

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.069.02 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
НАУЧНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЦЕНТР ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
НАУК» ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 21.11.2016 № 63

О присуждении Водопьянову Александру Валентиновичу, гражданину РФ,
ученой степени доктора физико-математических наук

Диссертация «Электронно-циклотронный резонансный разряд, поддерживаемый миллиметровым излучением: физические основы и приложения» по специальности 01.04.08 – физика плазмы принята к защите 28 июня 2016 г., протокол № 62 диссертационным советом Д 002.069.02 на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46, приказ Министерства образования и науки РФ № 717 от 09.10.2012 г.).

Соискатель Водопьянов Александр Валентинович 1976 года рождения в 1999 году окончил Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского, диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Физические особенности работы сильноточных источников многозарядных ионов на основе ЭЦР разряда» защитил в 2005 году в диссертационном совете Д 002.069.02, созданном на базе ИПФ РАН и работает заведующим лабораторией в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН, приказ ФАНО № 334 от 30.06.2015 г.).

Диссертация выполнена в отделе физики плазмы ИПФ РАН.

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) дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики имени А.М. Прохорова Российской академии наук в своем положительном заключении, подписанном главным научным сотрудником Отдела физики плазмы Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, д.ф.-м.н. по специальности 01.04.08 – физика плазмы Батановым Германом Михайловичем, указала, что диссертация А.В. Водопьянова является завершенной научно-исследовательской работой, выполненной на высоком уровне и на актуальную тему. Как по уровню проведенных исследований, так и по полученным результатам работа полностью отвечает критериям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

По теме диссертации соискателем опубликовано 34 научные статьи и два патента. 23 статьи опубликованы в зарубежных рецензируемых научных журналах, 11 статей – в отечественных журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов. Наиболее значимыми работами являются:

1. 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 выделенной со стенок вакуумной камеры на динамику ЭЦР разряда в магнитной ловушке», Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2003. Т. 46. № 8-9. С. 830-835.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.

На диссертацию и автореферат поступили 7 отзывов. Все отзывы положительные. В них отмечают актуальность диссертации, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В положительном отзыве ведущей организации были сделаны 2 замечания. Первое замечание о том, что в диссертации недостаточно обсуждается роль поляризации излучения, поглощаемого в условиях электронно-циклотронного резонанса, а второе замечание связано с неточностью построения модели, демонстрирующей взрывообразный рост концентрации плазмы вследствие десорбции газа со стенок вакуумной камеры.

Положительный отзыв официального оппонента д.ф.-м.н., Лебедева Юрия Анатольевича содержит следующие замечания: 1) при описании моделирования не указываются константы скорости ионизации; 2) при обсуждении эффективности источника активного азота не обсуждаются энергозатраты на образования активных частиц; 3) использование приближения максвелловского распределения электронов по энергиям при измерении температуры электронов недостаточно обоснованно; 4) название третьей главы не точно отражает описанные в ней исследования; 5) в пятой главе не обсуждается роль метастабильных состояний азота; 6) отмечены опечатки на рисунке 1.1.

В положительном отзыве официального оппонента д.ф.-м.н. Гусакова Евгения Зиновьевича в качестве недостатка отмечается отсутствие детального сопоставления реализованных параметров ионных источников (токов и зарядовых распределений ионов) с результатами, получаемыми другими способами.

Положительный отзыв официального оппонента д.ф.-м.н. Багрянского Петра Андреевича содержит следующие замечания: 1) отсутствие систематического описание теоретической модели удержания квазигазодинамического удержания плазмы в прямой магнитной ловушке; 2) недостаточно внимания в диссертации уделено вопросам, связанным с продольной потерей энергии из магнитной ловушки; 3) недостаточно внимания в диссертации уделяется вопросам, связанным с формированием распределения пространственного потенциала за пробками магнитной ловушки.

В отзыве на автореферат д.ф.-м.н. Юшкова Г.Ю. указывается, что формулировку научных положений, выносимых на защиту, уместно было бы

дополнить достигнутыми рекордными значениями полученных зарядов ионов и токов ионных пучков.

Отзыв на автореферат чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. Салащенко Н.Н. не содержит замечаний

В отзыве на автореферат д.ф.-м.н. Князева Б.А. указывается на опечатку в формулировке целей и задач.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обоснован тем, что оппоненты являются признанными высококвалифицированными специалистами в области физики плазмы, а одним из важнейших направлений научной деятельности ведущей организации являются исследования в области физики плазмы.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- показано, что в плазме ЭЦР разряда в открытой магнитной ловушке, поддерживаемой излучением миллиметрового диапазона длин волн реализуется квазигазодинамический режим удержания плазмы. При уменьшении давления напускаемого газа распределение ионов по кратностям ионизации смещается в сторону больших зарядов;
- впервые продемонстрирована эффективность дополнительной ионизации ионов металлов плазмы вакуумной дуги, инжектируемой в магнитную ловушку, за счёт ЭЦР нагрева электронов плазмы микроволновым 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 ионов. Эффект повышения кратности ионизации продемонстрирован для легкоплавкого (свинец) и для тугоплавкого (платина) материалов;
- повышение частоты повторения следования разрядных импульсов до 1 Гц позволило снизить содержание газовых примесей в разряде, что, в свою очередь, повысило стабильность работы источника многозарядных металлических ионов;

- в условиях сильной предварительной ионизации гелия с помощью непрерывно горящего разряда пеннинговского типа и импульсного ЭЦР разряда получена плазма, состоящая из электронов и двукратно ионизованных ионов;
- экспериментально установлено, что плазма вакуумно-дугового разряда в парах олова при дополнительном нагреве СВЧ излучением в условиях ЭЦР, в оптимальных условиях содержит ионы олова с кратностями ионизации от +7 до +9 и излучает примерно 50 Вт на длинах волн $13.5 \text{ нм} \pm 1\%$ в телесный угол $4\pi \text{ ст.рад}$. Поперечный размер излучающей области плазмы составлял 3 мм, а продольный - 5 см, объем излучающей плазмы - 0.35 см^3 , удельная мощность свечения в указанном спектральном диапазоне достигала $\sim 100 \text{ Вт/см}^3$;
- методом масс-спектрометрического анализа продуктов реакции титрации монооксида азота измерен поток атомарного азота из плазмы ЭЦР разряда, поддерживаемого излучением технологического гиротрона с частотой 24 ГГц и мощностью излучения до 5 кВт при давлении 0,1 мбар, поток атомарного азота достигает рекордных значений $4 \cdot 10^{18}$ частиц в секунду.

Значение для практики полученных соискателем результатов исследования заключается в следующем:

- на основе ЭЦР разряда, поддерживаемого в открытой магнитной ловушке мощным миллиметровым излучением, разработан источник многозарядных ионов газов (ионы азота с зарядом +5, аргона +8) и металлов (ионы свинца с зарядом +8, платины +10), с током до 0.5 мА и рекордным значением приведенного эмиттанса - 0.25 п.мм.мрад ;
- для проекционной литографии высокого разрешения предложена схема нового источника мягкого рентгеновского излучения на основе ЭЦР разряда, поддерживаемого миллиметровым излучением, с выходной мощностью на уровне 1 кВт в диапазоне $13.5 \text{ нм} \pm 1\%$ при эффективности преобразования СВЧ излучения в мягкий рентген на уровне 5 %;
- разработан источник атомарного азота для газофазной эпитаксии нитридных соединений; с помощью этого источника можно получать плёнки

InN высокого качества при рекордных скоростях роста, достигающих значений $10 \text{ мкм} \cdot \text{ч}^{-1}$.

Все изложенные в диссертационной работе оригинальные результаты получены автором лично, либо при его непосредственном участии. При получении результатов, описанных в главе 1, соискатель участвовал в постановке задач, проведении экспериментальных исследований, интерпретации полученных результатов и написании научных статей. Вклад соискателя 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) соискатель предложил и обосновал использование в качестве источника плазмы, содержащего ионы олова, миниатюрного вакуумно-дугового плазмодгенератора, разработка и изготовление которого осуществлялась в ИСЭ СО РАН. Подготовка и проведение экспериментальных исследований ЭЦР разряда как источника мягкого рентгеновского излучения проводились под руководством соискателя. Абсолютные измерения интенсивности мягкого рентгеновского излучения выполнялись с использованием аппаратуры, разработанной в ИФМ РАН. В интерпретации полученных результатов, проведении необходимых расчётов, обработке результатов, в написании научных статей и патентов вклад соискателя является определяющим.

Вклад соискателя в получение результатов, описанных в главах 2, 3 и 5, является определяющим: он участвовал в постановке задач, организовывал и проводил эксперименты, проводил обработку экспериментальных данных и выполнял необходимые численные расчёты, участвовал в интерпретации результатов и написании научных статей.

Полученные в диссертации результаты вносят существенный вклад в научное направление физики неравновесных газовых разрядов.

На заседании от 21.11.2016 г. диссертационный совет принял решение присвоить Водопьянову А.В. ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 22 человек, из них 8 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 31 человека, входящих в состав совета, проголосовали: за – 22, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Зам. председателя диссертационного совета
академик РАН



А.Г. Литвак

и.о. ученого секретаря диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук



А.И. Смирнов

подписи А.Г. Литвака и А.И. Смирнова заверяю
ученый секретарь ИПФ РАН
кандидат физ.-мат. наук



И.В. Корюкин

«21» ноября 2016 г.