

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Сорокина Дмитрия Алексеевича
«Оптические свойства плазмы высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого
убегающими электронами, и ее применение»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 01.04.05 – Оптика.

Актуальность работы. Газоразрядная низкотемпературная плазма является основой большинства различных технических устройств и технологических процессов. Для ряда практических приложений представляет интерес активная неравновесная низкотемпературная плазма, формируемая в результате возбуждения электрическим разрядом газов при высоких давлениях. Одним из способов формирования плотной неравновесной низкотемпературной плазмы является объемный импульсный разряд с внешней предьонизацией. Альтернативным способом создания плотной диффузной неравновесной низкотемпературной плазмы является высоковольтный наносекундный разряд, инициируемый убегающими электронами (ВНРУЭ), исследования которого успешно выполняются в ИСЭ СО РАН под началом профессора Тарасенко В.Ф.

Характерной особенностью самостоятельного разряда данного типа является возможность создания стабильной диффузной плазмы при высоких давлениях атомарных и молекулярных газов (в том числе и тяжелых инертных газов), а также их смесей. Выполнено много работ, посвященных исследованию способов и условий формирования, режимов и характеристик горения ВНРУЭ, а также свойств пучка убегающих электронов и рентгеновского излучения, генерируемых в этих условиях. Однако свойства плазмы, формируемой при возбуждении плотных газов ВНРУЭ, изучены явно недостаточно. А это необходимо для определения возможного круга применений такой плазмы. Поэтому работа Сорокина Д.А., направленная на изучение оптических свойств плазмы, формируемой в газонаполненных промежутках при зажигании высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами (ВНРУЭ), и ее практическое использование, является безусловно актуальной.

В качестве сред для исследований интересными являются инертные газы повышенного давления, при импульсном возбуждении которых эффективно образуются гомоядерные димеры, испускающие кванты света с высокой энергией. Такие среды при возбуждении могут быть активными, перспективными для создания лазеров ВУФ-диапазона. Основу активной среды таких лазеров составляют гомоядерные димеры Ar_2^* , Kr_2^* , Xe_2^* , излучающие на длинах волн $\lambda = 126, 146$ и 172 нм, соответственно. Исследованию плазмы в этих средах посвящена работа Сорокина Д.А.

Несомненно, актуальной является проблема получения коротких, наносекундной длительности потоков нейтронов. Поэтому безусловно полезны любые исследования, направленные на решение этой проблемы. Тем более интересен предлагаемый в настоящей работе подход, основанный на инициировании реакции $d(d,n)^3He$ (DD-реакция) без участия трития.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 185 страницах машинописного текста, включающих 81 рисунок и 4 таблицы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, в том числе трех с результатами оригинальных исследований, заключения, одного приложения и списка литературы, содержащего 170 библиографических ссылок.

Содержание диссертации. Во введении показана актуальность направления исследований, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе представлен обстоятельный обзор известных публикаций по теме работы. Приведены основные характеристики низкотемпературной плазмы, описаны основные способы создания неравновесной низкотемпературной плазмы. Достаточно подробно изложена существующая информация о высоковольтном наносекундном разряде, инициируемым убегающими электронами.

Во второй главе диссертации представлено описание используемых экспериментальных стендов и методов измерений, в том числе, подробно экспериментальной установки и методов исследования оптических свойств плазмы высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в бинарных смесях инертных газов; экспериментальной установки для получения нейтронов из плазмы высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами в дейтерии низкого давления и методов определения выхода и длительности нейтронного потока. Описаны метод определения температуры электронов и приведенной напряженности электрического поля, определения параметров плазмы высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами.

Третья глава диссертации содержит описание результатов измерений концентрации электронов в плазме гелия и аргона, формируемой в моноимпульсном режиме; динамики электронной плотности в плазме аргона, формируемой импульсно-периодическим высоковольтным наносекундным разрядом, инициируемым убегающими электронами; параметров плазмы, формируемой при высоковольтном наносекундном разряде, инициируемом убегающими электронами, в азоте атмосферного давления в импульсном и импульсно-периодическом режимах.

В четвертой главе представлено описание результатов исследования узкополосного излучения в вакуумной ультрафиолетовой спектральной области плазмы бинарных смесей инертных газов He-Xe и Ar-Xe при возбуждении высоковольтным наносекундным разрядом, инициируемым убегающими электронами. Показана возможность получения усиления плотности потока излучения плазмы высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в смеси Ar-Xe.

В пятой главе представлены результаты изучения наносекундных нейтронных потоков при зажигании высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в дейтерии низкого давления. Приведены характеристики потоков нейтронов при использовании дейтерированного электрода, мишени, не обогащенной дейтерием или тритием. Показано, что при зажигании высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, имеет место генерация потока нейтронов в результате DD-реакции.

Анализ научных положений, вынесенных на защиту

1. Концентрация электронов в плазме диффузного разряда, формируемой при возбуждении гелия при давлении 1 – 6 атм. и аргона при давлении 0,5 – 2 атм. однократными импульсами напряжения амплитудой 250 кВ, длительностью на полувысоте 2 нс и длительностью нарастания 0,5 нс в промежутке с плоским заземленным электродом и потенциальным электродом с радиусом кривизны десятки-сотни мкм, изменяется в диапазонах $(1,8 - 5,7) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $(0,4 - 2,7) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, соответственно. Плотность электронов в плазме диффузного импульсно-периодического разряда в аргоне атмосферного давления, формируемой в промежутке с плоским заземленным электродом и потенциальным электродом с радиусом кривизны десятки-сотни мкм, импульсами напряжения амплитудой 50 кВ, длительностью на полувысоте (4 – 5) нс и длительностью нарастания (2 – 3) нс с частотой следования 2 кГц, составляет $\sim 6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

2. Электронная концентрация, приведенная напряженность электрического поля, а также электронная, колебательная, вращательная и газовая температуры в плазме диффузного разряда в азоте атмосферного давления, возбуждаемого однократными импульсами напряжения амплитудой 250 кВ, длительностью на полувысоте 2 нс и длительностью нарастания 0,5 нс в промежутке с плоским заземленным электродом и потенциальным электродом радиусом кривизны десятки-сотни мкм, составляют $\sim 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, 240 Тд, 23200 К (2 эВ), 3000 К, 350 К и 380 К, соответственно. Концентрация и температура электронов, а также приведенная напряженность электрического поля в плазме диффузного импульсно-периодического разряда в азоте атмосферного давления, возбуждаемого импульсами напряжения амплитудой 50 кВ, длительностью на полувысоте (4 – 5) нс и длительностью нарастания (2 – 3) нс, следующих с частотой 2 кГц в промежутке с плоским заземленным

электродом и потенциальным электродом с радиусом кривизны десятки-сотни мкм, составляют $\sim 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, 23200 К (2 эВ) и 270 Тд.

Первое и второе защищаемые положения основаны на результатах прямых экспериментальных измерений с использованием стандартного метода штарковского уширения для определения Ne в плазме, известных методов, применяемых для определения Te , Tv , Tr , Tg и E/N в плазме. Для измерений использовались спектральная и время разрешающая техника с высоким спектральным (до 0,26 Å) и временным (до 3 нс) разрешением системы регистрации спектральных и временных характеристик излучения. Показано совпадение (до $\sim 20\%$) значений измеряемых величин при использовании различных методов. Поэтому сформулированные первое и второе защищаемые положения, представляющие собою совокупность характеристик исследуемой плазмы, являются достаточно хорошо обоснованными.

3. Возбуждение бинарных смесей инертных газов He-Xe и Ar-Xe с содержанием ксенона 0,1 – 1 % однократными импульсами напряжения амплитудой 250 кВ, длительностью 2 нс и длительностью нарастания 0,5 нс в промежутке с потенциальным катодом радиусом кривизны десятки-сотни мкм, приводит к появлению в диапазоне длин волн 140 – 150 нм (вблизи длины волны 147 нм) узкополосного излучения с полушириной $\Delta\lambda \leq 1 \text{ нм}$.

Защищаемое положение основано на результатах прямых экспериментальных измерений с использованием системы регистрации спектральных и временных характеристик излучения с высоким спектральным (до 0,26 Å) и временным (до 3 нс) разрешением. Сформулированное защищаемое положение, основанное на прямом измерении хорошо апробированных методов, является достаточно хорошо обоснованным.

4. Плазма, формируемая в результате возбуждения однократными импульсами напряжения амплитудой 250 кВ, длительностью на полувывсоте 2 нс и длительностью нарастания 0,5 нс бинарной смеси Ar-Xe при общем давлении 400 Торр и содержании ксенона 1 % в промежутке с лезвийными электродами, проявляет усилительные свойства по отношению к узкополосному излучению вблизи длины волны 147 нм.

Это положение основано на результатах прямых измерений относительных значений плотности излучения плазмы в камере без и с отражающим зеркалом. Метод известный, хорошо проверенный. Обнаруженное трехкратное увеличение относительного значения плотности излучения при использовании в схеме отражающего зеркала является достаточно убедительным доказательством существования усиления потока излучения. К сожалению, в работе недостаточно подробно описаны детали проведения эксперимента и технических характеристик использованных оптических элементов в схеме (коэффициентов пропускания, отражения). У автора диссертации такие возможности для измерений есть.

5. При возбуждении дейтерия при давлении доли-единицы Торр импульсом напряжения амплитудой 250 кВ со скоростью нарастания $\sim 10^{13} - 10^{15} \text{ В} \cdot \text{с}^{-1}$ в промежутке с потенциальным анодом с радиусом кривизны десятки-сотни мкм и плоским катодом, обогащенным дейтерием, регистрируются импульсы нейтронов и рентгеновского излучения. Максимальный выход нейтронов в полный телесный угол в результате DD-реакции на дейтерированной мишени составляет $1,2 \cdot 10^4$ нейтронов за импульс. Длительность импульсов нейтронов и рентгеновского излучения составляет не более 1,5 нс и 0,8 нс, соответственно.

Основанием для этого защищаемого положения являются результаты прямых экспериментальных исследований с использованием стандартных методов для определения факта наличия нейтронов, величины выхода Nn и длительности нейтронного импульса tn ; высоким временным разрешением ($\sim 0,1 \text{ нс}$) системы регистрации параметров импульса возбуждения; высоким временным разрешением ($\sim 0,7 \text{ нс}$) системы регистрации импульсов нейтронов. Показано, что имеет место хорошая повторяемость результатов ($\sim 20\%$) в различных экспериментальных сериях, выполняемых при одинаковых условиях. Заключение сделано на основании усреднения по десяткам экспериментальных серий, состоящих не менее чем из 50 событий.

Новизна полученных результатов заключается в

- определении значений основных параметров плазмы ВНРУЭ в плотных газовых средах, зажигаемого в импульсном и импульсно-периодическом режимах;
- установлении структуры спектра ВУФ-излучения вблизи длины волны резонансного перехода атома Хе ($\lambda = 146,96$ нм) в плазме ВНРУЭ в бинарных смесях инертных газов Не-Хе и Ar-Хе при повышенном давлении;
- обнаружении усиления излучения вблизи $\lambda = 147$ нм в плазме, формируемой при возбуждении ВНРУЭ смеси Ar-Хе;
- в доказательстве возможности испускание нейтронов в результате DD-реакции при возбуждении высоковольтным наносекундным разрядом, инициируемым убегающими электронами, в дейтерии при давлении доли-единицы Торр.

Научная ценность работы заключается в

- определении значений параметров плазмы, необходимых для развития теории явления ВНРУЭ в плотных газовых средах, для описания кинетики процессов в плазме, формируемой в данных условиях возбуждения.
- обнаружении усилительных свойства плазмы, формируемой при возбуждении ВНРУЭ бинарной смеси инертных газов Ar-Хе, в отношении излучения вблизи длины волны $\lambda = 147$ нм;
- доказательстве возможности получения импульсов нейтронных потоков длительностью ~ 1 нс в результате DD-реакции при возбуждении дейтерия низкого давления ВНРУЭ;
- предположении о возможности получения нейтронного потока в результате DD-реакции при возбуждении дейтерия низкого давления ВНРУЭ из-за наличия схлопывающейся на оси ударной волны в разрядном промежутке.

Практическая значимость работы.

- Представленные сведения об основных параметрах (N_e , T_e , T_v , T_r , T_g и E/N) плазмы импульсного и импульсно-периодического ВНРУЭ в ряде газов при повышенном давлении необходимы в качестве справочных при дальнейших исследованиях этого вида плазмы и ее использования.
- Обнаруженное усиление потока ВУФ-излучения вблизи длины волны 147 нм в плазме ВНРУЭ в бинарной смеси Ar-Хе открывает возможность создания нового источника лазерного излучения ВУФ-диапазона спектра с электроразрядным способом накачки активной среды.
- Получение стабильного потока нейтронов с длительностью ~ 1 нс, испускаемых в результате DD-реакции, протекающей при возбуждении дейтерия низкого давления ВНРУЭ, является результатом, перспективным для создания импульсного источника нейтронов.

Достоверность полученных результатов работы и выводов обеспечивается использованием различных диагностических методов при проведении экспериментов, согласием с имеющимися данными других авторов, обоснованностью использованных теоретических зависимостей, допущений и ограничений, корректностью поставленных задач и согласованностью результатов теоретических исследований с экспериментальными данными. **Следует отметить тщательность автора диссертации в обосновании выбора методов экспериментальных исследований для решения поставленных задач, четком указании границ применения использованных методов, точности и ошибок измерений.**

Публикации автора диссертации. Материалы диссертации изложены в 40 научных работах, в том числе в 20 статьях в журналах, включенных в Перечень научных журналов, рекомендованных ВАК для публикации материалов диссертационных исследований, журналах, индексируемых Web of Science (12 статей), 1 монографии (соавтор в 2 главах) и в 19 публикациях в сборниках материалов международных и всероссийских научных конференций (из них 6 зарубежных конференций). Материалы работы обсуждались на 16 известных международных конференциях.

Содержание автореферата хорошо соответствует изложенным в диссертации материалам.

Имеются замечания по работе:

1. К сожалению, в работе недостаточно ясно описана методика измерения излучательных свойств плазмы (см. раздел «Исследование оптических свойств плазмы ВНРУЭ в бинарных смесях инертных газов» в параграфе 2.3 и 4.2 «Усилительные свойства плазмы

высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в смеси Ar-Xe». Поэтому есть сомнения в оценке значений потоков излучений при изменении геометрии камеры. Не приведены значения коэффициентов пропускания использованных образцов флюорита. Сказано, что кристаллы флюорита прозрачны до 120 нм. Но это прозрачность идеальных кристаллов. Прозрачность кристаллов флюорита очень сильно зависит от предыстории образца. Не описано, каким образом сопоставлялись результаты измерений при изменении геометрии экспериментальной ячейки.

2. В работе сказано, что длительность нейтронного потока, испускаемого в результате DD-реакции в плазме ВНРУЭ составило $\tau_n \sim 1,5$ нс, длительность импульса рентгеновского излучения, имеющего место в данных условиях возбуждения, которая составила $\tau_{X-Ray} \sim 0,8$ нс. Но на рис. 5.8, где приведены эти результаты явно видно, что длительность импульса рентгеновского излучения больше.

3. На стр. 160 утверждается, что возможна инжекция в разрядную область адсорбированных на поверхности катода атомов дейтерия, что проявляется во влиянии катода на эффективность генерации нейтронов. На мой взгляд инжекция дейтерия за наносекундные времена маловероятна. Да и количество инжестированных атомов не может быть заметным.

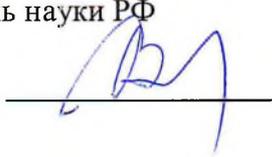
4. В работе значения давлений приведены в единицах «Торр», «атмосфера». Почему бы не использовать принятые единицы измерений «паскаль»?

5. Довольно много просто грамматических мелких ошибок. Например: Существенное отличие ВНРУЭ от объемного импульсного разряда заключается в отсутствии необходимости (стр.7). Следует отметить, что полученная в результате теоретических расчетов величина Nl по порядку величины совпадает со значением выхода нейтронов ($\sim 2 \cdot 10^2$ нейтронов за импульс), зарегистрированного(стр.159) и др.

Изложенные выше замечания по работе не снижают ценности полученных соискателем результатов и значимости диссертационной работы в целом.

С учётом сказанного выше считаю, что диссертация Сорокина Дмитрия Алексеевича «Оптические свойства плазмы высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, и ее применение» является законченной научно-исследовательской работой, удовлетворяющей требованиям пункта 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – Оптика.

Официальный оппонент – профессор кафедры лазерной и световой техники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», доктор физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика твердого тела, профессор, заслуженный деятель науки РФ



Лисицын Виктор Михайлович

15.11.2015 г.

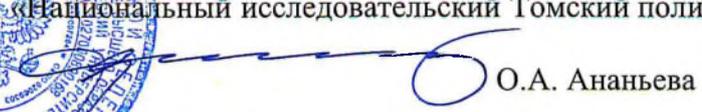
Тел.: +7 (3822) 419-831

E-mail: lisitsyn@tpu.ru

Подпись официального оппонента Лисицына В.М. заверяю:

Ученый секретарь

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»



О.А. Ананьева

Адрес: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 30

Сайт: www.tpu.ru