

УТВЕРЖДАЮ

Директор
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Федеральный исследовательский центр
"Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук" (ИОФ РАН),
член-корреспондент РАН,
доктор физ.-мат. наук, профессор



/ Гарнов С.В.

« 24 » июля 2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр "Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук" (ИОФ РАН)

На диссертационную работу Веселова Алексея Павловича «Пробой газа в сфокусированных пучках электромагнитных волн субмиллиметрового диапазона», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. – «Физика плазмы»

Диссертационная работа Веселова А.П. посвящена экспериментальному исследованию пробоя атомарных и молекулярных газов и распространению разряда в пучках излучения терагерцового диапазона частот. Работа выполнена на уникальных установках с мощными источниками терагерцового излучения — гиротронами (ИПФ РАН) и Новосибирским лазером на свободных электронах (ИЯФ СО РАН). Полученные экспериментальные результаты сравниваются с расчетами в рамках существующих теоретических моделей механизмов пробоя и распространения разряда в пучках электромагнитных волн.

Актуальность работы состоит в том, что созданные в последнее в ИПФ РАН экземпляры мощных гиротронов терагерцового диапазона частот позволяет рассматривать реализацию некоторых прикладных задач (плазмохимические установки, точечные источники экстремального ультрафиолетового излучения для литографов) на основе неравновесной плазмы газового разряда, поддерживаемого излучением данного диапазона частот — что также позволяет говорить о **практической значимости** работы. А для возможности оптимизации и управления разрядом в практической реализации необходимо исследовать физику пробоя и развития газового в данном диапазоне частот, а также сравнить ее с известными механизмами пробоя и развития разряда в СВЧ и оптическом диапазоне. В работе были использованы источники излучения, сильно отстоящие друг от друга по частоте (0,25 ТГц, 0,67 ТГц, 1 ТГц, 2,3 ТГц). Таким образом в исследовании пробоя

и распространения разряда был существенно перекрыт терагерцовый диапазон, является что **новым** и труднодостижимым другими коллективами **научным результатом**. А с учетом проведенного теоретического анализа и расчета механизмов пробоя и распространения разряда, наблюдавшегося в эксперименте в терагерцовом диапазоне частот, работа имеет большую **научную значимость**.

Структура диссертации является логичной и четкой, что позволяет увидеть постановку научной задачи, ее специфику, методы исследования и выводы из полученных результатов в их взаимосвязи и **внутреннем единстве**. Диссертация занимает 137 страниц, содержит 90 рисунков и состоит из Введения, двух глав, Заключения, списка основных публикаций диссертанта и списка цитируемой литературы из 91 наименования.

Во **введении** Алексей Павлович обосновывает актуальность, новизну и практическую значимость исследования, приводит основные положения, выносимые на защиту. А приведенный краткий литературный обзор раскрывает причины возможного отличия пробоя и распространения разряда в пучках излучения исследуемого терагерцового диапазона частот от уже исследованных разрядов гигагерцового и оптического диапазонов.

В **главе 1** описаны использованные экспериментальные установки на основе гиротронов (0,250 ТГц, 0,263 ТГц, 0,67 ТГц, 2,3 ТГц) с геометрией ввода излучения, мощностями (плотностями мощности, напряженностью поля) и длительностями, а также Новосибирский лазер на свободных электронах и специально подготовленная пользовательская станция. Также в главе 1 приведены результаты по пробую атомарных (аргон, криптон, ксенон) и молекулярных (воздух, азот, кислород, углекислый газ) газов на данной установке при варьировании мощности плотности мощности излучения и давления, что позволило построить пробойные кривые. Завершает главу рассмотрение механизмов рождения и гибели заряженных частиц в использованных атомарных и молекулярных газах с расчетом пробойной кривой (также для коротких импульсов < 1 мкс) и ее сравнение с полученной в эксперименте. В случае расхождения расчетных кривых от эксперимента даются аргументированные предположения о причинах.

В **главе 2** приводятся результаты экспериментов по исследованию скоростей распространения разряда в пучках излучения терагерцового диапазона частот в зависимости до мощности излучения и давления (атомарные и молекулярные газы). Для этого применялись коллимированные фотодетекторы, электронно-оптическая камера, сверхскоростная камера. Обнаружено резкое изменение скорости фронта разряда при его распространении вдоль трассы пучка и переходе разряда из области пробойных в область допробойных напряженностей полей. Рассматривая известные для СВЧ и оптического диапазонов механизмы распространения разряда (светодетонационная волна, медленное горение, волна без потерь, волна с потерями, волна пробоя, волна диффузии, фотоионизационный и другие) диссертант приходит к выводам, что экспериментальные результаты в аргоне (скорости порядка 10^6 - 10^7 см/с) хорошо совпадают с расчетом скоростей распространения разряда для механизма ионизационно-диффузионной волны, а для молекулярных газов (скорости порядка 10^4 - 10^5 см/с) результат описывается механизмом медленного горения.

В **Заключении** Веселов А.П. кратко подводит итоги работы и акцентирует внимание на важность результатов для практического применения разряда в терагерцовом диапазоне

частот для создания источников экстремального ультрафиолетового излучения для установок литографии.

Наиболее значимыми научными результатами диссертационной работы являются:

- 1) Получение в эксперименте пробойных кривых для разряда в терагерцовом диапазоне частот для атомарных (аргон, криптон, ксенон) и молекулярных газов (воздух, азот, кислород, углекислый газ).
- 2) Установление в эксперименте величин скорости распространения разряда в пучках излучения терагерцового диапазона частот в широком диапазоне давлений и напряженностей электрического поля волны, а также установление механизмов распространения разряда по сравнению с расчетом в рамках известных моделей.

Заявленные диссертантом **положения, выносимые на защиту**, полностью раскрыты в диссертации и представлены в опубликованных научных статьях.

К работе имеется ряд **вопросов и замечаний**:

1) В диссертации во введение упоминается работа японской научной группы (Fukunagi M. и соавторы) с использованием гиротрона 303 ГГц как источника излучения для исследования пробоя воздуха, а по классификации, приведенной диссертантом, это тоже попадает в ТГц диапазон. Поэтому вызывает сожаление отсутствие анализа, какие механизмы распространения разряда могли быть в эксперименте японской группы и совпадают ли они с собственными результатами диссертанта.

2) В работе было использовано несколько уникальных источников мощного излучения терагерцового диапазона частот (0,250, 0,263, 0,67, 1, 2,3 ТГц). Однако при исследовании пробоя газов и получении пробойных кривых выбранный диапазон давлений, род рабочего газа, плотность мощности излучения (напряженность электрического поля волны), длительность импульса излучения, наличие/отсутствие предионизации не были однообразны для каждого источника излучения, что упростило бы получение зависимостей процессов пробоя от частоты излучения в ТГц диапазоне.

3) В диссертации присутствует такое утверждение: *«Для осуществления газового пробоя принято использовать СВЧ генераторы, однако минимум пробойной кривой по давлению, в случае частот порядка единиц ГГц, лежит в области нескольких торр. Плотность плазмы, и как следствие излучательная способность плазмы, оказываются недостаточной для применения его в промышленных литографических установках.»*

Не совсем ясно, что мешает использовать ГГц источники излучения при больших давлениях газа, нарастив плотность мощности излучения?

4) «По теме диссертации опубликовано 24 работы, из которых 7 статей по теме диссертации в журналах, рекомендованных ВАК, 5 публикаций в рецензируемых журналах, 12 публикаций в сборниках трудов конференций»

Вызывает вопрос почему утверждается, что 7 публикаций в журналах, рекомендованных ВАК, но при этом только 5 публикаций в рецензируемых журналах, когда в требованиях ВАК к публикациям указано, что они должны быть в рецензируемых журналах.

5) Для формулы баланса энергии на стр.55 диссертации не дается по тексту пояснения, что означает частота ν_e

б) В диссертации представлено большое количество формул (проведен большой объем работы по описанию механизмов пробоя и распространения разряда), которые, видимо, брались из множества источников. Однако, формулы не приведены к единообразию обозначений — одни и те же физические величины имеют разное обозначений в разных местах диссертации (v_{eff} — v_m эффективная частота соударений, N_0 — N_a концентрация нейтральных атомов, u_i — I_i энергия ионизации).

7) По тексту диссертации в расчетах начальная концентрация электронов (вследствие влияния радона, космических лучей) берется то 10 см^{-3} (С.69), то 100 см^{-3} С.116.

Представленные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Веселова А.П.

Достоверность и обоснованность полученных результатов не вызывает сомнений — методы регистрации факта пробоя и скорости распространения разряда, как и специфика их применения, подробно представлены в тексте диссертации. Полученные в экспериментах пробойные кривые укладываются в текущее представление о пробое газа, при этом приводится сравнение с расчетными кривыми, которые в большинстве оказываются близки к экспериментальным. На достоверность результатов также указывает большое число опубликованных работ (7 статей по теме диссертации) в уважаемых специалистами журналах и широкое представление результатов работы на всероссийских и международных конференциях.

Диссертация Веселова Алексея Павловича представляет **самостоятельное и целостное исследование**, демонстрирующее профессионализм автора и соответствие его знаний и навыков высоким требованиям, предъявляемым к учёным, достаиваемым степени кандидата физико-математических наук. **Автореферат** полностью отражает содержание диссертации.

Работа Веселова А.П. полностью **удовлетворяет всем требованиям** к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата наук, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор Веселов Алексей Павлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. — «Физика плазмы».

Диссертационная работа была представлена Веселовым А.П. и обсуждалась на заседании № 479 ученого совета отдела физики плазмы ИОФ РАН 7 мая 2024 года.

Отзыв составил старший научный сотрудник отдела физики плазмы ИОФ РАН, кандидат физико-математических наук Борзосексов В.Д.

Старший научный сотрудник ИОФ РАН,
кандидат физико-математических наук _____ Борзосексов В.Д.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр "Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук" (ИОФ РАН)

119991, ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38

Телефон +7 (499) 503-8734 (канцелярия, общая справочная информация)

office@gpi.ru