

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Панченко Николая Алексеевича «Эффективные газовые лазеры с накачкой диффузными разрядами, инициируемыми пучками электронов лавин», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика

Многие современные направления лазерной физики связаны с изучением взаимодействия лазерного излучения с веществом. Эти исследования стимулируются необходимостью развития новых технологических операций в промышленности, получением новых химических соединений для медицинских и биологических применений, а также для проведения исследований в области физики твердого тела. Для проведения такого рода исследований требуются источники когерентного излучения, работающие в ультрафиолетовой и видимой областях спектра и обладающие достаточно высокими уровнями мощности излучения и КПД. В качестве источников такого излучения успешно применяются газоразрядные лазеры на молекулярном азоте, атомах инертных газов и эксимерных и эксиплексных молекулах при давлениях рабочих газов до 10 атмосфер. Накачка таких лазеров осуществляется преимущественно в плазме сильноточных объемных самостоятельных разрядов наносекундной длительности с предварительной ионизацией газовой среды в газоразрядном промежутке ультрафиолетовым или рентгеновским излучением.

Сложная техника формирования объемных самостоятельных разрядов с использованием предварительной ионизации привела к пересмотру подходов к формированию разрядов накачки в плотных газах. Отказ от автономных устройств предварительной ионизации газовых сред и переход к разрядам, зажигаемым в сильно неоднородных электрических полях, обеспечивает формирование диффузной плазмы в газе высокого давления. В условиях сильно неоднородных электрических полей с повышенной напряженностью формируются «убегающие электроны» и рентгеновское излучение, которые и осуществляют предварительную ионизацию газовой среды. Разряды такого типа получили название «объемные разряды, инициируемые пучками электронов лавин». Переход к такому методу формирования разрядов в плотных газах приводит к заметному упрощению газоразрядного модуля лазера и открывает возможности для получения эффективной генерации лазерного излучения ультрафиолетового диапазона на различных атомах и молекулах, в том числе и на димерах инертных газов. В связи с этим исследования, направленные на увеличение эффективности накачки и достижение максимальных параметров импульсов излучения лазеров ультрафиолетового и ИК - диапазонов в плазме разряда, инициируемого убегающими электронами, являются **весьма актуальными**.

**Оценка содержания диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы. Объем работы составляет 152

страницы. В диссертацию включено 2 таблицы и 72 рисунка. Список использованной литературы состоит из 253 наименований.

**Во введении** обосновываются актуальность темы диссертационного исследования, степень ее разработанности, формулируются цель и задачи исследования, приводятся основные положения, выносимые на защиту, описывается научная новизна и практическая значимость диссертационной работы. Отражены сведения о результатах внедрения полученных научных результатов и их апробации.

**В первой главе** приводится обзор литературы. В ней рассмотрены закономерности формирования объемных самостоятельных разрядов, применяемых для целей накачки импульсных газовых лазеров при повышенных давлениях. Анализ результатов, содержащихся в литературных источниках, позволил определить общие условия формирования объемных разрядов в плотных газах при их инициировании убегающими электронами.

**Во второй главе** излагаются методики измерений и экспериментальная аппаратура, которая применялась при проведении исследований. Описаны конструкции импульсных генераторов накачки и газоразрядных камер, комплекс аппаратуры для измерения параметров излучения с длительностями в наносекунды и в доли наносекунд. Значительное внимание уделено измерению параметров импульсов накачки и энергии, запасаемой в формирующей линии высоковольтного генератора накачки. В этой же главе приведена расчетная модель лазера, работающего на смесях азота с  $\text{SF}_6$  и  $\text{NF}_3$ , при его возбуждении в разряде с убегающими электронами. Дано описание погрешностей измерений.

**Третья глава** посвящена теоретическому и экспериментальному изучению параметров излучения азотного лазера с накачкой в плазме диффузного разряда. Изучены взаимосвязи параметров разрядов накачки, иницируемых убегающими электронами, энергетических и временных параметров импульсов излучения применительно к чистому азоту и его смесям с  $\text{SF}_6$  и гелием. Реализован новый режим работы азотного лазера с импульсами излучения, имеющими два и три пика под воздействием нескольких колебаний тока накачки. Достигнут КПД азотного лазера на уровне 0.2–0.23% при максимальных энергиях лазерного излучения в импульсе до 4.8 мДж.

**В четвертой главе** приведены результаты исследований нецепных HF(DF)-лазеров (диапазон длин волн  $\lambda = 2.8\text{--}3.2$  мкм и  $\lambda = 3.8\text{--}4.2$  мкм) с накачкой диффузными разрядами, иницируемые пучками электронов лавин. Изучены условия формирования диффузных разрядов в рабочих смесях элегаза с  $\text{H}_2$ ,  $\text{D}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$  между лезвийными электродами, обеспечивающих наиболее эффективную накачку. Достигнут максимальный КПД до 10%. Изучены спектральные зависимости энергии лазерного излучения для различных газовых смесей. На основе проведенных в данной главе исследований созданы лазеры с накачкой в нецепных химических реакциях с энергией излучения в импульсе более 100 мДж при пиковой мощности более 1 МВт и КПД до 10%.

**В пятой главе** приводятся результаты экспериментальных исследований совокупности процессов, протекающих в диффузных разрядах, инициируемых убегающими электронами, и определяющих энергетические параметры лазеров на фторидах инертных газов, на переходах молекулярного фтора и на смесях чистых инертных газов, генерирующих излучение в УФ- и ВУФ-областях спектра. Достигнуты удельные энергетические параметры импульсов излучения и КПД, соизмеримые с параметрами лазеров, возбуждаемых традиционным объемным разрядом.

**В заключении** кратко изложены основные результаты, полученные в настоящей диссертационной работе.

**Основные результаты** диссертационной работы Панченко Н.А. опубликованы в 21 работе, среди которых: 10 статей в журналах из перечня ВАК РФ (из них 2 статьи в зарубежных научных журналах, входящих в Web of Sciences; 4 статьи в Российских научных журналах, переводные версии которых входят в Web of Sciences; 2 статьи в Российских научных журналах, переводные версии которых входят в единую реферативную базу данных Scopus), 6 статей в электронных сборниках материалов конференций, представленных в изданиях, входящих в Web of Sciences; 3 монографии в соавторстве (из них 2 монографии входят в базу данных Scopus); 2 публикации в прочих научных журналах.

**Достоверность и обоснованность** защищаемых положений, а также полученных результатов и выводов работы не вызывает сомнений, так как при ее выполнении использовались общепринятые методики измерения параметров электрических импульсов накачки и генерируемого лазерного излучения. Полученные в работе лазерные параметры соответствуют результатам расчетов и хорошо согласуются с данными, имеющимися в научной литературе.

**Научная новизна** определяется следующими полученными в работе результатами.

1. В плазме диффузных разрядов с инициированием убегающими электронами получены предельные значения КПД лазерного излучения на молекулярном азоте в смесях высокого давлениям  $N-SF_6$ ,  $N_2-He-SF_6$  и на молекулах  $HF(DF)$  в смесях  $SF_6-H_2(D_2)$ .

2. Показано, что в диффузном наносекундном разряде в промежутке типа «лезвие-лезвие» при уменьшении давления смесей  $N_2-SF_6-He$  и  $SF_6-He$  за счет рассогласования импедансов плазмы разряда и генератора накачки реализуется новый режим генерации излучения в азотном лазере с двумя и тремя пиками в течение нескольких последовательных осцилляций тока разряда.

3. Обнаружено, что в смесях инертных газов с фтором в неоднородном электрическом поле без источника дополнительной предыонизации формируется устойчивый диффузный разряд. При этом полученные длительность и КПД генерации на молекулах  $XeF^*$ ,  $KrF^*$ ,  $F_2^*$  сопоставимы с данными характеристиками

в электроразрядных лазерах с накачкой поперечным объемным разрядом с предыонизацией.

#### **Практическая значимость диссертационной работы.**

1. Созданы азотные лазеры с накачкой диффузным разрядом, инициируемым убегающими электронами, с КПД до 0.23%. Полученная эффективность генерации соответствует предельной и превышает значения КПД генерации на молекулярном азоте при использовании для целей накачки объемных разрядов с предыонизацией на 10–15%.

2. В диффузных разрядах, инициируемых убегающими электронами, получен предельный внутренний КПД генерации на молекулах HF(DF), достигающий 7–10%, что сравнимо с результатами, полученными при накачке смесей элегаза с водородом и дейтерием самостоятельным объемным разрядом с предыонизацией.

3. Определены условия накачки диффузным разрядом, инициируемым убегающими электронами, смесей азота с элегазом и гелием для получения новых режимов генерации азотного лазера.

#### **Внедрение результатов работы и предложения по их использованию.**

Результаты диссертационной работы использованы при реализации следующих грантов:

1. Грант РФФИ № 14–08–00074а «Эффективная лазерная генерация в мощных наносекундных диффузных разрядах».

2. Грант РФФИ №14–29–00052 «Создание новых технологий модификации, упрочнения и очистки поверхности металлов и диэлектриков импульсной плазмой разрядов атмосферного давления, формируемых за счет убегающих электронов».

3. Работа поддержана Министерством образования и науки в рамках базовой части проекта № 3.9605.2017/8.9 «Особенности эмиссии электронов из плазмы и формирования электронных пучков в области повышенных давлений форвакуумного диапазона для пучково-плазменной модификации материалов».

#### **Недостатки работы:**

1. Диффузные разряды, формируемые в электродных системах типа «лезвие-лезвие» приводят к формированию очень узких (в сечении) пучков лазерного излучения. Такие пучки достаточно сложно применять во многих технологических операциях. Поэтому говорить о конкурентных преимуществах исследованного вида разряда накачки по сравнению с «традиционными» объемными разрядами с использованием предварительной ионизации, и с помощью которых легко формируются пучки с квадратным сечением, является не совсем корректным.

2. В работе отсутствуют сведения о воспроизводимости параметров разряда и лазерного излучения от импульса к импульсу. Приведенные фотографии свечения плазмы «диффузного» разряда указывают на наличие значительных пространственных неоднородностей и, как следствие, на заметные отличия в значениях энергии лазерного излучения от импульса к импульсу.

3. Приведенные в работе результаты не позволяют судить о возможностях применения развитого метода накачки в импульсно-периодическом режиме.

**Общее заключение** по диссертационной работе Панченко Н. А.

Несмотря на сделанные замечания, диссертационной работе можно дать высокую оценку. Диссертация представляет собой законченную научную работу, написанную грамотным научно-техническим языком, и хорошо оформлена. Содержание автореферата соответствует основным идеям и выводам диссертации.

Диссертация Панченко Николая Алексеевича является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей важное значение для развития новых методов накачки при высоких давлениях газовых сред, обеспечивающих эффективную генерацию ИК-, УФ- и ВУФ-излучения.

Диссертационная работа «Эффективные газовые лазеры с накачкой диффузными разрядами, инициируемыми пучками электронов лавин» соответствует критериям, установленным для диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, действующим п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в редакции от 01 октября 2018 г.), а ее автор, Панченко Николай Алексеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика

Официальный оппонент  
 профессор кафедры «Электронные приборы»  
 Федерального государственного бюджетного  
 образовательного учреждения высшего образования  
 «Рязанский государственный радиотехнический  
 университет имени В.Ф. Уткина»  
 (390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1,  
 (4912) 72-03-03, [rgrtu@rsreu.ru](mailto:rgrtu@rsreu.ru), <http://rsreu.ru>),  
 доктор физико-математических наук  
 (01.04.04–Физическая электроника), профессор

Борис Алексеевич Козлов

26 ноября 2019 г.

Подпись Козлова Б.А. заверяю  
 Ученый секретарь Ученого совета РГРТУ  
 кандидат технических наук.



В.Н. Пржегорлинский