

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора по научной работе  
Федерального государственного бюджетного  
научного учреждения «Федеральный  
исследовательский центр Институт прикладной  
физики Российской академии наук» (ИПФ РАН)

Д.Ф.-м.н., чл.-корр. РАН

Денисов Григорий Геннадьевич



«27» 05 2016 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН) на диссертационную работу Кубарева Виталия Владимировича «Оптические системы, диагностика и эксперименты на терагерцевых и инфракрасных лазерах на свободных электронах», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) являются в настоящее время одной из важнейших разновидностей лазеров. Уникальные свойства этих лазеров: возможность плавной перестройки длины волн, возможность получения генерации в широком спектральном диапазоне от миллиметровых до рентгеновских волн, большие импульсные и средние мощности излучения делают эти лазеры незаменимыми во многих научных и прикладных исследованиях. В настоящий момент в мире насчитывается несколько десятков действующих ЛСЭ и их число непрерывно увеличивается. Среди них около двух десятков ЛСЭ работает в инфракрасном и терагерцевом диапазонах. В России активно функционирующим ЛСЭ является Новосибирский лазер на свободных электронах (НЛСЭ). Установка НЛСЭ состоит из трёх лазеров терагерцевого, дальнего-инфракрасного и инфракрасного диапазонов, перекрывающих длины волн от 5 до 240 мкм. Ряд параметров НЛСЭ является рекордным.

Важнейшей частью лазера на свободных электронах является оптический резонатор. Другой важной частью всех ЛСЭ являются каналы вывода излучения из радиационно-опасного помещения установки в безопасные пользовательские помещения, где проводятся эксперименты с излучением. Для реализации этих оптических систем потребовалось освоить новые методы расчёта, позволяющие решать как прямую задачу нахождения полей мод в резонаторе для заданной геометрии, так и задачу нахождения геометрии под заданные параметры рабочей моды.

Для проведения экспериментов с излучением НЛСЭ потребовалась разработка новых приборов и методик. Их специфика была обусловлена как недостаточным набором коммерчески доступных приборов в дальнем инфракрасном и особенно терагерцевом диапазонах, так и спецификой самого излучения НЛСЭ (большая средняя мощность, короткие и мощные импульсы излучения, неосвоенный диапазон частот).

Все вышеперечисленное свидетельствует об **актуальности** диссертации  
Кубарева В.В.

**Во Введении** диссертационной работы описываются преимущества и особенности лазеров на свободных электронах, перечисляются особенности действующих в настоящее время в мире лазеров этого типа в инфракрасном и терагерцевом диапазонах. Отмечаются особенности и преимущества Новосибирского лазера на свободных электронах. Представлен обзор работ, на основе которых была создана теория мод открытых оптических резонаторов, на основе которой в диссертации Кубарева В.В. развиваются метод возмущений. Во введении также отражена структура диссертации по главам и перечислены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассматриваются аналитические методы приближённого расчёта устойчивых лазерных резонаторов. Автором рассмотрены резонаторы открытого, волноводного и гибридного типов, оптимизация которых была нацелена на получение максимальной выходной мощности ЛСЭ в как можно более широком диапазоне его перестройки по длине волны. Это достигается путём комбинированной оптимизации коэффициента усиления, потерь и коэффициента выходной связи. Автором отмечено, что дифракционные потери на отдельных элементах в устойчивых открытых лазерных резонаторах приближенно равны удвоенным геометрическим потерям. Для коэффициента усиления ЛСЭ автором развит формализм, из которого следует, что для открытого резонатора оптимальная длина Рэлея составляет 0.255 длины ондулятора, а оптимальная отстройка частоты излучения от резонансного значения для оптимального гауссова пучка примерно вдвое больше, чем для приближения плоской волны. Рассмотрено влияние юстировочной неустойчивости, уменьшающей усиление и увеличивающей потери в резонаторе при уменьшении длины Рэлея.

Найдены оптимальные параметры гибридных оптических лазерных резонаторов с полыми круглыми, прямоугольными и планарными волноводами. Вычислены потери связи, возникающие при преобразовании волноводной моды в гауссовы моды открытого пространства и обратно в волноводную моду. Кубаревым В.В. найдены оптимальные расстояния между торцом волновода и отражающим зеркалом, для которых потери связи малы. Найдено значение оптимальной выходной связи для однородного и неоднородного по поперечному сечению моды способов вывода излучения.

**Во второй главе** рассмотрены задачи оптимизации трёх открытых оптических резонаторов НЛСЭ, гибридного оптического резонатора Корейского института исследований в области атомной энергии (KAERI), волноводного резонатора универсального сверхмалошумящего газового лазера и эскизный проект волноводного резонатора мощного ЛСЭ. Первые пять лазеров успешно функционируют в настоящее время и имеют рекордные параметры для установок своего класса.

**В третьей главе** диссертации на основе метода эквивалентного гауссова пучка рассмотрены задачи оптимизации линий передачи излучения НЛСЭ к пользовательским станциям. Описан эффект поглощения излучения НЛСЭ парами воды в атмосфере и рассмотрены способы решения проблемы эффективной транспортировки излучения: осушка воздуха и вакуумирование.

**В четвёртой главе** рассмотрены приборы и методы диагностики излучения НЛСЭ. Автором диссертации разработаны оригинальные приборы и методы для калориметрии мощного излучения, полного спектрального анализа излучения, детектирования временной формы излучения, широкоапertureной визуализации пучков излучения, поляризационного регулирования мощного излучения и другие. Особого внимания заслуживают детекторы излучения с разрешением 15 пс; анализаторы спектра, осуществляющие одноимпульсную спектроскопию отдельных импульсов НЛСЭ длительностью 60-100 пс; устройства визуализации пучков излучения высокой чувствительности.

**Пятая глава** диссертации посвящена различным экспериментам на НЛСЭ. Первая группа экспериментов относится к измерению основных лазерных параметров НЛСЭ, режимов его работы и их изменению. Автором проведены тщательные измерения

добротностей мод оптических резонаторов, оказавшиеся в хорошем согласовании с расчётом. Другим крайне интересным исследованием является получение усиленного спонтанного излучения высших гармоник и лазерной генерации на третьей гармонике. Проведены уникальные исследования спектрально-временных параметров излучения НЛСЭ в устойчивых и неустойчивых режимах. Найден надежный универсальный способ подавления неустойчивостей излучения при помощи расстройки частот повторения электронных и световых импульсов. В этом режиме НЛСЭ генерирует импульсное излучение, характеризующееся предельно узкими спектральными линиями, а отдельные импульсы когерентны. В неустойчивых режимах с помощью разработанных методов одноимпульсной спектроскопии обнаружены моды на боковых частотах. Исследованы и проанализированы два вида неустойчивостей.

Другая группа экспериментов – это технологические эксперименты по измерению оптических параметров различных материалов и периодических структур, необходимых для построения оптических резонаторов НЛСЭ и приборов для диагностики его излучения. С высокой точностью измерены оптические параметры CVD-алмазов и керамики, нанесённой на металлические поверхности газодинамическим способом.

Следующая группа экспериментов охватывает эксперименты по лазерной абляции материалов, требующие большой импульсной мощности; эксперименты с терагерцевым оптическим разрядом; эксперименты, демонстрирующие оптикоакустический эффект в газах. Эти эффекты известны, но в терагерцевой области имеют значительную специфику и были продемонстрированы впервые. Так в экспериментах с Друммондовым светом автором выдвинута теория, проясняющая его природу. Представлены новые оригинальные эксперименты по сверхбыстрой одноимпульсной газовой спектроскопии. Эти эксперименты реализованы благодаря использованию уникальных свойств НЛСЭ и разработанных быстрых детекторов и терагерцевых интерферометров.

**В Заключении** сформулированы результаты работы.

**Научная новизна диссертации** заключается в разработке новых, уникальных методик и приборов, позволивших реализовать НЛСЭ, проанализировать режимы его работы, провести ряд важных экспериментов, позволивших осуществить диагностику его собственного излучения, исследовать с его помощью новые эффекты в различных сложных физических системах.

**Научная и практическая значимость диссертации** связана прежде всего с теоретическими и экспериментальными исследованиями, приведшими к созданию лазеров НЛСЭ, обладающих рядом уникальных параметров. Полученные при этом результаты могут быть использованы при создании новых лазеров терагерцового диапазона. Ряд результатов диссертации, полученных при выполнении экспериментов на НЛСЭ, уже нашел применение в различных научных и прикладных исследованиях. Среди них результаты по измерениям свойств алмаза, терагерцовому разряду и абляции, друммондову свету, оптико-акустическим эффектам при распространении терагерцев. Результат по одноимпульсной терагерцовой спектроскопии, интерес к которой нарастает все последние годы, может найти применение при изучении сверхбыстрых химических и физических явлений.

**Достоверность** полученных в диссертации результатов не вызывает сомнений. Методы расчёта лазерных резонаторов и каналов были подтверждены в экспериментах после создания комплекса НЛСЭ и других лазеров, а также сравнением с решениями частных задач другими известными методами. Экспериментальные результаты получены в результате многократно повторенных исследований, как правило, несколькими способами.

## **Диссертационная работа не свободна от недостатков:**

1. При описании метода расчета оптических резонаторов и линий передачи терагерцового излучения, основанного на приближенных аналитических формулах и формализме эквивалентного гауссова пучка, было бы уместно ссыльаться на ряд более ранних работ. В них для широкого класса систем выполнено как теоретическое обоснование методики расчета, так и осуществлено ее применение для дизайна гиротронных преобразователей и квазиоптических линий передачи:
  1. С.Н. Власов, В.А. Петрищев, В.И. Таланов. Усредненное описание волновых пучков в линейных и нелинейных средах (метод моментов), Изв. Вузов. Радиофизика, 1971, т. 14, №9, стр. 1353-1363.
  2. С.Н. Власов, И.М. Орлова. Квазиоптический преобразователь волн волновода кругового сечения в узконаправленный волновой пучок, Изв. Вузов. Радиофизика, 1974, т. 17, №1, стр. 148-154.
  3. S.O. Kuznezov, V.I. Malygin. Determination of gyrotron wavebeam parameters, International Journal of Infrared and Millimeter Waves, Vol. 12, No. 11, 1991, pp. 1241-1252.
2. При описании мод полых волноводов автором использованы формулы из классической работы Маркатили и др. для гибридных мод, которые для описания волноводных и гибридных резонаторов НЛСЭ, по-видимому, являются адекватными. Однако, в диссертации на стр. 43 неверно указана область применимости использованного приближения, как области, в которой размер волновода велик по сравнению с длиной волны. Отмеченного требования недостаточно.
3. Оригинальный метод терагерцовой спектроскопии импульсов длительностью порядка 100 пс называется автором «сверхбыстрым». На самом деле метод правильнее называть одноимпульсной спектроскопией, потому что быстрые оптические спектрометры работают с фемтосекундными импульсами. Автор умалчивает также, что применение разработанного метода анализа спектра коротких импульсов для исследования быстропротекающих процессов типа взрыва требует синхронизации излучения НЛСЭ с нужной фазой взрыва, что на данный момент представляется весьма проблематичным.

Отмеченные недостатки не снижают высокой оценки работы и ценность полученных в ней результатов. Диссертационная работа выполнена на высоком уровне, является завершенным исследованием. Среди исследований, описанных в диссертации, особенно сильно выглядит часть, посвященная описанию многолетних экспериментов на НЛСЭ, разработке уникальных приборов для измерения характеристик терагерцового и инфракрасного излучения НЛСЭ, метод и приборы, относящиеся к одноимпульсной спектроскопии, в которой удается отказаться от использования внешнего гетеродинного сигнала. Работа отвечает требованиям “Положения о присуждении ученых степеней” (п. 9-14), утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемых к докторским диссертациям, а ее автор, Кубарев Виталий Владимирович, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Работа заслушана и обсуждена на семинаре отделения Физики плазмы и Электроники больших мощностей 19 мая 2016 г.

Секретарь семинара:

С.н.с., к.ф.-м.н.

Илья Владимирович Бандуркин

Отзыв составил:

Заведующий лабораторией №111 ИПФ РАН

Д.ф.-м.н.

Кузиков Сергей Владимирович

23.05.2016

Тел. +78314189033

e-mail: [kuzikov@appl.sci-nnov.ru](mailto:kuzikov@appl.sci-nnov.ru)

Адрес: 603950, г. Нижний Новгород, бокс-120, ул. Ульянова, д.46

Учёный секретарь ИПФ РАН

С.н.с., к.ф.-м.н.

Корюкин Игорь Валерьевич

e-mail: [igor@appl.sci-nnov.ru](mailto:igor@appl.sci-nnov.ru)

Контакты ведущей организации:

Адрес: 603950, г. Нижний Новгород, бокс-120, ул. Ульянова, д.46.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН)

Телефон: +7(831) 432-14-77

Электронный адрес: [ams@ufp.appl.sci-nnov.ru](mailto:ams@ufp.appl.sci-nnov.ru)