

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Институт
общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук

Академик РАН



И.А. Щербаков

ноября 2016 г.

Отзыв

Ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН на работу Водопьянова А.В. «Электронно-циклотронный резонансный разряд, поддержанный миллиметровым излучением: физические основы и приложения», представленную в качестве диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы

Изучению электронно-циклотронного (ЭЦ) разряда в газах в СВЧ диапазоне длин волн излучения без малого уже 60 лет. Стоит только вспомнить многочисленные исследования ускорения плазмы Т. Консоли 60-х годов, а также СВЧ нагрева плазмы Г.Н. Глаголева и выдающиеся результаты В.В. Аликаева на токамаках. Привлекательность ЭЦ газовых разрядов для различных прикладных целей осознана довольно давно и мы имеем многие примеры их использования в дм и см диапазоне длин волн излучения. Однако мм диапазон оставался неосвоенным до исследований диссертанта, кроме изучения ЭЦ нагрева плазмы в тороидальных системах. Естественно, мм диапазон позволяет достигать значительно более высоких плотностей мощности, чем см и дм диапазон, и, в принципе, создавать устройства с высокими параметрами плазмы по плотности и энергии заряженных частиц. А создание нижегородской школой физиков современных гиротронов открывает перспективы перед отечественной техникой и технологией «быть впереди планеты всей».

В силу изложенного выше актуальность диссертации А.В. Водопьянова не вызывает ни малейшего сомнения.

Трудность прикладных исследований заключается в необходимости достичь более высоких параметров создаваемых систем и технологий по сравнению с имеющимися, не говоря еще о коммерческой привлекательности разработанных систем и технологий.

Причем эти параметры должны быть реализованы в «железе». А по меткому замечанию нашего замечательного соотечественника и нобелевского лауреата А.М. Прохорова «решать современные прикладные задачи можно только проводя исследования фундаментального характера».

В работе диссертанта были решены три задачи: найдены условия получения высоких степеней ионизации атомов с высоким порядковым номером в таблице Д.И. Менделеева в плазме ЭЦ разряда пробкотронов, включая атомы тугоплавких металлов (1); найдены условия создания интенсивных источников мягкого рентгеновского излучения, возбуждаемого в плазме ЭЦ нагрева, пригодных для литографии (2); найдены условия получения высокоинтенсивных потоков атомов азота для создания эпитаксиальных пленок и получены высококачественные пленки InN при рекордных скоростях роста (3).

Как можно видеть из текста диссертации исследования диссертанта прошли несколько этапов. В рамках решения первой задачи был выбран квазигазодинамический режим удержания плазмы в пробкотроне, что позволило существенно поднять плотность плазмы при температуре электронов 250-500 эВ и таким образом достичь восьми-десяти кратной степени ионизации атомов аргона и получить значительные токи многозарядных ионов. Было показано, что уменьшение давления до $5 \cdot 10^{-5}$ торр приводит к возникновению двух стадий поддержания разряда. На первой из них продолжительностью ~ 0.2 мс плотность близка к значению $\sim 10^{13}$ см⁻³, температура электронов достигает 0.5 кэВ, тогда как на второй плотность возрастает в несколько раз, а температура падает до 0.2 кэВ. Соответственно с этим наивысшая ионизация атомов аргона достигается на первой стадии. Изучение свечения ЭЦ разряда с помощью быстрого фоторегистратора показало расширение плазменного шнура почти на порядок величины. Автор интерпретирует это явление как результат десорбции газа со стенок камеры под воздействием диффундирующей на стенки плазмы.

Необходимо подчеркнуть, что эти исследования были выполнены с использованием 8 мм гиротрона при интенсивности излучения в области гирорезонанса ~ 10 кВт/см².

Дальнейшее решение задачи получения многозарядных ионов получило развитие в изучении условий многократной ионизации атомов тяжелых металлов. В качестве инжектора плазмы был выбран импульсный дуговой разряд. Была разработана и создана конструкция коаксиального ввода плазмы дугового разряда непосредственно в микроволновом пучке. Был использован тот же режим квазигазодинамического удержания. А интенсивности излучения гиротрона были подняты до 100 кВт/см². Естественным для квазигазодинамического режима удержания плазмы было двукратное

увеличение длины ловушки. Все это позволило увеличить кратность ионизации ионов платины до среднего значения +4.

Дальнейший шаг был сделан построением новой установки с гиротроном на 75 ГГц, что позволило поднять интенсивность до 1 МВт/см^2 . В этой установке были применены новые конструктивные решения для дугового источника и магнитных катушек. В итоге средний заряд ионов платины был повышен до +7, максимальный составил +10. В этой части диссертации удалось использовать частотный режим для работы гиротрона и катушек магнитного поля 1 Гц, что позволило снизить количество примесей, по-видимому, за счет очистки стенок вакуумной камеры.

Дальнейшее продвижение с использованием ЭЦ разряда было связано с разработкой новой конструкции источника предварительной ионизации газа. Диссертантом разработаны и изучены характеристики нескольких конструкций возбуждения различных газовых разрядов, которые позволили поднять плотность плазмы в импульсном ЭЦ разряде. Наиболее удачной оказалась конструкция разряда пеннинговского типа, позволившая получить в пробкотроне полностью ионизованную плазму гелия. Это достижение, по-видимому, решает проблему источника многозарядных ионов для европейской программы исследования осцилляции нейтрино.

Высокие степени ионизации атомов, достигнутые в экспериментах с инъекцией плазмы в ловушку из дугового импульсного источника, позволили диссертанту посягнуть на создание источника рентгеновского излучения для литографии в полупроводниковой технологии. Возможность достижения высоких интенсивностей рентгеновского излучения в диапазоне необходимых для литографии длин волн была показана в результате измерений абсолютной интенсивности рентгеновского излучения, что еще раз продемонстрировало высокий экспериментальный класс работ, рецензируемых в данном отзыве. В итоге решения данной задачи была предложена и рассчитана конструкция установки с использованием 170 ГГц гиротрона, которая может иметь коммерческий интерес.

Следующей задачей, решенной в результате изучения характеристик стационарного ЭЦ разряда в установке, созданной диссертантом, с использованием непрерывного 24 ГГц гиротрона, была разработка источника атомов азота. Новая оригинальная конструкция поддержания непрерывного ЭЦ разряда в азоте позволила получить рекордные потоки атомов азота $\sim 4 \cdot 10^{18}$ шт/с. Этот источник атомарного азота был использован для роста кристаллов нитрида индия и были получены пленки высокого качества при рекордной скорости роста ~ 10 мкм/час.

Подводя итог, отметим, что в тексте диссертации четко изложены результаты высококлассной экспериментальной работы, безусловно имеющие перспективу их прикладного использования. Диссертант продемонстрировал прекрасное владение многочисленными и разнообразными методами измерений в современной физике плазмы, изобретательность и конструкторские способности в постановке экспериментов и создании экспериментального оборудования. Обратим внимание, что в работе использована микроволновая техника высоких мощностей, рентгеновская аппаратура, техника создания интенсивных магнитных полей, магнитные и энергетические анализаторы ионов, электронная оптика создания ионов пучков плазменных объектов, техника создания газовых разрядов различного типа.

Но как это положено в отзывах остановимся на некоторых вопросах, которые не были освещены в диссертации.

В работе использовано квазипродольное распространение волн вдоль магнитного поля при линейной поляризации излучения. Это означает, что $\frac{1}{2}$ часть мощности с левой круговой поляризацией поглощается в гирорезонансе, и для её распространения нет ограничения по плотности. А другая часть с правой круговой поляризацией имеет отсечку при критической плотности и не поглощается в гирорезонансе. Обсуждение этого вопроса с диссертантом показало, что экспериментально наблюдался факт отсутствия различия параметров разряда при использовании излучения с левой круговой поляризацией и при линейной поляризации излучения, что можно объяснить изменением поляризации волны при отражении от стенок вакуумной камеры. Этот интересный факт, к сожалению, не изложен в диссертации.

При построении модели десорбции газа со стенок камеры в качестве механизма поперечной диффузии частиц использована модель классической диффузии, что представляется несколько искусственным при квазигазодинамической модели удержания плазмы в ловушке. Эти замечания не влияют на результаты исследований и не меняют высокую оценку диссертационной работы.

Результаты диссертации могут быть использованы в работах ИОФ РАН, ИЯФ им Г.И. Будкера, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, СПбГУ им. Петра Великого, ФТИ (г. Харьков) и др.

Текст диссертации соответствует тексту 34 публикаций и 2 патентов. Автореферат также правильно излагает содержание диссертации. Достоверность результатов исследований не вызывает сомнений. Результаты работы были представлены на многочисленных авторитетных международных и отечественных конференциях.

Диссертация соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (пунктам 9 - 11, 13 и 14), утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, является законченным научным исследованием и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а её автор Водопьянов Александр Валентинович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 - Физика плазмы.


Доклад Водопьянова А.В., отражающий основные результаты диссертации, был заслушан на научном семинаре отдела физики плазмы Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН 19 октября 2016 г. Работа получила единогласную положительную оценку участников семинара.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании Ученого совета отдела физики плазмы, протокол № 434 от 3 ноября 2016 г.

Председатель Ученого совета
отдела физики плазмы, к.ф.-м.н.

 В.А. Иванов

Ученый секретарь Ученого совета

 Н.Ф. Ларионова

Отзыв составил
главный научный сотрудник

 Г.М. Батанов

Отдела физики плазмы

Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН,

д.ф.-м.н. по специальности 01.04.08 – физика плазмы

тел. 8 499 135 41 65, e-mail: batanov@fpl.gpi.ru