

ОТЗЫВ

официального оппонента
кандидата технических наук Савкина Константина Петровича
на диссертацию **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»
в диссертационный совет **24.1.238.01** на базе
Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук.

Разряд, инициируемый и поддерживаемый полями электромагнитных волн терагерцового диапазона частот, является привлекательным с точки зрения, как фундаментальных, так и прикладных исследований. Не смотря на кажущееся сходство с оптическим и СВЧ-разрядами, терагерцовый разряд обладает присущей ему спецификой и требует отдельного теоретического описания. Диссертация Веселова А.П. посвящена изучению особенностей пробоя и распространения разрядов в пучках электромагнитных волн субмиллиметрового диапазона.

Актуальность исследования терагерцового разряда состоит в том, что до последнего времени эксперименты по взаимодействию мощного излучения указанного частотного диапазона с газовыми мишенями не проводились в связи с малой эффективностью как квантовых, так и классических генераторов. Применение данного излучения для создания и поддержания плотной плазмы является достаточно новым подходом, по сравнению с широко распространенным, основанным на создании при помощи мощного инфракрасного излучения, генерируемого CO_2 – лазером, плазменного филамента, излучающего в терагерцовом диапазоне. Актуальность работы также обусловлена необходимостью дальнейшего развития физических методов генерации плазмы с целью выявления новых особенностей, связанных с динамикой разряда в малоисследованном частотном диапазоне, откуда следуют отличия от уже изученного СВЧ-разряда в плотности генерируемой плазмы, соотношениях характерных пространственных размеров неустойчивостей и т.д. Например, соотношение между длиной волны и пространственным масштабом неустойчивости, так же зависит от ряда параметров и может существенным образом изменяться при переходе от одного частотного диапазона к другому.

Формирование новой области знаний в физике газового разряда, поддерживаемого излучением электромагнитных волн терагерцового диапазона частот, стала возможной во втором десятилетии XXI века, что связано с существенным прогрессом в создании

мощных источников излучения киловаттных уровней мощностей – гиротронов и лазеров на свободных электронах.

Достаточно полной теоретической модели высокочастотного разряда, учитывающей в настоящее время не существует. Создание таковой позволит систематизировать результаты по пробоям во всех частотных диапазонах, дополнит существующие теории и будет способствовать формированию единого физического понимания процессов инициирования и функционирования газового разряда в пучках электромагнитного излучения.

Диссертация состоит из введения, двух глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объём работы – 137 страниц, включая 90 рисунков, 3 таблицы и список литературы, состоящий из 91 наименования.

Во **Введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются цели, перечислены положения, выносимые на защиту, обосновывается научная новизна и практическая ценность работы.

В **Главе 1** приведено описание установок для изучения условий возникновения разряда, изложены основные процессы, определяющие динамику развития электронной лавины. На их основе, приведена общая теория пробоя газов в переменных электромагнитных полях высоких частот. Решение уравнений, описывающих функцию распределения электронов, в общем виде, усложняется большим количеством кинетических процессов. Однако в некоторых случаях описание пробоя можно заметно упростить. Например, в случае пробоя инертных газов импульсами длительностью 75 пс характерные напряжённости полей ТГц излучения достигают порядка 1 МВ/см, что соответствует осцилляторной энергии электрона порядка 2 эВ. Вследствие этого электроны практически не совершают неупругих столкновений с нейтральными молекулами при нагреве от энергии возбуждения до энергии ионизации. В этом случае возбуждениями нейтралов можно пренебречь.

В работе так же показано, что при описании пробоя тяжёлых инертных газов в умеренных полях ТГц излучением больших длительностей, также как в СВЧ и ИК диапазонах, возможно применение теории Райзера Ю.П. В этом случае характерные величины осцилляторных энергий электронов составляют порядка 0.1 эВ, и от энергии возбуждения до энергии ионизации электроны совершают большее количество столкновений, и с большой вероятностью испытывают неупругие взаимодействия с нейтральными атомами. В данном случае расчёт пробойного поля заметно усложняется, и необходимо находить стационарную функцию распределения с учётом возбуждений,

пренебрегая потерей энергии электронов на упругие соударения из-за большой массы нейтралов.

В диссертационной работе обсуждается пробой газов в результате воздействия ТГц-излучения малой мощности. В этом случае для инициирования разряда использовался ряд экспериментальных условий, облегчающих пробой рабочего газа: специфические смеси газов, локальное усиление электрического поля, предварительная ионизация. Показано что в случае применения гелия с добавкой аргона энергетический порог пробоя существенно снижается из-за эффекта Пеннинга. Размещение металлической пластины в области перетяжки пучка создаёт структуру стоячей волны вблизи поверхности металла, таким образом наблюдается локальное увеличение электрического поля, при прочих неизменных параметрах. Создание предварительной плазмы вспомогательного искрового разряда, вблизи перетяжки пучка, также существенно снижало порог пробоя. В этом случае в плазме амбиполярная диффузия заряженных частиц преобладала над свободной диффузией электронов, в результате чего снижались потери электронов вследствие свободной диффузии.

В **Главе 2** приведены экспериментальные данные по распространению разряда в пучках волн ТГц диапазона частот и даны теоретические объяснения полученных зависимостей.

В первой части главы, описываются методики измерения скорости фронта с помощью камеры фотоэлектронной развёртки (ФЭР) и камеры с наносекундной выдержкой кадра Nanogate24. Камеры были расположены перпендикулярно направлению распространения разряда. В ходе экспериментов было получено, что скорость распространения в инертных газах составляет порядка 10^5 - 10^7 см/с. Показано, что для всех газов скорость фронта спадает с увеличением давления, а скорость фронта разряда тем больше, чем легче газ. Скорость распространения в смеси He-Ar составила 10^7 см/с, в то время как в криптоне, газе имеющему вдвое меньшую энергию ионизации, скорость оказалась существенно меньше - $5 \cdot 10^5$ - 10^6 см/с.

Во второй части представлено описание динамики распространения ТГц разряда. Показано, что характерное время развития разряда в прифронтной области за счёт наличия сильного отражения падающего греющего излучения от слоя плазмы с концентрацией плазмы на уровне критической для данной частоты излучения сравнимо с характерным временем диффузии на расстояния равное четверти длины волны. Тем самым, для широкого диапазона давлений в терагерцовом разряде реализуется случай ионизационно-диффузионной волны, который не характерен для других частотных диапазонов.

В **Заключении** представлены основные результаты диссертационной работы.

Достоверность и **новизна** защищаемых научных положений подтверждается следующими результатами.

1. Работа была выполнена на уникальных установках, имеющих в своём составе мощные источники излучения, такие как гиротроны и лазер на свободных электронах, с частотами выходного излучения, перекрывающими весь терагерцовый диапазон.

2. Впервые экспериментально исследованы процессы пробоя газов и функционирование разрядов, поддерживаемых излучением с частотами 0.25 ТГц, 0.263 ТГц, 0.67 ТГц, 1 ТГц и 2.3 ТГц в широком диапазоне давлений.

3. Показано, что в случае применения терагерцового излучения с мощностью уровня несколько сотен киловатт потери энергии электронов на возбуждение нейтралов являются минимальными вследствие больших величин осцилляторных энергий и высокой скорости набора энергии до потенциала ионизации и более. Это было подтверждено хорошим совпадением пробойных полей уровня 1 МВ/см, полученных в результате теоретических оценок, и зарегистрированных экспериментально с применением излучения частотой 2.3 ТГц, при длительности импульса 100 пс.

4. Экспериментально исследована динамика распространения разряда, инициируемого и поддерживаемого пучками терагерцового излучения с частотой 0.25 ТГц и 0.67 ТГц. При напряженности электрического поля ниже уровня достаточного для пробоя, распространение волны ионизации происходит при поглощении в газе ультрафиолетового излучения, испускаемого плазмой разряда. При напряженности электрического поля на уровне достаточном для пробоя и более, распространение фронта плазмы терагерцового разряда удовлетворительно объясняется теорией оптического разряда в режиме медленного горения.

5. Продемонстрировано, что при давлениях свыше 100 Торр скорость распространения разряда в инертных газах спадает с увеличением давления и находится в обратной зависимости молярной массы газа.

Обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждается корректным анализом и объясняется на основе известных представлений о физике газового разряда. Дополнительным подтверждением является достаточное количество статей Веселова Алексея Павловича в ведущих международных рецензируемых научных журналах.

Тем не менее имеется ряд **замечаний**.

1. На стр. 27 при описании экспериментальной установки на основе Новосибирского лазера на свободных электронах перечисляются параметры электронного

пучка: «Пучок, генерируемый электронной пушкой с горячим катодом, имеет заряд около 1 нКл, длительность 1.5 нс, максимальной частотой повторения 90 МГц и энергию на выходе 300 кэВ». Применительно к источникам заряженных частиц следует указывать основные параметры пучка, по которым можно оценить его энергетические характеристики. Среди них важно указать импульсный ток пучка. Если форма импульса отличная от прямоугольной, то приводится осциллограмма импульса тока или ссылка на источник, где она представлена. Интегрируя зависимость тока от времени возможно оценить заряд, переносимый током пучка за импульс.

2. Зависимости скорости распространения разряда от вида рабочего газа и его давления исследовались при регистрации интегральной плотности светового потока из плазмы (стр. 76, рис. 54). Вместе с тем, значительный интерес представляют возможные зависимости скорости распространения плазмы от длины волны генерируемого этой плазмой излучения, которые очевидно не были исследованы.

3. В работе не приводятся описание систем газового питания экспериментальных установок, а именно, нет информации о методах обеспечения остаточного давления в рабочих камерах, расходе и степени чистоты рабочих газов; не представлены результаты о предварительной калибровке фотодетекторов и определения временной постоянной этих приборов, применяемых для измерения скорости плазменного фронта; отсутствуют данные об исследовании оптических эмиссионных спектров излучения разрядной плазмы при различных условиях горения разряда.

Тем не менее, указанные замечания носят рекомендательный характер и не снижают качество данной работы в целом.

Все разделы диссертации были представлены на нескольких международных конференциях по физике плазмы, обсуждались на научных семинарах в ИПФ РАН и были опубликованы в рецензируемых журналах.

Текст автореферата соответствует содержанию диссертации.

Диссертация Веселова Алексея Павловича на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является научно-квалификационной работой, обладающей научной новизной и содержащей научные положения, имеющие существенное значение для физики газового разряда. Результаты данной диссертационной работы могут служить основой при разработке точечного источника экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения, что является приоритетной задачей по созданию современного отечественного литографа.

Диссертационная работа Веселова А. П. отвечает критериям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства

Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – «Физика плазмы».

Сведения о составителе отзыва:

Савкин Константин Петрович, без ученого звания, кандидат технических наук, специальность 01.04.04 - «Физическая электроника», адрес почты: savkin@oree.hcei.tsc.ru, телефон: +79138568357, наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН), почтовый адрес: 634055, Томск, просп. Академический, 2/3.


(подпись)

Савкин К.П.

13.05.2024

Подпись кандидата технических наук Савкина К. П. заверяю

Ученый секретарь ИСЭ СО РАН
канд. техн. наук



Крысина О.В.