

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Веселова Алексея Павловича на тему: «Пробой газа в сфокусированных пучках электромагнитных волн субмиллиметрового диапазона», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – Физика плазмы

Тематика диссертации связана с новой и интенсивно развиваемой областью физики газовых разрядов и физики плазмы, а именно, с изучением процессов в плазме, создаваемой терагерцовым излучением. Терагерцовый диапазон частот расположен между традиционным СВЧ и ИК диапазонами. Возможность его исследования во многом связана с созданием мощных источников излучения (лазеры на свободных электронах и гиротроны), что позволило использовать их для создания плазмы. Несмотря на то, что, как и в указанных выше диапазонах, плазма создается переменными электромагнитными полями, перенесение и прогнозирование свойств плазмы терагерцового разряда с помощью богатого материала, полученного в других частотных диапазонах, представляется затруднительным. Поэтому нужны исследования, особенно экспериментальные, именно в терагерцовом диапазоне. Кроме того, ожидается, что этот диапазон длин волн открывает перспективы для решения различных прикладных задач. Диссертация Веселова А.П. посвящена исследованию пробойных явлений в газах и распространению разряда, генерируемого источниками терагерцового диапазона длин волн. Эта проблематика практически не изучена. Тема диссертационной работы является **актуальной**.

### **Структура и содержание работы.**

Диссертация состоит из введения, двух глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 137 страниц, включая 90 рисунков и 3 таблицы. Список литературы содержит 91 наименование.

Во **Введении** дан краткий обзор по тематике диссертации, сформулированы общие положения диссертации, такие, как актуальность работы, научная новизна, практическая значимость, цели исследования, задачи исследования, апробация работы, опубликованные работы, положения, выносимые на защиту. Автор внес основной вклад в постановку задач, в подготовку и проведение экспериментов, обработку и интерпретацию результатов.

Раздел принципиально важен, поскольку определяет актуальность задач диссертации и место исследований автора в общем контексте исследований в этой области.

**Первая глава** содержит описание результатов исследования пробоя газов под действием терагерцового излучения.

Достаточно подробно описаны экспериментальные установки с несколькими гиротронами, имеющими разную частоту выходного излучения (0.250, 0.263, 0.670, 1.0 ТГц). Кроме того, часть экспериментов проводилась на установке в Новосибирске на лазере на свободных электронах (ЛСЭ) с частотой излучения 2,3ТГц. Исследования проводились, как в непрерывном, так и импульсном режиме работы генераторов. В ряде случаев для облегчения условий пробоя использовался инициатор с искровым разрядом. Так, источник предплазмы использовался в экспериментах на частоте 0.263 ТГц. Эксперименты по пробоям проводились в аргоне, криптоне, ксеноне, кислороде, азоте и воздухе.

В главе приведены результаты по пробоям различных газов при использовании различных генераторов излучения (определены пороговые давления, пороговые мощности).

Часть главы посвящена теоретическому описанию пробоя. Прежде всего рассмотрены физические процессы, определяющие пробой (нагрев электронов полем в

присутствии столкновений, ионизация тяжелых частиц электронным ударом, Пеннингская ионизация, диффузионная гибель электронов, неупругие потери энергии электронов, прилипание и отлипание электронов, роль первичных электронов).

В главе также приводятся результаты расчетов пробивной напряженности электрического поля в сильных и умеренных полях и при малой мощности, а также сопоставление с результатами измерений. В сильных полях наблюдается хорошее совпадение результатов. Проведены эксперименты и расчеты по пробое смеси гелий-аргон, в которой существенна пеннингская ионизация.

Отдельный раздел главы посвящен пробоем в молекулярных газах (кислород, азот). Приводятся результаты экспериментов и расчетов.

Результаты главы свидетельствуют о проведении большой исследовательской экспериментальной работы, которые, во многом впервые, позволили получить информацию о пробое электромагнитным излучением терагерцового диапазона длин волн.

**Глава 2** содержит описание результатов, полученных при исследовании распространения разряда в пучках волн терагерцового диапазона. Описаны стенды для изучения распространения разряда с гиротронами на частотах 0.263, 0.250, 0.670 ТГц и методы диагностики. Для измерения скорости распространения разряда использовались фотодетекторы в видимой области спектра, а также с помощью электронно-оптической камеры, по мгновенным снимкам сверхскоростной камеры,

Скорость распространения была измерена для газов Ar, Kr, смеси He-Ar, азота, воздуха, кислорода в широком диапазоне давлений существования разряда. В частности было показано, что существуют области быстрого и медленного распространения разряда. Это связывается с переходом фронта разряда из области пробойных в область допробойных полей.

Отдельный раздел главы посвящен теоретическому рассмотрению распространения разряда. Для того, чтобы понять отличие терагерцового диапазона длин волн рассмотрено распространение разряда в смежных диапазонах частот, а именно, в оптическом диапазоне и традиционном СВЧ диапазоне. Большое внимание уделено механизмам распространения оптического разряда.

Рассмотрено распространение разряда в пучках волн с частотами близких к ТГц диапазону.

Диссертация не свободна от недостатков. Ниже приводятся некоторые из возникших замечаний.

#### **Замечания.**

1. В разделе цели и задачи исследования не указаны газы, в которых будут проводиться исследования.
2. Почему для характеристики пучка с гиротроном 0.263 ТГц (Напр. Рис. 4) выбрано расстояние 237 мм от окна гиротрона?
3. Автор использует понятие эффективного электрического поля. Строго оно может быть введено только для случаев, когда частота столкновений электронов с тяжелыми частицами не зависит от скорости. Для большинства газов это не выполняется. Эта проблема в тексте не обсуждается.
4. В ряде случаев для облегчения пробоя использовался искровой разряд. Но в этом случае это уже инициированный пробой, а не пробой газа в чистом виде (пробивные поля уменьшаются). В этом случае пробивная напряженность зависит от инициатора. Говорится, что основным каналом влияния является изменение характера диффузии, а не присутствие избыточных электронов. Следовало бы получить результаты по пробоем при разных параметрах искрового разряда (предплазмы), или привести обоснование этого положения.
5. Представляется, что при сопоставлении результатов расчетов и измерения зависимости пробивной напряженности от давления в умеренных полях автор

излишне оптимистичен. Он пишет «Полученные в результате расчёта пробойные кривые дали хорошее совпадение с экспериментальными данными не только по величине пробойных полей, но и по положению минимума кривых». Хотя, если посмотреть на результаты, приведенные на рисунке 36 для аргона, совпадение пробивных напряженностей довольно плохое (в области минимума это практически порядок величины). То же можно сказать и о рисунке 48, где по словам автора результаты подтверждают предположение об амбиполярной диффузии, тогда как, судя по рисунку, что они в равной мере соответствуют и свободной диффузии.

6. При описании пробоя в молекулярных газах используется слишком упрощенная схема процессов, в то же время в настоящее время разработаны детальные схемы кинетических процессов в газовых разрядах. Причина такого упрощения не обсуждается.
7. Текст излишне краток и многие детали эксперимента остались не описанными. Так, скорость распространения разряда определялась по сигналам фотодетекторов. Не написано, она определялась по началу регистрации светового сигнала, или по его максимуму? В ряде случаев для определения времени начала разряда использовался фотодетектор. Хорошо бы указать его характеристики, поскольку именно он является временным репером. Скорость распространения разряда определялась по снимкам, сдвинутым относительно импульса напряжения гиротрона. Не обсуждается, какую погрешность в определение скорости вносит неопределенность момента зажигания разряда относительно импульса напряжения.

Отмеченные замечания не снижают достоверности и важности полученных в диссертации результатов.

Автором выполнен большой объем работ, связанный с исследованием ряда нерешенных задач пробоя газов и распространением разряда в электромагнитных полях терагерцового диапазона длин волн.

**Новизна** представленных в диссертации результатов не вызывает сомнений и большинство результатов получено впервые.

Результаты диссертации докладывались на российских и международных конференциях и представлены в 7 публикациях в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

**Результаты диссертационной работы могут использоваться** в исследовательских, проектных и конструкторских организациях, работающих в области физики и применения низкотемпературной плазмы (ОИВТ РАН, ИОФ РАН, ИСЭ РАН, МРТИ РАН, ИНХС РАН, МГУ, МГТУ, К(П)ФУ, КНИТУ, ИГХТУ, МИФИ и др.).

Диссертация Веселова А.П. является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решены важные задачи, связанные с исследованием пробоя газа пучками электромагнитных волн субмиллиметрового диапазона и распространения терагерцового разряда. Задачи и содержание работы отвечают паспорту специальности 1.3.9 – Физика плазмы.

Диссертационная работа Веселова А.П. отвечает критериям пункта 9 "Положения о порядке присуждения ученых степеней", утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – Физика плазмы.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Официальный оппонент  
главный научный сотрудник,

И.О. Зав. лабораторией "Плазмохимии и физикохимии  
импульсных процессов" ИНХС РАН,  
доктор физико-математических наук

Юрий Анатольевич Лебедев

Сведения о составителе отзыва:

Лебедев Юрий Анатольевич, доктор физико-математических наук, специальность по которой присуждена степень 01.04.08-Физика плазмы, почтовый адрес: 119991, Москва. Ленинский проспект, 29, тел.: 8(495) 6475927 доб. 322, адрес электронной почты: [lebedev@ips.ac.ru](mailto:lebedev@ips.ac.ru), наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук (ИНХС РАН), должность: главный научный сотрудник, И.О. заведующего лабораторией.

Подпись доктора физико-математических наук Лебедева Юрия Анатольевича заверяю.

Ученый секретарь ИНХС РАН  
доктор химических наук

Ю.В. Костина

