

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию 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.

Актуальность темы исследования. Тема диссертационного исследования связана с решением широчайшего круга задач сложнейшей проблемы по формированию и контролю излучения терагерцевых и инфракрасных лазеров на свободных электронах (ЛСЭ). Уникальные свойства этих лазеров, прежде всего это возможность очень точной, непрерывной перестройки частоты генерации в широком диапазоне, большая пиковая и средняя мощность делают их незаменимыми источниками для решения научных и технологических задач. Важными для практики являются временная и пространственная когерентности излучения ЛСЭ, обеспечивающие большую спектральную яркость и интенсивность сфокусированного излучения. Несмотря на техническую сложность ЛСЭ уникальные технологические возможности этих лазеров стимулировали проведение их активных исследований. В настоящее время насчитывается до двух десятков установок, причем Новосибирский ЛСЭ (НЛСЭ) занимает по многим параметрам лидирующие позиции в мире.

Важно отметить, что широкий спектр возможностей этих лазеров, и в частности, уникальные характеристики НЛСЭ обусловили их применение в центрах коллективного пользования излучения, где различные научные группы проводят исследования в области физики, химии, биологии и медицины. Таким образом, актуальность темы исследования диссертационной работы Кубарева В.В не вызывает сомнения.

Во введении описаны уникальные возможности лазеров на свободных электронах (ЛСЭ), перечислены основные действующие в мире ЛСЭ терагерцевого и дальнего инфракрасного диапазонов. Отмечены преимущества Новосибирского лазера на свободных электронах (НЛСЭ) и его основное предназначение как источника излучения Центра коллективного пользования.

Первая глава посвящена разработанным автором новым аналитическим методам приближённого расчёта лазерных устойчивых резонаторов различного типа. Базисные принципы этих методов основаны на утверждении, что потери в устойчивых оптических резонаторах с малыми потерями можно рассматривать как малые возмущения хорошо известных невозмущённых мод открытого или волноводного типа. Впервые зависимость коэффициента усиления от двух параметров - длины Рэлея и расстройки частоты излучения от резонансного значения записана в виде одной формулы, удобной для оптимизации.

Во второй главе описано устройство и оптимизация различных оптических резонаторов на основе аналитических методов, изложенных в главе 1. Дано краткое описание уникальной установки «НЛСЭ», состоящей из ускорительной части и трёх лазеров на свободных электронах терагерцевого, дальнего инфракрасного и инфракрасного диапазонов. Устройства оптических резонаторов лазеров «НЛСЭ» во многом схожи, поскольку в них во всех используются плоские ондуляторы и открытые резонаторы. Длины резонаторов должны быть кратными величинами: $n \cdot 6.647 \text{ м}$ ($n=1,2,3...$).

Третья глава посвящена каналам транспортировки излучения от НЛСЭ к рабочим станциям. Их суммарная длина превышает 120 метров. Описаны устройство и оптический

расчёт каналов, поглощение терагерцевого излучения атмосферными парами воды и способы решения этой проблемы, проведено сравнение расчётных и экспериментальных пучков.

В четвертой главе описаны приборы и методы диагностики излучения НЛСЭ, некоторые из которых просто уникальные. Содержание этой главы во многом определяется отсутствием промышленных приборов для терагерцевого диапазона, а также спецификой измеряемого излучения НЛСЭ. Такой спецификой являются очень короткие (30 - 120 пс) импульсы излучения. Поэтому для корректных измерений в этих режимах требуются сверхбыстрые (15 - 20 пс) методы измерения формы и спектров излучения в отдельных импульсах. Один только перечень приборов, методик измерений, контролируемых параметров, изложенных в этой главе, показывает тот колоссальный объем работы, который был проделан В.В. Кубаревым для оснащения НЛСЭ. Созданы приборы для измерения средней мощности, формы импульса, длины волны и структуры спектра излучения: быстрые детекторы на диоде Шоттки с резонансной антенной, отображающие импульсы НЛСЭ в интегрированном виде и сверхбыстрые детекторы на диоде Шоттки, сапфировый калориметр, оперативный калориметр мощного терагерцевого излучения и внутриврезонаторный калориметр НЛСЭ, сеточные интерферометры Фабри-Перо, спектрометр на дифракционных решетках.

В разделе 4.5 рассмотрена, на наш взгляд, уникальная задача сверхбыстрой спектроскопии отдельных импульсов НЛСЭ.

В пятой главе описаны эксперименты с излучением НЛСЭ, которые демонстрируют возможности источников излучения и созданной диагностики. Описаны измерения феноменологических лазерных параметров НЛСЭ: потерь в оптических резонаторах, коэффициента усиления и интенсивности насыщения активной среды, оптимальные коэффициенты выходной связи. Показано хорошее соответствие простой классической модели для лазеров с однородным частотным уширением активной среды.

Рассмотрены характерные режимы работы терагерцевого НЛСЭ, генерация терагерцевого НЛСЭ на высших гармониках, сверхбыстрая терагерцевая газовая спектроскопия. Она является примером идеального эксперимента для НЛСЭ, поскольку в ней используются все четыре уникальных свойства излучения этой установки.

Научная новизна диссертации заключается в следующем.

Предложен метод аналитического приближенного расчёта для эффективной оптимизации открытых лазерных резонаторов и гибридных резонаторов (резонаторов с полыми волноводами). Впервые зависимость коэффициента усиления лазера на свободных электронах от длины Рэлея оптического резонатора и частоты записана в виде одной аналитической формулы.

Впервые метод эквивалентного гауссова пучка применён для эффективного расчёта каналов транспортировки излучения от лазеров к пользовательским станциям.

Впервые созданы приборы для точных измерений параметров терагерцевого излучения: эталонный сапфировый калориметр, оперативный калориметр, системы широкоапертурной визуализации пучков, сверхбыстрые детекторы и сверхбыстрый спектрометр с временным разрешением 15 пс.

Впервые детально экспериментально исследованы режимы генерации лазера на свободных электронах. Показано, что в зависимости от величины стабилизирующего фактора - расстройки частот повторения электронных и световых сгустков, режим НЛСЭ изменяется от неустойчивого режима с конкуренцией мод и малой длиной когерентности к режиму ста-

бильной многомодовой генерации и затем к стабильному режиму одномодовой генерации с длиной когерентности, соответствующей фурье-пределу.

Впервые в стабильном режиме терагерцевого НЛСЭ получено достаточно мощное усиленное спонтанное излучение на 2-й и 3-й гармониках основной частоты. Впервые проведен ряд технологических экспериментов: точно измерены потери на поглощение терагерцевого излучения при его прохождении через CVD-алмазы различного качества, получен квазинепрерывный терагерцевый оптический разряд, создана феноменологическая теория друммондова света, абляция твёрдых материалов и сильный оптико-акустический эффект в газах.

Впервые созданы и экспериментально испытаны методы сверхбыстрой одноимпульсной спектроскопии излучения ЛСЭ и газовой молекулярной спектроскопии с высоким спектральным разрешением, основанные на измерении временных сигналов излучения ЛСЭ и возбужденных импульсами ЛСЭ молекул.

Научную и практическую значимость диссертации трудно переоценить. Фактически решены все проблемы по созданию оптической системы НЛСЭ. Создан, во многом оригинальный набор приборов по контролю всех необходимых параметров излучения и проведена серия опытов, демонстрирующая уникальные свойства созданных лазеров.

Разработанные методы аналитического приближённого расчёта открытых и гибридных резонаторов являются эффективным инструментом при решении задач создания оптимальных оптических резонаторов для лазеров разного типа. На основе НЛСЭ создан Центр коллективного пользования, где проводятся различные, в том числе уникальные, эксперименты. Данные терагерцевых измерений алмаза вошли в справочники и монографии по этому материалу и используются в экспериментальной практике многими исследователями.

Полученные результаты по оптическому терагерцевому разряду, в частности метрологические данные по порогам пробоя различных газов, важны для теории и практики физики газового разряда. Созданная феноменологическая теория друммондова света окиси кальция важна как для понимания природы этого давно известного, но недостаточно изученного до этого явления, так и для практики. Например, эта теория уже сейчас используется при исследовании параметров термостойких керамических материалов тепловой защиты для космической и атомной промышленности.

На основе продемонстрированного явления терагерцевой абляции сейчас созданы методы неразрушающей абляции биологических объектов, а также эффективные методы исследования структуры наноматериалов. Обнаруженный сильный оптико-акустический эффект сейчас используется для оперативной простейшей диагностики нахождения длины волны НЛСЭ в окне прозрачности атмосферы и имеет большие потенциальные возможности в области высокочувствительного газового анализа.

Разработанный метод сверхбыстрой терагерцевой спектроскопии является работоспособным, в отличие от других стробоскопических методов быстрой спектроскопии, при исследовании быстропротекающих, но неповторяющихся в деталях явлений. Практически важными объектами применения метода являются быстрые неустойчивые фотохимические реакции и принципиально однократные явления, подобные взрывам.

Обоснованность научных положений и достоверность полученных результатов.

Достоверность полученных в диссертации результатов не вызывает сомнений.

Все основные полученные аналитические соотношения приближенного расчёта для эффективной оптимизации резонаторов и каталов подтверждены сравнением с экспериментальными данными, а также сравнением с известными решениями частных задач. Достоверность экспериментальных результатов диссертации также не вызывает сомнений поскольку они получены с использованием многократно проверенных методик измерений.

Методы проверены как путём прямого сравнения с результатами расчётов частных задач классическими численными методами, так и многократным проведением прямых экспериментов на НЛСЭ.

Отмеченные недостатки:

1. В диссертации подробно рассматриваются различные аспекты работы лазера, приведено схематическое устройство НЛСЭ (рис.2.1) и оптического резонатора (2.2), однако важнейший узел лазера – ондулятор не показан и не уточняются его геометрические размеры, которые могут фактически ограничивать размеры каустика.

2. В главе 5 описаны уникальные данные по нарастанию мощности световых импульсов, начиная со спонтанного излучения, в номинальном оптическом терагерцевом резонаторе (рис.5.4), однако в диссертации отсутствуют данные и обсуждение как углового распределения излучения ондулятора в режиме спонтанного излучения, так и на начальной стадии нарастания генерации, что затрудняет анализ процесса формирования излучения в лазере.

3. В разделе 4.4.3 при описании импульсных параметров излучения НЛСЭ отмечено влияние отстройки частоты повторения электронных импульсов относительно частоты световых импульсов на характер генерации лазера, однако не обсуждается эффект возможного пространственного смещения импульсов в этом случае.

4. В разделе 1.3 автором рассмотрена задача определения оптимальной величины обратной связи, или потерь на излучение, при которых выходная мощность лазера максимальна. Получено соотношение для определения оптимального коэффициента полезных потерь. Эта задача рассматривалась ранее разными авторами, например, в работах W.W. Rigrod 1963 и Ю.А. Ананьев 1963 и в других более поздних работах этих авторов. Подход Ю.А. Ананьева подробно изложен в его монографиях по лазерным резонаторам 1979 г. и 1990 г. В диссертации никак не обсуждается вопрос о применимости этих методов для энергетической оптимизации ЛСЭ, ссылки на работы этих авторов отсутствуют, упомянута только работа С.Т. Mennely 1967. Следовало бы пояснить, почему возникла необходимость вновь искать решение этой задачи.

5. В диссертации отсутствует экспериментальный контроль за мощностью, рассеиваемой внутри резонатора и поглощаемой диафрагмами, что не позволяет определить полный энергетический баланс лазера.

Заключение.

Суммируя все вышесказанное, необходимо отметить, что диссертационная работа Кубарева В.В является высокопрофессиональной работой комплексного характера, охватывающей практически все аспекты проблемы создания оптической системы и диагностики. Замечания не снижают уровень работы, а скорее указывают на направления более детального исследования.

Представленная диссертационная работа Кубарева В.В. является законченным научным исследованием и полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к докторским диссертациям по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики и критериям, установленным в п.9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней». Автор диссертации Кубарев В.В., *заслуживает* присуждения учёной степени доктора физико-математических наук.

Официальный оппонент

Доктор физико-математических наук,
профессор

Заведующий лабораторией «Лазерные технологии»

Федерального государственного бюджетного учреждения

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А.Христиановича
Сибирского отделения Российской академии наук

А.М. Оришич

630090, г. Новосибирск. Ул. Институтская 4/1.

Телефон 383- 3307-342

Электронный адрес : orishich@itam.nsc.ru

« 10 » мая 2016 г.

Подпись А.М. Оришича заверяю:

Учёный секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А.Христиановича

Сибирского отделения Российской академии наук



к.ф.-м.н.

Ю.В.Кратова

Электронный адрес: Kratova Yu.V. [sci_itam@itam.nsc.ru]