

ОТЗЫВ

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

Электронно-циклотронные резонансные разряды, поддерживаемые СВЧ излучением, известны давно и уже заняли место источников плазмы для целого ряда приложений. Прежде всего – это источники ионов, плазмохимические установки, установки для нанесения покрытий и обработки материалов. Плазма в таких устройствах поддерживается, как правило, излучением магнетронов (915 МГц и 2.45 ГГц) либо клистронов (6-18 ГГц). В связи с появлением новых мощных генераторов излучения миллиметрового диапазона длин волн, надежно работающих в импульсном и непрерывном режимах работы, открываются новые перспективы для исследования и возможного применения ЭЦР источников плазмы. Прежде всего, это связано с возможностью поддерживать параметры плазмы – концентрацию и температуру электронов, на высоком, ранее недостижимом уровне. В диссертации Водопьянова А.В. представлены результаты исследования физических особенностей ЭЦР разрядов, поддерживаемых излучением миллиметрового диапазона длин волн. С единых позиций исследуются неравновесные разряды, поддерживаемые излучением с частотами 24 ГГц, 37.5 ГГц и 75 ГГц, в импульсном и непрерывном режимах работы. Тема диссертационной работы, несомненно, является **актуальной**

Структура и содержание работы.

Диссертация состоит из Введения, 5 глав, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации 282 страницы. Диссертация содержит 2 таблицы, 121 рисунок. Список литературы включает 172 наименования. Список статей автора по теме диссертации состоит из 34 пунктов.

Во **Введении** приводится обоснование актуальности темы диссертационной работы, формулируются цели работы, перечислены результаты работы и положения, выносимые на защиту, обосновывается научная новизна и практическая ценность работы. Кратко излагается содержание работы.

Первая глава диссертации посвящена описанию результатов исследования 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, приводятся результаты экспериментов с нагревом СВЧ излучением с частотой 37 ГГц.

Экспериментальная установка оснащена большим количеством диагностических методик: СВЧ и ленгмюровские зонды, детектор жесткого рентгеновского излучения, различные фоторегистраторы, цилиндры Фарадея, анализаторы ионного пучка. В первой главе приводятся результаты экспериментального исследования параметров плазмы в квазигазодинамическом режиме удержания. Распределение электронов по энергиям определялось по спектрам тормозного излучения плазмы, исследована его динамика, показано присутствие двух групп электронов с разными температурами и концентрациями. В работе показано существование двух стадий разряда в зависимости от давления. 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 также существенно различаются. Рассмотрены механизмы, которые могут привести к ограничению длительности первой стадии разряда и появлению второй. Сделан вывод о том, что газовыделение со стенок может играть определяющую роль в динамике разряда и препятствовать образованию многозарядных ионов. Продемонстрирован пучок ионов с током 0.5 мА и нормализованным эмиттансом 0.25 п·мм·мрад.

Во второй главе диссертации описываются исследования дополнительной ионизации ионов плазмы вакуумно-дугового разряда в магнитной ловушке с нагревом электронов в условиях ЭЦР. Обосновывается идея использования вакуумно-дугового плазмогенератора для инжекции плазмы металлов в ЭЦР источник для повышения кратности ионизации металлических ионов. За счёт использования мощного коротковолнового излучения, удаётся проводить исследования при большой плотности плазмы, так что ионы за время пролёта ловушки испытывают достаточное число столкновений.

Во второй главе приводятся результаты экспериментов с использованием двух установок. В одной нагрев осуществлялся излучением с частотой 37 ГГц, а во второй экспериментальной установке использовался гиротрон с частотой излучения 75 ГГц. Для обоих случаев приведены результаты экспериментальных исследований генерации многозарядных ионов металлов.

Нагрев электронов металлической плазмы СВЧ волной в условиях ЭЦР приводил к дополнительной обдирке ионов и к повышению концентрации плазмы. Средний заряд ионов платины при нагреве СВЧ излучением с частотой 37.5 ГГц составил 4,5. 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 (платина) со средним зарядом +7. Максимальная достигнутая кратность ионизации металлических ионов составила 10+.

Третья глава посвящена описанию экспериментов с короткоимпульсными разрядами в газах. Основная идея состоит в том, что использование большей частоты греющего поля (в экспериментах используется излучение с частотой 75 ГГц) позволяет поддерживать электронную температуру плазмы на высоком уровне при большей концентрации плазмы. Но время, необходимое для нарастания концентрации плазмы в

ловушке с затравочного значения до стационарного значения при достаточно низких давлениях, необходимых для достижения высокой кратности ионизации ионов может оказаться слишком большим и в случае использования импульсного источника микроволнового излучения стать существенным параметром, ограничивающим пространство параметров эксперимента. Для решения задачи создания короткоимпульсного источника многозарядных ионов были разработаны и изготовлены 4 конструкции разрядных систем на основе отражательных разрядов (пеннинговский и магнетронный разряды) в скрещенных ЕхН полях. Такая система позволяла стартовать ЭЦР разряду с плотности плазмы 10^{12} см^{-3} , что существенно сокращает время выхода на стационар. Показано, что случае использования гелия в качестве рабочего газа, получена плазма, состоящая из ионных остовов – альфа частиц и электронов.

Четвертая глава посвящена описанию исследования возможности использования ЭЦР разряда, поддерживаемого миллиметровым излучением гиротронов в магнитной ловушке в качестве источника 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 5 – 12 нм, а максимум излучения принадлежит области 7 – 10 нм. В случае аргона основное рентгеновское излучение лежит в интервале 7 – 11 нм с максимумом спектральной мощности на длине волны 9 нм, а интегральная излучаемая мощность достигает 16 кВт с коэффициентом преобразования СВЧ мощности в мягкое рентгеновское излучение на уровне 12 %.

Также в этой главе описываются исследования возможности использования плазмы вакуумно-дугового разряда в олове, дополнительно нагреваемой в условиях ЭЦР излучением мощных гиротронов, как источника мягкого рентгеновского излучения. Показано, что использование предлагаемого метода позволяет получить плазму с максимумом распределения на Sn^{7+} и получить требуемое излучение в полосе 13.5 нм $\pm 1\%$ с интенсивностью излучения 50 Вт в угол 4л ст. рад. Объем излучающей плазмы 0.35 см^3 .

Предлагается концепция построения источника излучения, удовлетворяющего требованиям проекционной литографии с использованием гиротрона с частотой 170-300 ГГц.

Пятая глава диссертации посвящена исследованиям перспектив использования ЭЦР разряда в качестве источника активного азота для металлургической газофазной эпитаксии. В работе предлагается для активации азота использовать ЭЦР разряд, поддерживаемый излучением технологического гиротрона непрерывного действия с частотой излучения 24 ГГц и мощностью до 5 кВт.

В работе 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. Измерения величины потока атомарного азота из плазмы ЭЦР разряда проводились методом титрации по реакции восстановления из монооксида. При

оптимальных условиях работы установки продемонстрирована производительность источника атомарного азота с на уровне $4 \cdot 10^{18}$ шт/с. Также в этой главе описываются исследования процесса роста пленок нитрида индия методом металорганической газофазной эпитаксии. Изучалось влияние материала подложки и буферных слоев на морфологию, структуру и фотолюминисцентные свойства пленок. Метод позволяет получать пленки InN высокого качества при скоростях роста, достигающих рекордных значений $10 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{ч}^{-1}$.

Детальный анализ материала диссертации позволяет сделать **следующие замечания:**

1. С точки зрения фундаментальной физики основой для описания процессов, возникающих в том типе электронно-циклотронного резонансного разряда, который исследован и успешно использован автором для ряда приложений, является теоретическая модель квазигазодинамического удержания плазмы в осесимметричном пробкотроне. При этом систематического описания этой модели не удалось обнаружить ни в тексте диссертации, ни в цитируемой литературе. Для реконструкции модели, без которой понимание существенной части материала диссертации не представляется возможным, потребовалось затратить немалые усилия, включая анализ разбросанных по всему тексту и порой содержащих опечатки формул, а также консультации с автором и другими экспертами. В результате проделанной работы по реконструкции модели удержания плазмы возникли естественные и важные вопросы следующего уровня, ответы на которые также не удалось получить в результате работы над материалом диссертации. Эти вопросы сформулированы в следующих пунктах.

2. Входное окно для ввода СВЧ мощности, а также плазменный электрод для формирования ионного пучка в описанных экспериментах, как правило, устанавливались в области магнитной пробки, где величина магнитного поля имела значение близкое к максимальному (см., например, рисунок 1.1 в диссертации). В этих условиях представляется большой удачей, что реализуется режим удержания с мощностью продольных потерь энергии пропорциональной электронной температуре в степени $3/2$ ($P_{\parallel} \propto T_e^{3/2}$), как предсказывает модель квазигазодинамического удержания, а не $P_{\parallel} \propto T_e^{7/2}$, как в случае реализации спитцеровской теплопроводности. В последнем случае никакой мыслимой мощности СВЧ излучения было бы недостаточно для нагрева электронной компоненты до температур в сотни электрон-Вольт. Продольную теплопроводность в ловушках открытого типа определяет целый ряд физических процессов, протекающих вблизи торцевого поглотителя плазмы и определяющих величину перепада электрического потенциала между плазмой в ловушке и поглотителем. Этот перепад потенциала должен выравнивать потоки электронов и ионов и является наиболее существенным фактором, ограничивающим аномальную электронную теплопроводность. Среди процессов, влияющих на величину потенциала следует упомянуть вторичную эмиссию электронов с поверхности поглотителя и рекомбинацию ионов плазмы с последующей ионизацией образовавшихся нейтралов. Обозначенные выше проблемы также никак не обсуждаются в

диссертации, поэтому неясно, как удалось добиться столь высоких значений электронной температуры и, как следствие, столь внушительных результатов по генерации многозарядных ионов.

3. В случае отсутствия существенного влияния электронной эмиссии, рециклинга ионов и других процессов на поверхности поглотителя плазмы, а также идеальной реализации квазигазодинамического режима удержания частиц и энергии вблизи поверхности поглотителя должен сформироваться скачок потенциала величиной в несколько электронных температур на размере толщины дебаевского слоя. Для типичных параметров эксперимента, приведенных в диссертации, это означает перепад потенциала киловольтного уровня на длине в десяток микрон. При таких величинах напряженности электрического поля на поверхности поглотителя плазмы (в данном случае плазменного электрода) с высокой вероятностью должны возникать униполярные дуги, что должно приводить к невозможности нагрева и, тем более, к невозможности генерации многозарядных ионов. Этого, очевидно, не наблюдается, а, следовательно, падение потенциала распространяется на значительно более широкую область. При этом столь важная роль процессов формирования потенциала плазмы в ловушке никак не обсуждается и даже не упоминается в диссертации.

Отмеченные замечания носят в значительной степени академический характер и мотивированы, в основном, названием диссертации, которое анонсирует освещение физических основ реализованного ЭЦР разряда. Все использованные в работе закономерности удержания плазмы, в конечном счете, оказались правильными, и не важно, получены ли они в результате точного знания всей сложной совокупности протекающих физических процессов или являются результатом завидной интуиции. Поэтому считаю, что отмеченные недостатки работы не снижают ее высокого уровня, а также важности и достоверности полученных в диссертации результатов.

Все научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертационной работе, обладают высокой степенью **обоснованности**.

Достоверность и новизна представленных в диссертации результатов, научных положений, выводов и рекомендаций также не вызывает сомнений. Полученные результаты открывают перспективы использования ЭЦР разрядов, поддерживаемых миллиметровым излучением гиротронов, в целом ряде приложений. Научные результаты диссертационной работы могут использоваться в исследовательских, проектных и конструкторских организациях, работающих в области физики 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). Также научная ценность и новизна полученных результатов подтверждается двумя патентами.

Диссертация Водопьянова А.В. является научно-квалификационной работой, в которой получены результаты, которые квалифицируются как решение важных научных проблем, связанных с экспериментальным исследованием плазмы электронно-циклотронного резонансного разряда, поддерживаемого СВЧ излучением миллиметрового

диапазона длин волн и исследованием перспектив применения таких 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 9-1 ИЯФ СО РАН,
доктор физико-математических наук

П. А. Багрянский

Сведения о составителе отзыва:

Багрянский Петр Андреевич, доктор физико-математических наук, наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, почтовый адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11, должность: заведующий лабораторией, телефон (383)-329-47-72, адрес электронной почты: p.a.bagryansky@inp.nsk.su.

Подпись д.ф.-м.н. Багрянского П.А. заверяю.

Ученый секретарь ИЯФ СО РАН
кандидат физико-математических наук



Я.В.Ракшун