

УТВЕРЖДАЮ

Директор федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Института  
теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича Сибирского  
отделения Российской академии наук,  
доктор физико-математических наук,  
чл.-корр. РАН



Шишлюк Александр Николаевич

«16» октября 2015 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации

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 темы диссертационной работы

В настоящее время, газоразрядная низкотемпературная неравновесная плазма, формируемая при давлениях газовой среды порядка атмосферного и выше, является широко востребованной. Такой плазменный объект представляет интерес как с чисто научной, так и с практической точек зрения, так как может быть использован в качестве основы технических устройств и технологических процессов. Однако, создание такого плазменного состояния является сложной задачей.

Одним из способов создания плотной неравновесной низкотемпературной плазмы, описанным в диссертационной работе Сорокина Дмитрия Алексеевича является высоковольтный наносекундный разряд, инициируемый убегающими электронами, в атомарных и молекулярных газах и смесях. Его особенностью является возможность зажигания в диффузной форме при высоких давлениях, в том

числе и в тяжелых инертных газах, без использования внешних источников ионизирующего излучения для предварительной ионизации межэлектродного промежутка, которая может сохраняться на протяжении всего времени горения разряда. Диссертация Сорокина Дмитрия Алексеевича посвящена исследованию оптических свойств плазмы разряда данного типа, а также возможностей ее применения для решения практических задач. Данное обстоятельство обуславливает актуальность темы исследований, представленных в работе.

### **Основные научные результаты и их значимость для науки и производства**

При проведении исследований по теме диссертационной работы были получены следующие наиболее важные результаты:

- При помощи методов оптической эмиссионной спектроскопии измерены значения основных параметров (электронная концентрация  $N_e$ , электронная  $T_e$ , колебательная  $T_v$ , вращательная  $T_r$  и газовая  $T_g$  температуры, приведенная напряженность электрического поля  $E/N$ ) низкотемпературной плазмы импульсного и импульсно-периодического высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегаящими электронами, в ряде газов и смесей (He, Ar, N<sub>2</sub>, воздух, Ar-Xe, He-Xe) при повышенном давлении.
- Установлена природа ВУФ-излучения (вблизи длины волны  $\lambda = 147$  нм; формируется спектральными переходами гетероядерных димеров инертных газов) из плазмы импульсного высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегаящими электронами, в бинарных смесях инертных газов Ar-Xe и He-Xe, в которых ксенон содержался в виде небольшой добавки.
- Зарегистрированы усилительные свойства плазмы по отношению к излучению гетероядерных димеров инертных газов (вблизи длины волны  $\lambda = 147$  нм), формируемой при возбуждении импульсным высоковольтным наносекундным разрядом, инициируемым убегаящими электронами, смеси Ar-Xe при полном давлении 400 Торр и содержании ксенона  $\sim 0,1$  %.
- Получено испускание нейтронов в результате DD-реакции, инициируемой при возбуждении дейтерия низкого давления высоковольтным наносекундным разрядом, инициируемым убегаящими электронами, в промежутке с потенциальным анодом малого радиуса кривизны и плоским дейтерированным катодом. Измерены

максимальный выход  $N_n$  нейтронов и длительность нейтронного импульса, которые составили  $1,2 \cdot 10^4$  нейтронов за импульс и  $\sim 1,5$  нс, соответственно.

– Получен менее интенсивный ( $N_n \sim 2 \cdot 10^2$  нейтронов за импульс) выход нейтронов в результате DD-реакции инициируемой в плазме высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в дейтерии низкого давления в промежутке без электродов, обогащенных дейтерием или тритием.

**Научная ценность** диссертационной работы заключается в:

– Доказательстве возможности использования метода для определения электронной температуры  $T_e$  и приведенной напряженности электрического поля  $E/N$  в плазме высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в азоте атмосферного давления.

– Обосновании возможности использования метода определения газовой температуры в плазме высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в азоте атмосферного давления.

– Получении данных о значениях основных плазменных параметров ( $N_e$ ,  $T_e$ ,  $T_v$ ,  $T_r$ ,  $T_g$  и  $E/N$ ), представляющих ценность, как для создания теории явления высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в плотных газовых средах, так и для описания кинетики процессов в плазме, формируемой в данных условиях возбуждения.

– Уточнении спектральной структуры и установление природы ВУФ-излучения вблизи длины волны  $\lambda = 147$  нм из плазмы, формируемой в результате зажигания высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в бинарных смесях инертных газов.

– Обнаружении усилительных свойства плазмы высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в бинарной смеси инертных газов Ar-Xe, в отношении излучения вблизи длины волны  $\lambda = 147$  нм, что указывает на перспективность использования данного способа возбуждения для получения лазерной генерации на переходах гетероядерных димеров инертных газов в ВУФ-диапазоне спектра.

– Получении импульсов нейтронов и рентгеновского излучения с длительностью  $\sim 1$  нс и менее при возбуждении дейтерия низкого давления высоковольтным наносекундным разрядом, инициируемым убегаящими электронами, в промежутке с потенциальным анодом малого радиуса кривизны и плоским дейтерированным заземленным катодом.

– Получении нейтронного потока в результате DD-реакции при возбуждении дейтерия низкого давления высоковольтным наносекундным разрядом, инициируемым убегаящими электронами, в промежутке с потенциальным анодом малого радиуса кривизны и плоским заземленным катодом, не обогащенным дейтерием или тритием.

**Практическая значимость** работы заключается в том, что:

– Данные об основных параметрах ( $N_e$ ,  $T_e$ ,  $T_v$ ,  $T_r$ ,  $T_g$  и  $E/N$ ) плазмы импульсного и импульсно-периодического высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегаящими электронами, в ряде газов при повышенном давлении, полученные в результате выполнения исследований по теме диссертационной работы, представляют ценность с точки зрения их использования для анализа плазмо-химических процессов, протекающих в данном плазменном объекте. Полученные в результате этого знания могут оказаться полезными при поиске направлений использования плазмы данного типа разряда, например, в качестве основы технологических процессов (очистка и модификация поверхностей материалов) при высоком давлении (порядка атмосферного), что позволит отказаться от использования вакуумной техники, применяемой в настоящее время.

– Факт усиления ВУФ-излучения вблизи длины волны 147 нм в плазме высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегаящими электронами, в бинарной смеси Ar-Xe открывает возможность создания лазера ВУФ-диапазона спектра с электроразрядным способом накачки.

– Получение стабильного потока нейтронов с длительностью  $\sim 1$  нс, испускаемого в результате DD-реакции, протекающей в условиях высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегаящими электронами, в дейтерии низкого давления в промежутке с потенциальным анодом малого радиуса кривизны и плоским дейтерированным заземленным катодом является перспективным для

использования данного способа возбуждения при создании более короткоимпульсного ( $\sim 1$  нс) источника нейтронов, необходимого для решения ряда задач прикладной ядерной физики.

### Общие замечания

1. Точность измерения температуры электронов по относительной интенсивности линий (п. 2.5.2 и 3.2.1) вызывает сомнение. Расчет интенсивности линий основан на предположении наличия максвелловской функции распределения электронов по скоростям. Однако, в слабо ионизованной плазме, исследуемой в диссертации, обычно предполагается энергетическое распределение электронов типа Дрювестейна. Кроме этого, в работе не анализируется возможность наложения линий. Так, длина волны излучения иона  $N_2^+$  (переход  $B_2\Sigma u^+ (v, = 0) \rightarrow X_2\Sigma g^+ (v,, = 0)$ ,  $\lambda = 391,4$  нм) близка к длине волны излучения молекулы азота 391.9 нм.
2. При измерении концентрации электронов не учитывается поперечная неоднородность разряда.
3. При измерении усиления излучения бинарных смесей инертных газов Ar-Хе вблизи длины волны излучения 147 нм не учитывался геометрический фактор распространения излучения. В целом, данные, представленные на рис 4.8,(стр.142) требуют более детального, чем в диссертации, анализа. Почему увеличение длины разряда с 30 до 50 мм (т.е. в 1.6 раза) слабо повлияло на интенсивность, а постановка зеркала (эквивалентная длина стала 60 мм, т.е. длина выросла по сравнению с 50 мм всего в 1.2 раза) привела к трехкратному увеличению интенсивности. Не ясно, какому моменту времени соответствует представленный спектр.
4. В диссертации присутствует ряд неточностей, опусок и т.п., например: представленные на рис.5.8 осциллограммы показывают странные данные – время прихода гамма квантов на датчик на расстоянии 1 метр свыше 80 нс и на расстоянии 3 м порядка 90 нс; в таблице 2.2

переставлены значения квантовых чисел линий водорода  $n_2$  и  $n_1$ ; представление зависимостей, например концентрации электронов от давления (рис.3.4) в виде ломанной кривой вряд ли можно признать удачным.

5. В диссертации комплексно исследован чрезвычайно широкий круг физических процессов разряда высокого давления наносекундного диапазона, инициированного убегающими электронами, что без сомнения является достижением работы. Однако, широта охвата привела к снижению глубины исследования каждого отдельного параметра. Без сомнения представляет интерес исследование распределения концентрации электронов по ширине разряда, измерение и теоретический анализ формирования и изменения во времени усиления излучения молекулы  $Ar-He$  и  $He-He$  и т.д.

Последнее замечание можно отнести скорее к пожеланию дальнейших исследований в этой очень интересной области.

### **Заключение**

Исследования, представленные Сорокиным Дмитрием Алексеевичем, выполнены на высоком научном уровне. Соискателем проведен большой объем работы, включающий как создание экспериментальной установки для формирования плазмы высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в плотных газовых средах, так и проведение исследований оптических характеристик плазмы, а также возможностей ее практического использования. Следует отметить широкий набор используемых в работе методов: широко известных (например, метод штарковского уширения или времяпролетный метод), а также адаптированных (метод определения электронной температуры и приведенной напряженности электрического поля) и разработанных (метод, используемый для уточнения спектральной структуры ВУФ-излучения плазмы бинарной смеси инертных газов, основанный на исследовании влияния давления ксенона в газовом фильтре на интенсивность излучения) в процессе выполнения диссертационной работы, достоверность которых не вызывает сомнения вследствие использования

сертифицированного оборудования, повторяемости полученных результатов, а также корреляции результатов, полученных в диссертационной работе, с теоретическими и экспериментальными результатами работ других авторов. Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки работы.

Результаты диссертационной работы опубликованы в виде 20 публикаций в научных журналах, включенных в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени доктора и кандидата наук (из них 4 статьи в научных журналах, индексируемых Web of Science и 8 статей в российских научных журналах, переводные версии которых индексируются Web of Science), одной коллективной монографии (соавтор в 2 главах) и 19 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских научных конференций, из которых 6 –зарубежные конференции.

Диссертация, выполненная Сорокиным Дмитрием Алексеевичем, представляет собой научно-квалификационную работу на актуальную тему. Работа по своему содержанию и представленным результатам соответствует специальности 01.04.05 – «Оптика», а также отвечает требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ. Автор диссертационной работы Сорокин Дмитрий Алексеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – «Оптика».

Диссертационная работа заслушана, отзыв на диссертацию и автореферат обсужден на семинаре лаборатории № 3 «Лазерные технологии» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института Теоретической и Прикладной механики им С.А. Христиановича под председательством академика РАН В.М. Фомина 16 октября 2015 г., протокол № 11.

Доктор физико-математических наук, профессор,  
Руководитель научного направления,  
зав. лабораторией «Лазерные технологии»

Россия, 630090, г.Новосибирск, ул.Институтская, 4/1

тел.: +7 (383) 330-73-42

эл. почта: laser@itam.nsc.ru

<http://www.itam.nsc.ru/>

Оришич Анатолий Митрофанович

