., Изотов И.В., Водопьянов А.В., Голубев С.В., Мансфельд Д.А., Разин С.В., Сидоров А.В. “Короткоимпульсный электронный циклотронный резонансный источник многозарядных ионов,” *Письма в ЖТФ*, том 80, вып.12, стр. 90–94, 2010.
 26. А. В. Водопьянов, С. В. Голубев, Д. А. Мансфельд, Н. Н. Салашенко, and Н. И. Чхало, “Источник экстремального ультрафиолетового излучения на основе плазмы, нагреваемой излучением миллиметрового диапазона,” *Известия РАН. Серия физическая*, том 75, вып. 1, стр. 68–70, 2011.
 27. M. Glyavin, S. V. Golubev, I. V. Izotov, A. G. Litvak, A. G. Luchinin, S. V. Razin, A. V. Sidorov, V. A. Skalyga, and A. V. Vodopyanov, “A point-like source of extreme ultraviolet radiation based on a discharge in a non-uniform gas flow, sustained by powerful gyrotron radiation of terahertz frequency band,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 105, no. 17, 2014.
 28. A. Vodopyanov, Y. Buzynin, D. Mansfeld, O. Khrykin, Y. Drozdov, P. Yunin, A. Lukyanov, M. Viktorov, S. Golubev, and V. Shashkin, “Monocrystalline InN Films Grown at High Rate by Organometallic Vapor Phase Epi-

- taxy with Nitrogen Plasma Activation Supported by Gyrotron Radiation,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 52, no. 11R, p. 110201, 2013.
29. A. Vodopyanov, D. Mansfeld, Y. Buzynin, M. Drozdov, Y. Drozdov, O. Khrykin, A. Lukyanov, M. Viktorov, S. Golubev, and V. Shashkin, “Indium Nitride Film Growth by Metal Organic Chemical Vapor Deposition with Nitrogen Activation in Electron Cyclotron Resonance Discharge Sustained by 24 GHz Gyrotron Radiation,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 52, no. 8S, p. 08JD07, 2013.
 30. Ю. Н. Бузынин, М. Е. Викторов, А. В. Водопьянов, С. В. Голубев, М. Н. Дроздов, Ю. Н. Дроздов, А. Ю. Лукьянов, Д. А. Мансфельд, Е. В. Скороходов, О. И. Хрыкин, and В. И. Шашкин, “Рост пленок InN методом металлоорганической газофазной эпитаксии на подложках Al_2O_3 и иттрием стабилизированного циркония при активации азота в плазме, создаваемой излучением гиротрона в условиях электронно-циклотронного резонанса,” *Письма в журнал технической физики*, вып. 24, стр. 86, 2012.
 31. A. V. Vodopyanov, S. V. Golubev, D. A. Mansfeld, P. G. Sennikov, and Y. N. Drozdov, “Experimental investigations of silicon tetrafluoride decomposition in ECR discharge plasma,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 82, no. 6, 2011.
 32. A. V. Vodopyanov, D. A. Mansfeld, and S. V. Golubev, “Source of reactive nitrogen based on ECR plasma,” *Probl. At. Sci. Technol.*, vol. 1, no. 6, pp. 231–233, 2013.
 33. A. Vodopyanov and D. Mansfeld, “Reactive nitrogen source based on ECR discharge sustained by 24 GHz radiation,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 54, no. 4, p. 040302, 2015.
 34. Ю. Н. Бузынин, А. В. Водопьянов, С. В. Голубев, М. Н. Дроздов, Ю. Н. Дроздов, А. Ю. Лукьянов, Д. А. Мансфельд, О. И. Хрыкин, В. И. Шашкин, and П. А. Юнин, “Рост с высокими скоростями пленок InN на подложках фианита и сапфира методом металлоорганической газофазной эпитаксии с плазменной активацией азота,” *Письма в журнал технической физики*, вып. 6, стр. 17–25, 2015.

Патенты

1. С. В. Голубев, В. Г. Зорин, А. В. Водопьянов, А. Ф. Боханов, С. В. Разин, Д. А. Мансфельд, М. Ю. Казаков, А. В. Сидоров, И. В. Изотов, В. А. Скалыга, В. А. Колданов, “Сильноточный источник многозарядных ионов на основе плазмы электронно-циклотронного резонансного разряда, удерживаемой в открытой магнитной ловушке,” RU 2 480 858 C2, 2013.
2. А. В. Водопьянов, С. В. Голубев, А. Г. Литвак, Д. А. Мансфельд, Е. М. Окс, Н. Н. Салашенко, Н. И. Чхало, Г. Ю. Юшков, “Способ получения направленного экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения для

проекционной литографии высокого разрешения и источник направленного излучения для его реализации,” RU 2 523445 C2, 2014.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- [1] M. Nastai, J. W. Mayer, and J. K. Hirvonen, *Ion - Solid Interactions: Fundamentals and Applications*. 1996.
- [2] J. Rabalais, a. Al-Bayati, K. Boyd, D. Marton, J. Kulik, Z. Zhang, and W. Chu, “Ion-energy effects in silicon ion-beam epitaxy,” *Phys. Rev. B*, vol. 53, no. 16, pp. 10781–10792, 1996.
- [3] M. Muramatsu, a Kitagawa, S. Sato, Y. Sato, S. Yamada, T. Hattori, and S. Shibuya, “Development of the compact electron cyclotron resonance ion source for heavy-ion therapy,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 71, pp. 984–986, 2000.
- [4] J. W. Kwan, “High current injectors for heavy ion driven inertial fusion,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 71, no. 2, p. 807, 2000.
- [5] Y. T. Oganessian, V. K. Utyonkov, Y. V. Lobanov, F. S. Abdullin, A. N. Polyakov, I. V. Shirokovsky, Y. S. Tsyganov, G. G. Gulbekian, S. L. Bogomolov, B. N. Gikal, A. N. Mezentsev, S. Iliev, V. G. Subbotin, A. M. Sukhov, O. V. Ivanov, G. V. Buklanov, K. Subotic, M. G. Itkis, K. J. Moody, J. F. Wild, N. J. Stoyer, M. A. Stoyer, R. W. Loughheed, C. A. Laue, Y. A. Karelin, and A. N. Tatarinov, “Observation of the decay of $^{292}116$,” *Phys. Rev. C*, vol. 63, no. 1, p. 011301, Dec. 2000.
- [6] R. Geller, *Electron cyclotron resonance ion sources and ECR plasmas*. Bristol: Institute of Physics, 1996.
- [7] E. D. Donets, “Electron beam ion sources and their development at JINR (invited),” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 61, no. 1, p. 225, 1990.
- [8] J. A. Bykovsky, “Laser-plasma ion sources (invited)(abstract),” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 63, no. 4, p. 2788, 1992.
- [9] R. GELLER, “ECRIS - CLOSING REMARKS,” *Le J. Phys. Colloq.*, vol. 50, no. C1, pp. C1–887–C1–892, Jan. 1989.
- [10] R. Geller, B. Jacquot, and P. Sortais, “The upgrading of the multiply charged heavy-ion source minimafios,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 243, no. 2–3, pp. 244–254, Mar. 1986.
- [11] G. A. Mesyats and S. A. Barengol’ts, “Mechanism of anomalous ion generation in vacuum arcs,” *Uspekhi Fiz. Nauk*, vol. 172, no. 10, p. 1113, 2002.
- [12] V. Jindal, F. Goodwin, and S. Wurm, “Getting up to speed with roadmap requirements for extreme-UV lithography,” *SPIE Newsroom*, pp. 10–13, 2011.
- [13] S. S. Andreev, S. V. Gaponov, S. A. Gusev, M. N. Haidl, E. B. Klunokov, K. A. Prokhorov, N. I. Polushkin, E. N. Sadova, N. N. Salashchenko, L. A. Suslov, and S. Y. Zuev, “The microstructure and X-ray reflectivity of Mo/Si

- multilayers,” *Thin Solid Films*, vol. 415, no. 1–2, pp. 123–132, 2002.
- [14] M. Wang, *Lithography*. Intech, 2010.
- [15] V. Bakshi, *EUV Sources for Lithography*. SPIE Press, 2006.
- [16] G. Schriever, O. Semprez, J. Jonkers, M. Yoshioka, and R. Apetz, “Laser-produced plasma versus laser-assisted discharge plasma: physics and technology of extreme ultraviolet lithography light sources,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS*, vol. 11, no. 2, p. 021104, 2012.
- [17] H. Morkoç, *Handbook of Nitride Semiconductors and Devices, Materials Properties, Physics and Growth*. Wiley, 2009.
- [18] Y. Kuwahara, Y. Fujiyama, M. Iwaya, S. Kamiyama, H. Amano, and I. Akasaki, “Nitride-based light-emitting solar cell,” *Phys. Status Solidi Curr. Top. Solid State Phys.*, vol. 7, no. 7–8, pp. 1807–1809, 2010.
- [19] J. Wu, “When group-III nitrides go infrared: New properties and perspectives,” *J. Appl. Phys.*, vol. 106, no. 1, pp. 1–28, 2009.
- [20] Y. K. Kuo, J. Y. Chang, M. C. Tsai, and S. H. Yen, “Advantages of blue InGaN multiple-quantum well light-emitting diodes with InGaN barriers,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 95, no. 1, 2009.
- [21] S. Nakamura, “InGaN-BASED LASER DIODES,” *Annu. Rev. Mater. Sci.*, vol. 28, no. 1, pp. 125–152, 1998.
- [22] F. K. Yam and Z. Hassan, “InGaN: An overview of the growth kinetics, physical properties and emission mechanisms,” *Superlattices and Microstructures*, vol. 43, no. 1, pp. 1–23, 2008.
- [23] T. Matsuoka, “Progress in nitride semiconductors from GaN to InN - MOVPE growth and characteristics,” *Superlattices Microstruct.*, vol. 37, no. 1, pp. 19–32, 2005.
- [24] S. Strite, “GaN, AlN, and InN: A review,” *J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct.*, vol. 10, no. 4, pp. 1237–1266, 1992.
- [25] S. Strite and H. Morkoc, “GAN, AIN, AND INN - A REVIEW,” *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 10, no. 4, pp. 1237–1266, 1992.
- [26] C. H. Kuo, Y. K. Fu, L. C. Chang, and Y. A. Chen, “Nitride-based blue light-emitting diodes grown with InN/GaN matrix quantum wells,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 50, no. 4, pp. 255–260, 2014.
- [27] J. Wu, W. Walukiewicz, K. M. Yu, J. W. Ager, E. E. Haller, H. Lu, W. J. Schaff, Y. Saito, and Y. Nanishi, “Unusual properties of the fundamental band gap of InN,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 80, no. 21, pp. 3967–3969, 2002.
- [28] A. G. Bhuiyan, A. Hashimoto, and A. Yamamoto, “Indium nitride (InN): A review on growth, characterization, and properties,” *Journal of Applied Physics*, vol. 94, no. 5, pp. 2779–2808, 2003.

Для заметок

ВОДОПЬЯНОВ Александр Валентинович

**ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ РАЗРЯД,
ПОДДЕРЖИВАЕМЫЙ МИЛЛИМЕТРОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ:
ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ**

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати 7.07.2016 г.
Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 1,75.
Тираж 120 экз. Заказ № 72 (2016).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН,
603950, г. Н. Новгород, ул. Ульянова, 46