

На правах рукописи

КУБАРЕВ Виталий Владимирович

**ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, ДИАГНОСТИКА
И ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ТЕРАГЕРЦЕВЫХ
И ИНФРАКРАСНЫХ ЛАЗЕРАХ
НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ**

**01.04.01 – Приборы и методы
экспериментальной физики**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук**

НОВОСИБИРСК - 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

- ОРИШИЧ
Анатолий Митрофанович – доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, руководитель научного направления, заведующий лабораторией «Лазерные технологии».
- ПОТАТУРКИН
Олег Иосифович – доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизи- электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, заместитель директора по научной работе.
- ШКУРИНОВ
Александр Павлович – доктор физико-математических наук, доцент, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, заведующий лабораторией терагерцевой оптоэлектроники и спектроскопии.
- ВЕДУЩАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной физики Российской академии наук, г. Нижний Новгород.

Защита диссертации состоится «___» _____ 2016 г. в «_____» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

П.А. Багрянский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Тема диссертационного исследования связана с лазерами на свободных электронах (ЛСЭ). ЛСЭ являются незаменимыми источниками в научных и технологических задачах, в которых требуется мощное и плавно перестраиваемое по длине волны электромагнитное излучение. Важными для практики являются временная и пространственная когерентности излучения ЛСЭ, обеспечивающие большую спектральную яркость и интенсивность сфокусированного излучения. Кроме этого излучение ЛСЭ имеет «чистую» линейную или круговую поляризацию при использовании ондуляторов плоского или спирального типов, соответственно.

Как правило, на базе ЛСЭ создаются центры коллективного пользования излучением, где различные научные группы проводят различные исследования в области физики, химии, биологии и медицины. Так, например, сейчас ЛСЭ вносят значительный вклад в научное освоение терагерцевого диапазона излучения, который является оптимальным при исследовании диэлектриков и полупроводников, нано- и мета-материалов, сильно рассеивающих аэрозольных сред, динамики горения с образованием поглощающих веществ, сверхбыстрой газовой спектроскопии и т.д. Другими примерами могут служить перспективные технологические применения излучения инфракрасных ЛСЭ для управляемых излучением химических реакций, разделения изотопов, транспортировки энергии на космические аппараты и др.

Цель и задачи

Целью диссертационной работы является разработка оптимальных оптических систем для создания и транспортировки мощного излучения лазеров на свободных электронах терагерцевого и инфракрасного диапазонов, а также комплексная диагностика и использование этого излучения в различных экспериментах. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Создать эффективные аналитические методы расчёта потерь и коэффициента усиления в лазерных резонаторах открытого, волноводного и гибридного типов, необходимые при проектировании этих резонаторов.
2. Провести оптимизацию конструкции оптических резонаторов ЛСЭ и после получения лазерной генерации измерить феноменологические параметры внутрирезонаторного излучения (потери, усиление, интенсивность насыщения).
3. Разработать метод аналитического расчёта пучков в каналах транспортировки излучения от ЛСЭ к рабочим станциям.

4. Провести оптимизацию конструкции каналов транспортировки; измерить пучки излучения в разных местах каналов и их ослабление в среде распространения после создания каналов.
5. Разработать приборы для диагностики всех параметров излучения ЛСЭ терагерцевого и инфракрасного диапазонов, в том числе параметров отдельных импульсов излучения.
6. Провести эксперименты по оптимизации параметров и режимов ЛСЭ, в том числе оптимизации режимов излучения на 2-й и 3-й гармониках.
7. Провести различные эксперименты с мощным перестраиваемым излучением ЛСЭ как технологической (оптические параметры новых материалов, необходимых для развития ЛСЭ), так и исследовательской направленности (как основы для развития последующих пользовательских методик и задач).

Личный вклад автора в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим.

Автором лично разработаны методы аналитического приближенного расчёта оптических лазерных резонаторов открытого, волноводного и гибридного типов. Эти методы применены автором для расчёта, оптимизации и создания оптических резонаторов для четырёх ныне успешно функционирующих лазеров на свободных электронах и универсального сверхмаломощного газового лазера с рекордными параметрами.

Автором лично рассчитаны и испытаны оптимальные каналы транспортировки излучения от Новосибирского ЛСЭ (НЛСЭ) к рабочим пользовательским станциям.

Автором лично созданы различные приборы для измерения терагерцевого и инфракрасного излучений, многие из которых – оригинальные разработки.

При определяющем участии автора проведены серии различных экспериментов с целью выявления различных режимов работы НЛСЭ и измерения основных параметров его излучения, в том числе его феноменологических лазерных параметров.

При определяющем участии автора получены и оптимизированы излучения на второй и третьей гармониках НЛСЭ, в том числе лазерная генерация на третьей гармонике.

При определяющем участии автора проведены измерения оптических параметров новых материалов (CVD-алмазов, напылённого газодинамическим способом корунда и др.) и поляризаторов, необходимых для создания оптических резонаторов и приборов на НЛСЭ.

При определяющем участии автора проведены уникальные эксперименты с мощным терагерцевым излучением (абляция, оптический разряд, оптико-акустический эффект, друммондов свет, сверхбыстрая спектроскопия излучения НЛСЭ и молекул в газовой фазе).

Научная новизна работы заключается в следующих пунктах:

Впервые метод аналитического приближенного расчёта применён для эффективной оптимизации открытых лазерных резонаторов. Метод проверен как путём прямого сравнения с результатами расчётов частных задач классическими численными методами, так и прямыми экспериментами на НЛСЭ.

Впервые метод аналитического приближенного расчёта применён для эффективной оптимизации гибридных резонаторов (резонаторов с полыми волноводами). Точно аналитически рассчитаны потери связи, возникающие при переходах излучения из волновода в открытое пространство и обратно, для круглых, прямоугольных и планарных волноводов.

Впервые зависимость коэффициента усиления лазера на свободных электронах от длины Рэлея оптического резонатора и частоты записана в виде одной аналитической формулы.

Впервые выписаны правильные аналитические формулы для оптимальных коэффициентов полезных потерь оптического резонатора лазера для однородного и неоднородного типов вывода излучения.

Впервые метод эквивалентного гауссова пучка применён для эффективного расчёта каналов транспортировки излучения от лазеров к пользовательским станциям. Экспериментальная проверка на созданных каналах подтвердила правильность этого метода.

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

Впервые в стабильном режиме терагерцевого НЛСЭ получено достаточно мощное усиленное спонтанное излучение на 2-й и 3-й гармониках основной частоты. В длинноволновой части диапазона терагерцевого НЛСЭ получена лазерная генерация на 3-й гармонике без изменения конструкции оптического резонатора.

Впервые точно измерены потери на поглощение терагерцевого излучения при его прохождении через CVD-алмазы различного качества. По ним определены допустимые проходящие мощности для этих материалов.

Впервые получен квазинепрерывный терагерцевый оптический разряд. Показано, что пороги пробоя разряда хорошо описываются классической

теорией стохастического нагрева электронов в переменном поле излучения, а в развитом высокотемпературном плазменном разряде существуют автоколебания на собственных частотах.

Впервые на основе экспериментальных данных создана феноменологическая теория друммондова света. Показано, что это необычно яркое видимое излучение имеет чисто тепловую природу и обусловлено переходом окиси кальция из состояния «идеального белого тела» в состояние «идеального чёрного тела» при температуре около 2000°K.

Впервые экспериментально продемонстрированы эффекты воздействия мощного терагерцевого излучения на вещество: лазерная 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.

Научная и практическая ценность работы

Разработанные методы аналитического приближённого расчёта открытых и гибридных резонаторов являются эффективным инструментом при решении задач создания оптимальных оптических резонаторов для лазеров разного типа (лазеров на свободных электронах, газовых и твердотельных лазеров и др.). Они позволяют решать обратную задачу синтеза, в отличие от известных численных методов для решения прямой задачи нахождения полей и потерь в резонаторах с заданной геометрией.

Оптимизация оптических резонаторов и режимов работы НЛСЭ с получением максимальных параметров по мощности, когерентности и расходимости излучения позволили создать источники перестраиваемого в широком диапазоне излучения с рекордными параметрами. 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. Этим методом были измерены одноимпульсные спектры излучения НЛСЭ в устойчивых и неустойчивых режимах. Другими практически важными объектами применения метода являются быстрые неустойчивые фотохимические реакции и принципиально однократные явления, подобные взрывам.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработка методов аналитического приближенного расчёта оптических лазерных резонаторов открытого, волноводного и гибридного типов.
2. Использование этих методов для расчёта, оптимизации и создания оптических резонаторов для четырёх ныне успешно функционирующих лазеров на свободных электронах и универсального сверхмаломощного газового лазера.
3. Метод оптического расчёта, создание и испытание каналов транспортировки излучения от НЛСЭ к пользовательским станциям.
4. Создание различных приборов для измерения терагерцевого и инфракрасного излучения, многие из которых – оригинальные разработки.
5. Проведение серий различных экспериментов с целью выявления различных режимов работы НЛСЭ и измерения основных параметров его излучения, в том числе его феноменологических лазерных параметров (потери в оптических резонаторах, коэффициенты усиления и интенсивности насыщения).
6. Получение и оптимизация излучения второй и третьей гармоник НЛСЭ, в том числе лазерной генерации на третьей гармонике.
7. Проведение измерений оптических параметров новых материалов (СVD-алмазов, газодинамически напылённого корунда и др.) и поляризаторов, необходимых для создания оптических резонаторов и приборов для НЛСЭ.

8. Проведение уникальных экспериментов с мощным терагерцевым излучением (абляция, оптический разряд, оптико-акустический эффект, друммондов свет, сверхбыстрая спектроскопия излучения НЛСЭ и молекул в газовой фазе).

Апробация диссертации

Работы, составляющие материал диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах в ИЯФ СО РАН (Новосибирск), ИХКиГ СО РАН (Новосибирск), ИАиЭ СО РАН (Новосибирск), МГУ (Москва). Материалы диссертации в виде 56 докладов обсуждались на 23 Международных и 9 Российских конференциях: на XII, XV, XVI, XVII, XIX, XX Национальных конференциях по использованию синхротронного излучения (Новосибирск, 1998, 2004, 2006, 2008, 2012, 2014), на 4-м Азиатском симпозиуме по лазерам на свободных электронах (Тайджон, Корея, 1999), на 22-й, 24-й, 26-й, 29-й, 31-й, 34-й и 37-й Международных конференциях по лазерам на свободных электронах (Дюрем, США, 2000; Аргонна, США, 2002; Триест, Италия, 2004; Новосибирск, 2007; Ливерпуль, Англия, 2009; Нара, Япония, 2012; Тайджон, Корея, 2015), на 1-й Международной конференции по субмиллиметровой науке и технологии (Ахметабад, Индия, 2004), на 29-й, 30-й, 31-й, 32-й, 34-й, 35-й, 37-й, 38-й, 39-й и 40-й Международных конференциях по инфракрасным, миллиметровым и терагерцевым волнам (Карлсруэ, Германия, 2004; Вильямсбург, США, 2005; Шанхай, Китай, 2006; Кардифф, Англия, 2007; Бусан, Корея, 2009; Рим, Италия, 2010; Воллонгонг, Австралия, 2012; Майнц, Германия, 2013; Туксон, США, 2014; Гонконг, Китай, 2015), на Международном симпозиуме по проблемам физики нелинейных волн (С-Петербург–Н-Новгород, 2005), на 23-й Международной конференции по ускорителям частиц (Ванкувер, Канада, 2009), на Международном симпозиуме «Терагерцевое излучение: генерация и применения» (Новосибирск, 2010), на VIII Всероссийском семинаре по радиофизике миллиметровым и субмиллиметровых волн (Н-Новгород, 2011), на Международном рабочем совещании «Интенсивные микроволновые и терагерцевые волны: источники и применения» (Н-Новгород–С-Петербург, 2011), на 2-й Международной конференции «Терагерцевое и микроволновое излучение: генерация, детектирование и применения» (Москва, 2012), на XXIII Российской конференции по ускорителям частиц (С-Петербург, 2012), на 16-й Международной конференции по оптике лазеров (С-Петербург, 2014).

Результаты диссертационной работы служили основанием получения поддержки на проведение исследований со стороны Министерства образования и науки РФ по программам уникальных установок и центрам коллективного пользования, Российского научного фонда, Российского фонда фундаментальных исследований, Сибирского отделения Российской

академии наук по междисциплинарным интеграционным проектам фундаментальных исследований.

Публикации

По теме диссертации опубликована 61 работа, из них 32 – в рецензируемых научных журналах, 29 – в трудах российских и международных научных конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Материал работы изложен на 321 страницах, включает 106 рисунков, 14 таблиц и список цитируемой литературы из 189 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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. Далее описывается важность для ЛСЭ оптических резонаторов и каналов транспортировки излучения, дан краткий обзор методов расчёта этих устройств. Отмечается важность создания новых аналитических методов расчёта лазерных резонаторов и каналов, которые необходимы для их эффективной оптимизации при проектировании. Далее обсуждается важность диагностики излучения и проблемы с диагностикой терагерцевого излучения. Указано, что измерению и оптимизации параметров НЛСЭ, исследованию важных для НЛСЭ оптических материалов посвящены специальные эксперименты. Отмечается, что параметры НЛСЭ позволяют проводить на ней уникальные пользовательские эксперименты, часть которых представлена в диссертации.

Первая глава посвящена разработанным автором новым аналитическим методам приближённого расчёта лазерных резонаторов различного типа.

В преамбуле главы описаны основные базисные принципы этих методов. Во-первых, это очевидное утверждение, что потери в устойчивых оптических резонаторах с малыми потерями можно рассматривать как малые возмущения хорошо известных невозмущённых мод открытого или волноводного типа. Далее необходимо правильно вычислить эти потери аналитически для того чтобы затем провести оптимизацию оптических резонаторов. При этом, чем меньше будут потери оптимальных резонаторов, тем ближе к истине будет приближённая модель. При таком подходе вычисление потерь носит универсальный характер, т.е. потери на различных возмущениях (в том числе несимметричных) в произвольных местах оптического резонатора

представляются в виде аналитических функций от геометрических размеров возмущения и резонатора, по которым легко проводить оптимизацию.

В разделе 1.1 рассматриваются открытые лазерные резонаторы. В подразделе 1.1.1 описывается основанный на теореме Бабине метод расчёта потерь на произвольных малых отверстиях в зеркалах или произвольных возмущениях на периферии рабочей моды. В 1.1.1.1-1.1.1.4 рассмотрены наиболее типичные возмущения. Показано, что потери на всех этих возмущениях примерно равны удвоенным геометрическим потерям. Там же показано, что расчёты автора хорошо согласуются с известными расчётами частных задач в работах Ли (Т. Li), МакКамбера (McCamber D.E.), Любимова В.В. и Орловой И.Б. В качестве иллюстрации на рисунке 1 приведены расчёты автора, Ли, Любимова и Орловой потерь TEM_{00} -моды на наружных апертурах вогнутых круглых зеркал в симметричной геометрии как функции апертурного числа Френеля N_m ($N_m = r_m^2/\lambda L$, r_m – радиус зеркала, λ – длина волны, L – длина резонатора) для различных величин параметра устойчивости g ($g = 1 - L/R$, R – радиус зеркал). Видно, что все три метода для устойчивых резонаторов ($g = 0.5 - 0.9$) имеют незначительные различия. При приближении к неустойчивым (пограничным) геометриям плоскопараллельного ($g = 1$) и конфокального ($g = 0$) резонаторов аналитический метод автора и точный численный метод Фокса-Ли начинают расходиться, что и предполагалось. Интересно, что простой аналитический метод автора практически везде совпадает со сложными аналитическими вычислениями Любимова и Орловой, что говорит о том, что оба метода фактически описывают одинаковые приближённые модели, несмотря на кардинальное различие в подходах.

Показано аналогичное совпадение расчётов автора с расчётами МакКамбера для возмущений типа отверстий в зеркалах.

В подразделе 1.1.2 рассматривается важная для оптимизации ЛСЭ зависимость коэффициента усиления от длины Рэлея резонатора, которая полностью определяет параметры внутрирезонаторной TEM_{00} -моды. Впервые зависимость коэффициента усиления от двух параметров – длины Рэлея и расстройки частоты излучения от резонансного значения записана в виде одной формулы, удобной для оптимизации. Отмечены интересные особенности полученной двумерной функции. Во-первых, для оптимальной длины Рэлея, составляющей четверть (0.255) длины ондулятора, зависимость коэффициента усиления от расстройки частоты сдвинута вправо и максимум усиления наблюдается при расстройке примерно вдвое большей, чем для плоской волны. При расстройке, соответствующей максимуму усиления для квазиплоской волны (этот пример обычно приводится в литературе по ЛСЭ), коэффициент усиления реального резонатора с оптимальной гауссовой модой близок к нулю. Во-вторых, показано, что часто используемый «фактор

заполнения» (filling factor) не является физически обоснованным критерием для оптимизации коэффициента усиления.

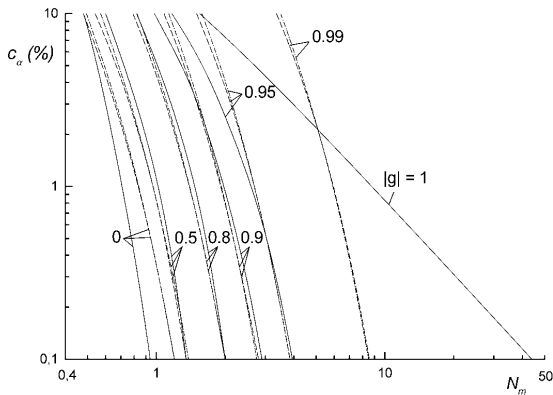


Рисунок 1. Зависимости апертурных потерь ТЕМ₀₀-моды за один проход симметричного резонатора с круглыми зеркалами от апертурного числа Френеля для различных значений параметра g : данные работы Ли (сплошные линии); расчёт автора (штриховые линии); данные работы Любимова и Орловой (штрих-пунктирные линии).

В подразделе 1.1.3 обсуждаются основные критерии оптимизации оптических резонаторов ЛСЭ: оптимизация максимума выходной мощности и максимума ширины рабочего спектрального диапазона ЛСЭ. На основе полученных в подразделах 1.1.1 и 1.1.2 зависимостей может быть найдена оптимальная длина Рэлея при близком к оптимуму коэффициенте вывода полезного излучения. Важным для НЛСЭ является учёт юстировочной неустойчивости: сильный наклон моды, приводящий к увеличению потерь и уменьшению усиления, для заданной погрешности начальной угловой юстировки зеркал (10^{-4}) при уменьшении длины Рэлея. Для НЛСЭ неприемлема ситуация, когда генерация невозможна из-за этого эффекта, поскольку это кардинально усложняет эксплуатацию установки.

В разделе 1.2 рассматриваются гибридные оптические резонаторы, в которых имеются как открытые, так и волноводные участки. Такие резонаторы необходимы, например, для компактных ЛСЭ. В них сверхразмерные полые круглые волноводы используются для проводки излучения через спиральный ондулятор, а волноводы планарной геометрии используются для плоского ондулятора. В приближённой модели предполагается, что излучение внутри полого волновода распространяется в виде одной из низших волноводных мод. Для этой модели точно вычислены специфические потери связи при преобразовании волноводной моды в моды открытого пространства и обратно, которые до этого либо вообще упускались из виду, либо рассчитывались с математическими ошибками.

В подразделе 1.2.1 выписаны характеристики мод полых волноводов из классических работ Маркатили (Marcatili E.A.J.), Шмельтзера (Schmeltzer R.A.) и Краммера (Crammer H.). В подразделе 1.2.2 решена задача о потерях связи в резонаторах с полым круглым волноводом. Найдены три оптимальные области геометрий резонаторов по параметру s/β_0 (s – расстояние между волноводом и зеркалом, β_0 – длина Рэлея для мод свободного пространства при оптимальном разложении): $s/\beta_0 \leq 0.12$, $0.77 \leq s/\beta_0 \leq 1.27$ и $s/\beta_0 \geq 8.3$. На краях первой и третьей областей потери связи стремятся к нулю, а в минимуме второй зоны ($s/\beta_0 = 0.975$) они равны: $c_{opt} = 1.21\%$, $c_{opt} - c_{opt,a} = 0.32\%$ (возмущение моды). В промежутках между оптимальными областями максимальные потери связи для зеркала с оптимальной кривизной равны 7%. Рассмотрено изменение потерь связи при изменении длины волны ЛСЭ.

В подразделе 1.2.3 решена несколько более сложная задача о потерях связи в резонаторах с невырожденным прямоугольным волноводом. Частные вырожденные случаи этой задачи для квадратного и планарного волноводов практически подобны задаче о потерях связи в резонаторах с круглым волноводом. На рисунке 2 показаны некоторые важные зависимости для квадратного и планарного волноводов. Как и для круглого волновода, потери связи и возмущение моды ($c_{opt} - c_{opt,a}$) очень малы для оптимальных зеркал в трёх оптимальных областях.левой области соответствует область малых зазоров между зеркалом и волноводом. Это типичная геометрия волноводных лазерных резонаторов, обычно используемая в газовых волноводных лазерах. Правая область – это область дальней зоны для нормальных гауссовых мод свободного пространства, где их фазы практически одинаковы. Поэтому они возвращаются на торец волновода практически без изменений при помощи сферического зеркала с радиусом кривизны, обращаемым поля гауссовых мод. Эта геометрия обычно используется в лазерах с капиллярным волноводом и может быть полезна для мощных ЛСЭ. Наконец, оптимальная зона вблизи $s/\beta_0 \approx 1$ соответствует конструктивной интерференции основных низших гауссовых мод. Таким образом, видно, что приближённая модель является практически точной для этих трёх оптимальных областей, наиболее интересных для практики, даже для коротких волноводов без использования каких-либо методов фильтрации рабочей волноводной моды.

В разделе 1.3 решена задача об оптимальной выходной связи для пространственно-однородного и неоднородного выводов излучения. Показано, что неоднородный вывод излучения уменьшает выходную связь и максимальную выходную мощность лазера примерно в два раза. Отмечена важность рассматриваемого в главе 5 однородного вывода излучения на основе интерферометра Майкельсона с алмазным делителем.

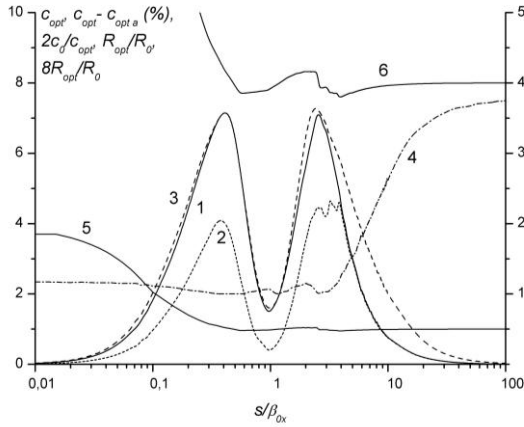


Рисунок 2. Зависимости суммарных потерь связи для оптимального зеркала c_{opt} (1), неапертурной доли потерь связи для оптимального зеркала $c_{opt} - c_{opt a}$ (2), суммарных потерь связи для адаптивного зеркала c_0 (3), величины $2c_0/c_{opt}$ (4), величины R_{opt}/R_0 (5) и величины $8R_{opt}/R_0$ (6) от нормированного расстояния между зеркалом и волноводом. Правая ось ординат соответствует потерям связи для планарного волновода. Адаптивное зеркало имеет радиус кривизны поверхности R_0 , равный радиусу кривизны волновых фронтов нормальных гауссовых мод при оптимальном разложении.

В Главе 2 описано устройство и оптимизация различных оптических резонаторов на основе аналитических методов, изложенных в главе 1. В разделе 2.1 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. Однако геометрические размеры, компоненты основных потерь и эффекты, влияющие на потери и коэффициент усиления, отличаются весьма значительно. Длины всех резонаторов НЛСЭ удовлетворяют условию синхронизма световых импульсов с периодическими сгустками ускоренных электронов, которые синхронизованы с частотой ускоряющих ВЧ-резонаторов. Поэтому они должны быть кратными величинами определённой длины: $n \cdot 6.647$ м ($n=1,2,3\dots$). Выбор длины конкретного резонатора определяется из конструктивных и физических соображений. Для терагерцевого, дальнего инфракрасного и инфракрасного НЛСЭ они равны 26.589, 19.942 и 39.884 м, соответственно.

В разделе 2.2. рассматривается открытый оптический резонатор терагерцевого НЛСЭ. Его устройство показано на рисунке 3. Резонатор

образован круглыми сферическими зеркалами, изготовленными из меди методом высокоточного оптического алмазного точения, с золотым напылением. В центрах зеркал имеются круглые отверстия для вывода излучения и юстировки оптического резонатора. Юстировка резонатора осуществляется при помощи HeNe-лазера и специальной оптической системы. Этот же HeNe-лазер используется и для юстировки каналов вывода излучения.

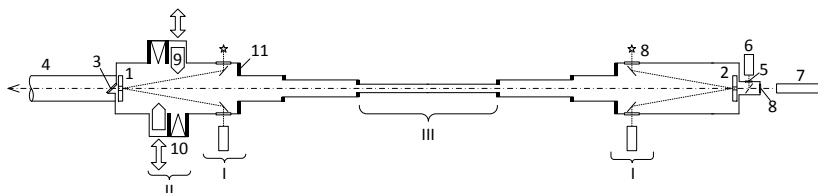


Рисунок 3. Устройство оптического резонатора терагерцевого НЛСЭ: 1, 2 – главные зеркала, 3 – главное выходное окно из синтетического CVD-алмаза, 4 – канал транспортировки излучения, 5 – малое выходное окно из синтетического CVD-алмаза, 6 – пирозлектрический датчик излучения, 7 – юстировочный HeNe-лазер, 8 – оптические окна из кварцевого стекла, 9 – подвижные зеркала-скреперы, 10 – поглотители излучения, 11 – диафрагмы-поглотители (все жирные чёрные линии). Системы: I – оптическая система для юстировки главных зеркал и её контроля, II – внутрирезонаторный калориметр, III – место расположения ондулятора.

Лазерное излучение из вакуума оптического резонатора выводится в атмосферу канала через окна из высококачественного CVD-алмаза. Главное выходное окно для максимального пропускания наклонено под углом Брюстера. Внутрирезонаторный калориметр служит для определения нагрузочных характеристик лазера. Он также используется для модификации резонатора при генерации третьей гармоники излучения. Важнейшими элементами конструкции оптического резонатора являются диафрагмы-поглотители. Их задача – поглощение рассеянного дифракционного «гало»-излучения, возникающего на элементах неоднородного возмущения рабочей моды (наружные диафрагмы и выводные отверстия). Без них оптический резонатор нагревался бы и расстраивался бы от этого излучения. Кроме этого, даже малая доля этого излучения приводит к сильной пространственной модуляции модового распределения интенсивности, что делает непредсказуемой выходную связь и выходную мощность лазера. Оптимизация резонатора состояла в выборе оптимальных геометрических размеров всех оптических элементов с целью получения максимальной выходной мощности лазера в максимально широком спектральном диапазоне.

В разделе 2.3 рассмотрена оптимизация оптического резонатора дальнего инфракрасного НЛСЭ. Она проведена с учётом юстировочной неустойчивости, существенной для этого резонатора. На рисунке 4 показаны некоторые выходные данные этой оптимизации.

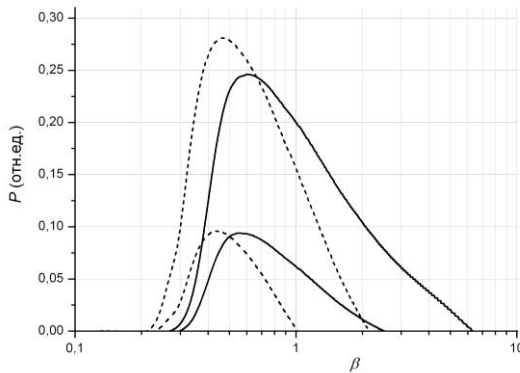


Рисунок 4. Зависимости выходной мощности НЛСЭ дальнего инфракрасного диапазона от нормированной длины Рэлея β ($\beta = L_R/L_u$, L_R – длина Рэлея, L_u – длина ондулятора) для длины волны излучения 100 мкм (сплошные линии) и 30 мкм (пунктирные линии) при коэффициенте усиления $G_0 = 0.5$ (нижние кривые), $G_0 = 1.5$ (верхние кривые) и углом наклона одного из зеркал равном 10^{-4} .

В разделе 2.4 представлена оптимизация инфракрасного НЛСЭ. Ввиду более широкого проектного спектрального диапазона этого НЛСЭ (5 – 30 мкм) для него трудно подобрать геометрию, близкую к оптимуму, одновременно на коротких и на длинных волнах. Поэтому оптимизация была выполнена для середины указанного диапазона. Сильное влияние на выбор оптимальной геометрии этого резонатора оказывает юстировочная неустойчивость.

В разделе 2.5 для общности описания оптимизации лазерных резонаторов рассмотрены волноводные резонаторы для газовых лазеров. В отличие от ЛСЭ, преимущество волноводных резонаторов для газовых лазеров состоит в примерно вдвое большем модовом объеме, чем у открытых резонаторов. Соответственно, примерно во столько же раз увеличивается выходная мощность газового лазера, т.к. его активная среда – газовый разряд занимает больший объём, чем мода. Определены величины допустимых зазоров между волноводом и зеркалами, при которых ещё можно пренебречь потерями связи. Различные газовые лазеры, созданные автором на основе таких волноводных резонаторов, имеют рекордные параметры по выходной мощности и шумам излучения. Они использовались и будут использоваться в различных технологических и метрологических измерениях на НЛСЭ.

В разделе 2.6 описана оптимизация гибридного оптического резонатора компактного ЛСЭ Корейского института исследований в области атомной энергии (KAERI), созданного при участии ИЯФ СО РАН. Особенностью этого КЛСЭ является компактность, которая потребовала использования полого планарного волновода. Гибридная мода резонатора является гауссовым пучком в горизонтальном направлении и TE_1 -модой планарного волновода в вертикальном направлении. Для этой моды найдены соответствующая зависимость коэффициента усиления от длины Рэлея и зависимости потерь на различных её возмущениях. Другой особенностью этого ЛСЭ является существование двух резонансных длин волн, определяемых из специфического условия синхронизма для резонатора с волноводом. Эти резонансные длины волн больше на 10% и на порядок величины по сравнению с резонансной длиной волны без волновода. Они действительно наблюдались в эксперименте: первая – в виде лазерной генерации, вторая – в виде усиленного спонтанного излучения.

В разделе 2.7 рассмотрен эскизный проект гибридного оптического резонатора для мощного ЛСЭ. В отличие от КЛСЭ здесь зеркала далеко отнесены от торцов планарного волновода. Соответственно мы переходим из левой в правую оптимальную зону по потерям связи такого резонатора (рисунок 2). Это сделано для того, чтобы увеличить размер моды и, соответственно, уменьшить лучевую нагрузку на зеркалах, которая не должна превышать 10 кВт/см^2 . Существенным элементом этого резонатора является полупрозрачное тороидальное зеркало в виде тонкой плёнки из CVD-алмаза. Уникальные параметры этого нового оптического материала, подробно изученные в главе 5, позволяют пропускать через такую пластину очень большие мощности в сотни киловатт. Преимуществом такого резонатора перед открытыми резонаторами с малой длиной Рэлея является однородное взаимодействие излучения с электронами и строго фиксированная мода, не зависящая от параметров электронного пучка.

Третья глава посвящена каналам транспортировки излучения от НЛСЭ к рабочим станциям. Задачей каналов является транспортировка с минимальными потерями излучения трёх НЛСЭ, находящихся в радиационно-опасном ускорительном зале, в безопасные помещения пользовательских станций. Для всех каналов выбрана открытая оптическая схема, имеющая наименьшие потери. Их суммарная длина превышает 120 м.

В разделе 3.1 описаны устройство и оптический расчёт каналов. Они представляют собой герметические трубы, внутри которых в настоящее время циркулирует осушенная воздушно-азотная смесь при атмосферном давлении, а в будущем возможно создание вакуума. В поворотах труб находятся плоские и тороидальные зеркала, обеспечивающие оптимальную проводку излучения. Оптический расчёт основан на использовании предложенного автором метода «эквивалентного» гауссова пучка – TEM_{00} -моды

оптимального разложения излучения из круглого отверстия в зеркале оптического резонатора по модам свободного пространства, при котором коэффициент разложения максимален для этой TEM_{00} -моды.

В разделе 3.2 рассматривается поглощение терагерцевого излучения атмосферными парами воды и способы решения этой проблемы. Поглощение терагерцевого излучения парами воды настолько велико для сильных линий, что не может быть устранено полностью для длинных каналов ни одной из современных систем осушки. Однако для «окон прозрачности» воды такая осушка достаточно эффективна. При помощи фурье-спектроскопии на линиях поглощения паров воды было измерено пропускание 34-м участка канала. Показано, что собранная на основе цеолита система осушки обеспечивает практически полное прохождение излучения в окнах прозрачности воды. Однако на самых сильных линиях поглощения проходит только 1/3 – 1/2 часть мощности лазера. Решением проблемы является вакуумный канал, реализация которого предусмотрена конструкцией.

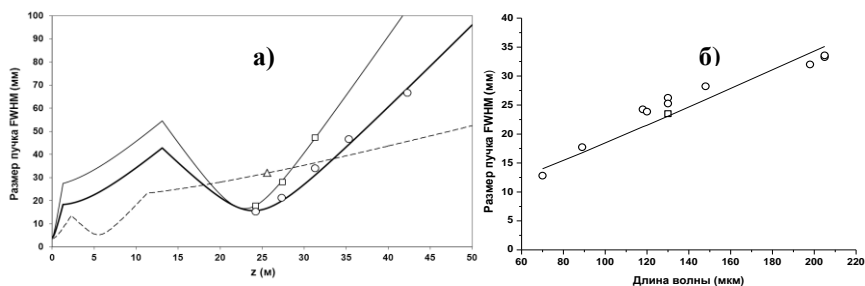


Рисунок 5. Сравнение расчётных (линии) и экспериментальных (точки) размеров пучков: а) – размер пучка на длине волны 130 мкм (толстая сплошная), 198 мкм (тонкая сплошная) и 48 мкм (штриховая) в разных местах канала; б) – размер пучков на разных длинах волн на метрологической станции ($z = 27.6$ м).

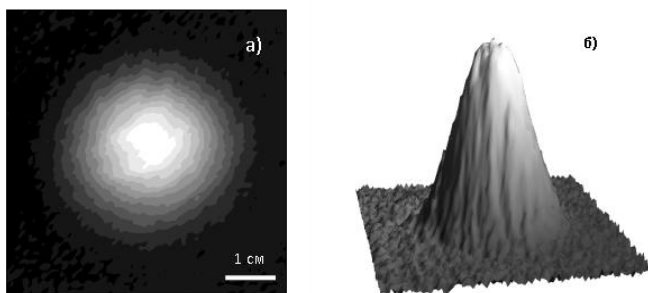


Рисунок 6. Распределение интенсивности излучения дальнего инфракрасного НЛСЭ с длиной волны 48 мкм на метрологической станции ($z = 25.6$ м). Разница интенсивностей соседних контуров на левом рисунке (а) равна 8%.

В разделе 3.3 представлено сравнение расчётных и экспериментальных пучков. Оно проиллюстрировано на рисунках 5 и 6 для первого укороченного варианта канала.

В Главе 4 описаны приборы и методы диагностики излучения НЛСЭ. 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, которые могут быть весьма неповторяющимися в неустойчивом режиме. Поэтому для корректных измерений в этих режимах требуются сверхбыстрые (15 – 20 пс) методы измерения формы отдельных импульсов и методы измерения спектров излучения в отдельных импульсах.

В разделе 4.2 рассматриваются измерения длины волны и структуры спектра излучения с усреднением по многим импульсам. Эти параметры измеряются сеточными интерферометрами Фабри-Перо (подраздел 4.2.1), спектрометром на дифракционных решетках (4.2.2) и фурье-спектрометром фирмы «Брукер» (4.2.3), которые были оптимальными и применялись в определённых экспериментах. В подразделе 4.2.4 описаны фильтры для мощного излучения НЛСЭ, а в подразделе 4.2.5 – использование универсального газового лазера для калибровки спектральных приборов.

В разделе 4.3 описываются измерения средней мощности терагерцевого излучения эталонным сапфировым калориметром (подраздел 4.3.1), оперативным калориметром мощного терагерцевого излучения (4.3.2) и внутрирезонаторным калориметром НЛСЭ (4.3.3). Интересной объединяющей особенностью всех этих приборов является использование в качестве поглотителя одного и того же химического материала – двуокиси алюминия (Al_2O_3) в двух структурных модификациях: кристаллического сапфира и напылённого газодинамическим способом корундовой керамики. Оптические параметры этих материалов были тщательно измерены и являются оптимальными для созданных приборов. Каждый из этих приборов служит для выполнения определённой задачи, поэтому они являются фактически взаимодополнительными. В частности, рекордные средние мощности терагерцевого НЛСЭ (510 ± 10 Вт на частоте повторения импульсов 22.5 МГц и 312 ± 6 Вт на частоте 5.6 МГц) были измерены сапфировым калориметром.

В разделе 4.4 описана задача измерения импульсной мощности и структуры отдельных световых импульсов. В ряде экспериментов (измерение добротности оптического резонатора, пользовательские эксперименты с синхронным детектированием мощности по импульсам НЛСЭ) оптимальными являются быстрые детекторы, отображающие импульсы НЛСЭ в интегрированном виде. Такие измерения проводятся при помощи высокочувствительных детекторов на диоде Шоттки с резонансной антенной (подраздел 4.4.1). В других экспериментах (измерение неустойчивостей,

измерение максимальной импульсной мощности) требуются сверхбыстрые детекторы с субимпульсным временным разрешением. Для этого служат сверхбыстрые детекторы на диоде Шоттки, описанные в подразделе 4.4.2. В подразделе 4.4.3 дано описание импульсных параметров излучения НЛСЭ, измеренных сверхбыстрым детектором в реальном времени. На рисунке 7 показано одно из таких измерений. Там же приведено сравнение с быстрыми, но стробоскопическими измерениями. Видно, что в отличие от сверхбыстрых измерений в реальном времени стробоскопические измерения не отражают истинной картины в неустойчивых режимах с неповторяющимися импульсами.

На основе измерений средней мощности и сверхбыстрых измерений формы импульса можно выделить импульсную мощность НЛСЭ в любом режиме. Её максимальная величина, для справки, составляет 0.84 МВт.

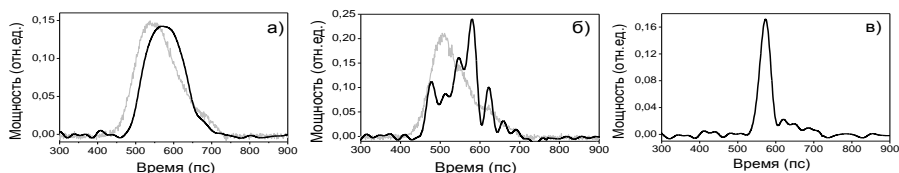


Рисунок 7. Характерные виды импульсов терагерцевого НЛСЭ: а) – в стабилизированном режиме, б) – в неустойчивом резонансном режиме, в) – в режиме с положительной отстройкой частоты повторения электронных импульсов относительно частоты световых импульсов. Чёрные кривые – импульсы при прямом детектировании в реальном времени, серые – стробоскопические измерения.

В разделе 4.5 рассмотрена задача сверхбыстрой спектроскопии отдельных импульсов НЛСЭ. Эта диагностика требуется для неустойчивых режимов, в которых спектры отдельных импульсов, как и их временная форма, могут сильно различаться. Заметим, что в этом случае спектры нельзя вычислять по форме импульса, т.к. время когерентности в неустойчивом режиме меньше длительности импульса. Для корректного измерения спектра требуется измерять как амплитуду, так и фазу в импульсе, т.е. использовать комплексное фурье-преобразование временного сигнала. Схема сверхбыстрого time-domain спектрометра показана на рисунке 8.

Спектрометр построен по гетеродинной схеме для переноса частот в измеримый гигагерцевый диапазон. Гетеродином является всегда присутствующая в излучении лазера мода на основной резонансной частоте, которая выделяется интерферометром Фабри-Перо. Амплитуда и фаза импульса излучения восстанавливаются по одновременным измерениям 2-х (или 4-х) интерференционных сигналов гетеродина и сдвинутыми по фазе на $\pi/2$ измеряемыми сигналами со скрещенными поляризациями. На рисунке 9 для иллюстрации показаны спектры различных импульсов НЛСЭ в

неустойчивом резонансном режиме, когда в спектре излучения, кроме основной частоты, может присутствовать тот или иной набор гармоник на боковых частотах. Для сравнения показан также спектр, снятый фурье-спектрометром, на котором не видно мод на боковых частотах.

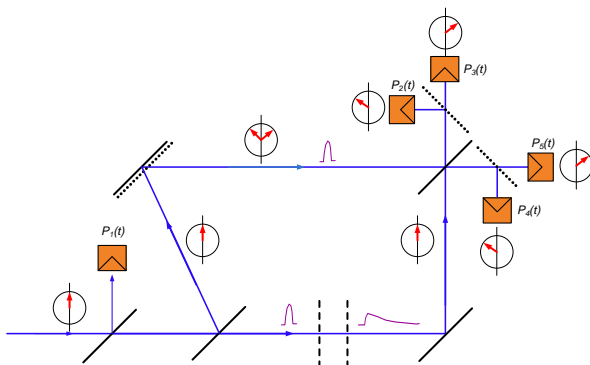


Рисунок 8. Схема сверхбыстрого спектрометра: квадраты – сверхбыстрые детекторы Шоттки, направление поляризации – стрелки в кружках, зеркала и поляризационно-однородные делители пучка – сплошные линии, поляризаторы – пунктирные, интерферометр Фабри-Перо – две штриховые линии.

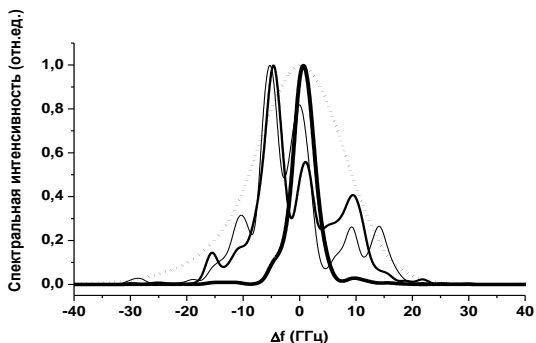


Рисунок 9. Спектры отдельных импульсов терагерцевого НЛСЭ в неустойчивом режиме (сплошные линии) и усредненный спектр фурье-спектрометра (пунктир).

В разделе 4.6 рассмотрены задачи измерения и визуализации пучков излучения НЛСЭ. В подразделе 4.6.1 описана система на основе термофлюоресцентных экранов, предназначенная для работы с мощными пучками размером до 150 мм (рисунок 6). В подразделе 4.6.2 рассмотрена дополнительная к ней система на основе пироэлектрической матрицы с гораздо более высокой (в 10^3 раз) чувствительностью. Недостатком системы являются неизбежные дифракционные искажения при необходимом из-за

малого размера матрицы уменьшении пучков, которые, однако, можно свести к приемлемому уровню, используя рассмотренную в диссертации оптимизацию оптики. В подразделе 4.6.3 описаны чувствительные системы крупноформатного сканирования на основе отдельных пиродетекторов, использующиеся в отдельных измерениях пучков малой интенсивности.

В разделе 4.7 представлены регулируемые ослабители мощного излучения НЛСЭ поляризационного (4.7.1) и дифракционного (4.7.2) типов.

В Главе 5 описаны эксперименты с излучением НЛСЭ. В эту главу, во-первых, включены диагностические эксперименты по определению основных лазерных параметров установки и режимов её работы, включая оптимизацию излучения 2-й и 3-й гармоник. Далее, это технологические эксперименты по определению оптических параметров принципиально важных для установки материалов. Наконец, это выборочные физические эксперименты, в которых демонстрируется и используется хотя бы одно из уникальных свойств излучения НЛСЭ: плавная перестройка длины волны в широком диапазоне, большая импульсная мощность, большая импульсная спектральная мощность, большая средняя мощность в непрерывном режиме излучения.

В разделе 5.1 описаны измерения феноменологических лазерных параметров НЛСЭ. В подразделе 5.1.1 рассмотрены эксперименты по измерению потерь в оптических резонаторах НЛСЭ. Для иллюстрации на рисунке 10 приведен один из измеряемых сигналов затухающих световых импульсов после выключения электронного пучка (стрелка) и общая картина измеренных потерь в номинальном оптическом резонаторе терагерцевого НЛСЭ. Видно хорошее соответствие расчёта и эксперимента. Таким образом, теория расчёта открытых резонаторов, изложенная в главе 1, подтверждается не только сравнением с другими расчётами, но и прямыми экспериментами.

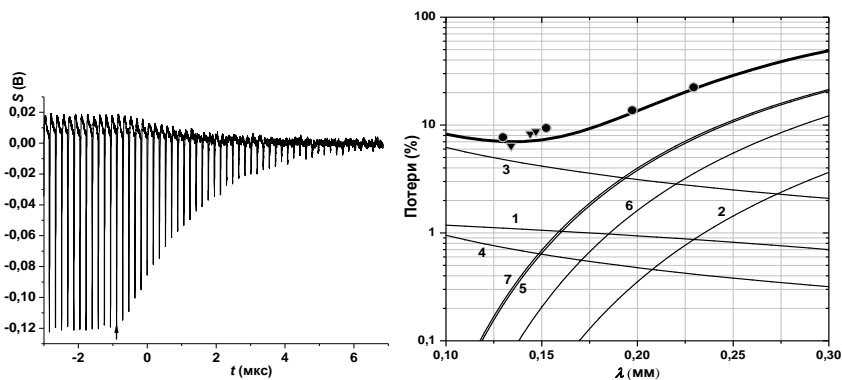


Рисунок 10. Потери в оптическом резонаторе терагерцевого НЛСЭ: слева – сигнал затухающих световых импульсов; справа – экспериментальные (точки) и расчётные (жирная линия) потери. Кривые с номерами – различные компоненты потерь.

В подразделе 5.1.2 приведены измерения коэффициента усиления и интенсивности насыщения активной среды НЛСЭ. Рассмотрены разные способы измерения коэффициента усиления. Наиболее точный метод использует кратное уменьшение частоты повторения электронных импульсов, эквивалентное такому же увеличению потерь в оптическом резонаторе. Показано, что «нагрузочные» зависимости для НЛСЭ терагерцевого и дальнего инфракрасного диапазонов хорошо соответствуют простой классической модели для лазеров с однородным частотным уширением активной среды.

В подразделе 5.1.3 определены оптимальные коэффициенты выходной связи. Подробно рассмотрен вариант однородного вывода излучения при помощи интерферометра Майкельсона с алмазным делителем. Показано, что в этом случае выходные мощности НЛСЭ увеличиваются более чем в 2 раза.

В разделе 5.2 рассмотрены характерные режимы работы терагерцевого НЛСЭ. В качестве критерия различия здесь выступают спектры излучения, форма световых импульсов и когерентность в пределах импульса. В подразделе 5.2.1 описаны наблюдаемые в НЛСЭ виды неустойчивостей, влияющие на эти параметры. Показано, что в НЛСЭ, особенно при большом усилении, при точном совпадении частот повторения электронных и световых импульсов могут возникать два вида неустойчивостей, проявляющиеся в спектрах в виде появления боковых частот (мод) излучения. Первая неустойчивость – это хорошо известная в теории ЛСЭ неустойчивость боковых частот (side-band instability) на «захваченных» электронах, обусловленная нелинейной связью ондуляторных колебаний электронов с их колебаниями в поле электромагнитной волны при насыщении. Эта неустойчивость приводит к дроблению импульса на некогерентные между собой субимпульсы длительностью, равной длине проскальзывания, поделённой на скорость света. В спектре излучения появляются боковые частоты, разделённые интервалами $\Delta\nu \approx 30$ ГГц. Другая неустойчивость, пока неустановленной природы, имеет $\Delta\nu \approx 6$ ГГц (рисунок 9) и условно названа модуляционной неустойчивостью. При этом для практики наиболее важно, что существует эффективный способ подавления обеих неустойчивостей путём введения отрицательной отстройки частоты повторения электронных импульсов относительно частоты повторения световых импульсов в оптическом резонаторе. При этом работает универсальный механизм стабилизации, использующийся во многих областях физики, – «сглаживание» возмущений за счёт сдвига их фазы в разных импульсах.

В подразделе 5.2.2 подробно описаны многочисленные эксперименты по наблюдению неустойчивости боковых частот на «захваченных» электронах. Показано, что в резонансном режиме (при котором мощность лазера максимальна) может наблюдаться сильно неустойчивый режим с конкуренцией мод на боковых частотах, уширенным спектром и временем когерентности равном длительности субимпульса (около 1/5 длительности

импульса). При введении небольшой стабилизирующей отстройки этот режим превращается в стабильную многомодовую генерацию с длительностью когерентности равной длительности импульса (набор узких спектральных мод). Наконец, при введении определенной стабилизирующей отстройки ($\Delta f/f \approx -2 \cdot 10^{-5}$) в НЛСЭ реализуется классический режим одномодовой генерации со спектральной шириной лазерной линии, соответствующей длительности полностью когерентного светового импульса – так называемый фурье-предел.

В подразделе 5.2.3 описаны особенности модуляционной неустойчивости, главной из которых является генерация раздвоенных импульсов.

В разделе 5.3 рассмотрена генерация терагерцевого НЛСЭ на высших гармониках, важная для расширения спектрального диапазона его излучения. Специально проделанные эксперименты позволили получить усиленное спонтанное излучение 2-й и 3-й гармоник процентного уровня мощности от первой гармоники и лазерное излучение в длинноволновой части его диапазона. В подразделе 5.3.1 подробно описаны эксперименты с усиленным спонтанным излучением. Показано, что в резонансном режиме, где мощность первой гармоники максимальна, мощности гармоник очень малы – на уровне спонтанного излучения. В стабильной зоне, при отрицательной отстройке частоты $\Delta f/f \approx -2 \cdot 10^{-5}$ мощности гармоник достигают максимума в 0.6% для третьей гармоники и 1.5 % для второй.

В подразделе 5.3.2 описана лазерная генерация терагерцевого НЛСЭ на третьей гармонике, которая достигается при коэффициенте усиления, превышающем потери для этой гармоники. Поскольку поперечный размер моды третьей гармоники заметно меньше размера моды первой гармоники, можно небольшими наклонами зеркал изменять соотношение потерь этих гармоник. Соответственно, можно изменять соотношение выходных мощностей этих гармоник, не изменяя конструкции резонатора. Максимальная мощность лазерного излучения на третьей гармонике была примерно такой же, как у первой гармоники. Пучок излучения третьей гармоники был гауссовой формы, а его размер соответствовал расчёту, изложенному в главе 3.

В разделе 5.4 описаны работы, связанные с синтетическими алмазами, изготовленными по CVD (Chemical Vapor Deposition) технологии. В подразделе 5.4.1 рассмотрена актуальность измерения оптических параметров CVD-алмазов в спектральном диапазоне НЛСЭ. Эта актуальность обусловлена двумя обстоятельствами. Во-первых, алмазы от разных производителей имеют сильно различающиеся параметры. Поэтому здесь совершенно необходим входной контроль поставляемых изделий. Во-вторых, известные из литературы оптические параметры CVD-алмазов в терагерцевом диапазоне имели недостаточную для мощных лазеров точность. Поэтому были проведены комплексные измерения при помощи различных

оптимальных методик. В подразделе 5.4.2 описаны эксперименты на универсальном газовом лазере, оптимальные для калибровочных измерений пропускания алмазных пластин. В подразделе 5.4.3 описаны широкодиапазонные измерения на фурье-спектрометре, которые при необходимости могли быть скорректированными по измерениям на газовом лазере. В подразделе 5.4.4 описаны измерения алмазных пластин на мощном излучении НЛСЭ, которые были оптимальными для определения основного параметра разрушения этих пластин – поглощения в материале. Точность определения этого параметра была увеличена в 20 раз по сравнению с предыдущими измерениями других авторов. Для справки, коэффициент поглощения в материале пластин компании ElementSix (DeBeers) на длине волны 130 мкм оказался равным $0.0677 \pm 0.003 \text{ см}^{-1}$.

В подразделе 5.4.5 рассмотрены применения алмазных пластин. Благодаря своим уникальным физическим свойствам, алмаз кардинально отличается от других оптических материалов. Предельная проходящая мощность гауссова пучка через пластину из произвольного материала зависит только от параметров этого материала. Для алмаза они таковы, что эта мощность более чем на порядок превышает аналогичную мощность для всех других оптических материалов в широком спектральном диапазоне, за исключением области его фоновонного поглощения (длины волн 2.5 – 7 мкм). В длинноволновой части диапазона НЛСЭ алмаз позволяет пропускать мощности в сотни киловатт. Это позволяет в перспективе сделать из него системы однородного вывода излучения и в 2-3 раза увеличить выходную мощность лазера.

В разделе 5.5 рассмотрены эксперименты с мощным терагерцевым излучением. В подразделе 5.5.1 кратко описана терагерцевая лазерная абляция материалов, которая в настоящее время интенсивно используется во многих пользовательских экспериментах. Спецификой терагерцевой абляции на НЛСЭ является малая величина кванта излучения по сравнению с другими мощными лазерами. Это позволяет в специальных экспериментах проводить неразрушающую абляцию молекул.

В подразделе 5.5.2 представлены эксперименты с оптическим пробоем, переходящим в определённых условиях в квазинепрерывный оптический разряд. Для этого эксперимента требуются интенсивности излучения около 1 ГВт/см^2 (напряженности поля излучения $\sim 1 \text{ МВ/см}$). Были проведены важные для практики метрологические измерения пробойных интенсивностей для атмосферных газов. Отличительной особенностью развитого плазменного оптического разряда является его гораздо более высокая температура, чем у других видов разряда. Наши измерения показали, что она достигает $20000 \text{ }^\circ\text{К}$. Другой особенностью этого разряда являются автоколебания как на звуковых (5 – 10 кГц), так и на высоких частотах (150 – 200 кГц).

В подразделе 5.5.3 описывается друммондов свет – специфическое излучение сильно нагретой термостойкой окиси кальция, образующийся во многих экспериментах с твёрдыми материалами. Несмотря на 200-летнюю историю друммондова света, его природа так и не была выявлена. В результате проделанных на терагерцевом НЛСЭ экспериментов по оптической спектроскопии и лазерному рассеянию было установлено, что это излучение является специфическим видом чисто теплового излучения. Его специфика состоит в том, что окись кальция, при низких температурах являющаяся плохо излучающим «белым» телом, при нагреве до критической температуры в 2000 °К резко превращается в идеальное «чёрное» тело с соответствующим увеличением интенсивности оптического излучения на порядок величины. Микроскопической природой такого феноменологического поведения окиси кальция, скорее всего, является её «металлизация» при критической температуре, вследствие которой у зоны проводимости CaO образуются донорные уровни Ca, эффективно поглощающие видимый свет.

В подразделе 5.5.4 рассмотрен оптико-акустический эффект в газах производимый мощным излучением НЛСЭ. Когда длина волны излучения лазера попадает на сильную линию поглощения в газе (обычно – линию паров воды) и кроме этого излучение лазера промодулировано по амплитуде на низкой частоте (обычно – технические пульсации систем питания), возникает достаточно мощный звук, т.к. длина звуковой волны оказывается больше, чем характерный размер области поглощения. В диссертации показано, что спектр звука фактически повторяет спектр низкочастотной модуляции мощности лазера – в настоящее время в основном 800 Гц пульсаций. Сильным источником звука является также плазма оптического разряда, создающая модуляции давления на границе плазмы с окружающим её газом, как из-за технических модуляций мощности лазера, так и из-за автоколебаний, присущих этому виду разряда.

В разделе 5.6 рассмотрена сверхбыстрая терагерцевая газовая спектроскопия. Она является примером идеального эксперимента для НЛСЭ, поскольку в ней используются все четыре уникальных свойства излучения этой установки. Благодаря этому, а также разработанным уникальным приборам и методикам, сверхбыстрая спектроскопия позволяет проводить специфические исследования неустойчивых неповторяющихся в деталях процессов (подобных рассмотренному в разделе 4.5) и принципиально однократных явлений. Таким образом, этот метод является дополнительным к известному арсеналу различных спектральных методов, которые невозможно использовать в вышеуказанных случаях.

В подразделе 5.6.1 описывается основа сверхбыстрой газовой спектроскопии – свободная оптическая (терагерцевая) индукция молекулярных переходов. После возбуждения коротким лазерным импульсом

молекула, колеблясь на собственных резонансных частотах, излучает характерное излучение – излучение свободной оптической индукции. Поскольку молекулы возбуждаются когерентным излучением лазера, их последующее излучение также когерентно, т.е. может быть описано введением соответствующего комплексного показателя преломления для газовой среды. В качестве иллюстрации на рисунке 11 показано подобное излучение молекул НВг. Осцилляции мощности излучения свободной индукции являются характерным «отпечатком» молекулы и могут быть использованы для её идентификации в аналитической спектроскопии с использованием баз данных для сигналов молекул. Как показано в диссертации, для молекул со сложным спектром излучения погрешность их определения в газовой смеси из N компонентов порядка $1\% \cdot N$. В конце подраздела рассмотрены примеры и большие перспективы для развития метода использования магнитного поля.

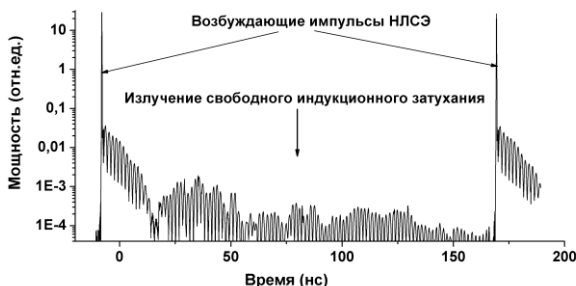


Рисунок 11. Излучение свободного индукционного затухания молекул газовой изотопической смеси $\text{H}^{79}\text{Br}/\text{H}^{81}\text{Br}$ между двумя возбуждающими импульсами НЛСЭ.

В случае общей спектроскопии, рассматриваемой в подразделе 5.6.2, нужно определить априори неизвестные спектры. Для этого требуется измерять как минимум два сдвинутых по фазе сигнала, т.к. комплексный показатель преломления среды изменяет как амплитуды, так и фазы спектральных компонентов. Такие измерения возможны при помощи поляризационного спектрометра, изображенного на рисунке 8, когда в его верхнее плечо помещается исследуемый газовый объект, а в нижнем плече устанавливается гетеродин на основе либо интерферометра Фабри-Перо (как на рисунке 8), либо кюветы с газом, имеющим простой спектр в виде отдельных линий (HCN , CO и др.). Работа сверхбыстрого спектрометра была проверена на различных стабильных газовых образцах. Получены спектральные разрешения от 800 до 60 000 для времён измерения полезного сигнала после возбуждающего импульса от 0.4 до 25 нс, что хорошо соответствует теоретическому пределу фурье-преобразования.

В заключении приведены основные результаты работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы следующие:

1. Разработаны методы аналитического приближенного расчёта оптических лазерных резонаторов открытого, волноводного и гибридного типов.

Разработанные методы позволяют элементарно рассчитывать основной параметр оптического резонатора – потери за круговой обход, используя аналитические выражения, параметрами которых являются геометрические размеры элементов резонатора. Методы имеют достаточную для практики погрешность (не более 15 %) для малых потерь резонатора (до 20% за круговой обход), причём точность методов растёт с уменьшением потерь резонатора, т.е. при приближении к оптимальной геометрии. В других случаях методы дают приблизительную оценку потерь.

2. Методы аналитического приближенного расчёта использованы для расчёта, оптимизации и создания оптических резонаторов для четырёх ныне успешно функционирующих лазеров на свободных электронах и универсального сверхмалощумящего газового лазера с рекордными параметрами.

Кардинальными отличиями разработанных методов от других известных методов являются их универсальность (возможность применения к различным типам потерь в различных видах оптических резонаторов) и аналитический вид этих потерь (в виде формул). Эти два отличия позволили решить обратные задачи поиска оптимальных геометрий резонаторов, обеспечивающих заданные (минимальные) величины потерь, в то время как другие известные методы, являясь численными, позволяют решать только прямую задачу – нахождение потерь для заданной геометрии.

3. Разработан простой метод оптического расчёта каналов транспортировки излучения от НЛСЭ к пользовательским станциям – метод эквивалентного гауссова пучка. С его помощью были рассчитаны, а затем созданы три транспортных канала открытого типа. Проведенные многочисленные измерения пучков излучения в различных местах этих каналов показали, как хорошее соответствие их распределений интенсивности предполагаемой гауссовой форме, так и близость экспериментальных и расчётных размеров пучков.

Методом фурье-спектроскопии измерено ослабление излучения в транспортных каналах на остаточных парах воды для используемой в настоящее время системе осушки азотно-воздушной смеси на основе цеолита. Показано, что в “окнах” прозрачности смеси ослаблением излучения можно пренебречь, в то время как при настройке длины волны НЛСЭ на самые сильные линии поглощения водяных паров ослабление на 34 метрах

возрастает до 2-3 раз. От этого недостатка свободен вакуумный вариант каналов, который уже заложен в их конструкцию. Однако его реализация требует дополнительных капиталовложений (дорогие алмазные окна и дополнительные параболические зеркала).

4. Созданы различные приборы для измерения терагерцевого и инфракрасного излучения, многие из которых – оригинальные разработки.

Все параметры излучения НЛСЭ измеряются с максимальной точностью при помощи наиболее прямых методов с минимальной обработкой. Кроме этого, для различных задач созданы разные оптимальные методики и приборы для измерения одного и того же параметра: мощности, спектра или распределения излучения.

Наиболее уникальные методики созданы для коммерчески не освоенного до сих пор терагерцевого диапазона. Это различные виды калориметров, сверхбыстрое детектирование импульсов и их сверхбыстрая спектроскопия с временным разрешением около 15 псек, системы крупноформатной визуализации пучков размером до 150 мм и др.

5. Проведены серии различных экспериментов с целью выявления различных режимов работы НЛСЭ и измерения основных параметров его излучения, в том числе его феноменологических лазерных параметров: потерь в оптических резонаторах, коэффициента усиления и интенсивности насыщения активной среды.

Впервые в практике экспериментов на ЛСЭ одновременно измерялись временная структура импульсов, их спектры и когерентность в пределах импульса. Показано, что режим НЛСЭ в зависимости величины стабилизирующего фактора – отстройки частоты повторения электронных импульсов от резонансной частоты обращения светового импульса внутри оптического резонатора, изменяется от полностью когерентного монохроматического режима к режиму когерентной генерации нескольких мод на резонансной и боковых частотах и затем, при нулевой отстройке, к частично когерентному (в пределах длины проскальзывания) неустойчивому режиму с конкуренцией основной и боковых мод.

Измеренные потери в созданных оптических резонаторах хорошо согласуются с расчётными значениями, что, помимо сравнения с другими расчётными методиками, является прямым подтверждением правильности используемых расчётных методов.

6. Получено и оптимизировано усиленное спонтанное излучение на второй и третьей гармониках НЛСЭ, в том числе лазерная генерация на третьей гармонике.

Экспериментально показано, что в отличие от основной первой гармоники, усиленное спонтанное излучение на второй и третьей гармониках сильно зависит от когерентности в пределах импульса излучения. Так в устойчивом полностью когерентном режиме излучение гармоник достигает

величины в несколько процентов от мощности первой гармоники, в то время как в резонансном неустойчивом режиме, в котором излучение первой гармоники максимально, оно уменьшается до величины $10^{-6} - 10^{-4}$.

В длинноволновой части диапазона терагерцевого НЛСЭ достигнуто превышение усиления над потерями и лазерная генерация на 3-й гармонике с такой же мощностью как у первой гармоники. Манипуляциями устройств оптического резонатора удавалось получать излучение только на первой гармонике, только на третьей гармонике и одновременную генерацию на обеих этих гармониках в различных пропорциях.

7. Проведены измерения оптических параметров новых материалов (CVD-алмазов, газодинамически напылённого корунда и др.) и поляризаторов, необходимых для создания оптических резонаторов и приборов на НЛСЭ.

Гораздо более точно, чем это было сделано ранее, измерены оптические параметры перспективного и практически незаменимого для терагерцевой области оптического материала – синтетического CVD-алмаза. В частности, точность измерения поглощения в материале улучшена в 20 раз, благодаря прямым калориметрическим измерениям на мощном излучении терагерцевого НЛСЭ. Эти данные вошли в изданные за рубежом справочники по применениям CVD-алмазов. Показано, что алмазы от разных производителей имеют весьма различные потери на рассеяние и поглощение в материале. Алмазы наилучшего качества уже сейчас удовлетворяют потребностям НЛСЭ, за исключением неустраиваемой спектральной зоны двух- и трёх-фононного поглощения.

8. Проведены уникальные эксперименты с мощным терагерцевым излучением: абляция, оптический разряд, оптико-акустический эффект, друммондов свет, сверхбыстрая спектроскопия излучения НЛСЭ и молекул в газовой фазе.

Терагерцевая лазерная абляция, продемонстрированная уже в первых экспериментах на НЛСЭ, имеет существенную особенность, состоящую в малой величине кванта излучения по сравнению с инфракрасным и тем более оптическим излучением. Это позволяет при определённых условиях проводить перевод сложных молекул из жидкого и твёрдого состояния в газообразную фазу без их разрушения, что нашло применение во многих химических и биологических приложениях.

На НЛСЭ впервые в мире получен квазинепрерывный терагерцевый оптический разряд. Плазма в оптическом разряде имеет более высокую температуру и чистоту состава, чем в дуговом разряде. Она может найти применение как качественный точный источник мощного ультрафиолетового излучения для фотолитографии, быть источником излучения гармоник, а возбуждаемые в ней колебания и волны могут быть полезными в модельных экспериментах по газовой-плазменной динамике.

Перспективным для синтеза новых материалов, например, нанотрубок и фуллеренов, может быть совместное действие абляции и оптического разряда.

Наблюдаемый без приборов сильный оптико-акустический эффект позволяет просто (по звуку) контролировать нахождение линии излучения НЛСЭ в окне прозрачности атмосферы и может быть использован в простых и чувствительных газовых анализаторах.

В экспериментах на терагерцевом НЛСЭ была выявлена истинная природа яркого друммондова света, состоящая в том, что окись кальция в процессе нагревания при температуре 2000°К превращается из “идеального белого” тела в “идеальное чёрное” тело с соответствующим увеличением излучаемого видимого света на порядок величины. Аналогичный эффект наблюдается и для других белых окислов металлов. Эти данные используются сейчас научными группами, занимающимися разработкой термостойких материалов для различных применений.

Большая импульсная мощность терагерцевого НЛСЭ и разработанная аппаратура (сверхбыстрые детекторы Шоттки, интерферометры Фабри-Перо, поляризационный интерферометр Маха-Цандера) позволили создать метод сверхбыстрой одноимпульсной спектроскопии. Этим методом впервые в практике ЛСЭ измерены спектры отдельных импульсов излучения в различных режимах. Показано, что наблюдаемое другими спектроскопическими методами уширение спектральной линии излучения НЛСЭ в неустойчивом режиме, на самом деле имеет модовую структуру с определёнными боковыми частотами и эта структура различна для разных импульсов. Таким образом, в прямом эксперименте продемонстрировано, что сверхбыстрая спектроскопия незаменима при измерении неустойчивых процессов и многократных явлений, для которых она и была создана. На различных примерах спектров молекул в газовом состоянии показаны реализации этого метода при различном пропорциональном времени измерения спектральном разрешении от 10^3 до 10^5 .

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Кубарев В.В., Куренский Е.А. Сверхмалошумящий H_2O -лазер с высокочастотной накачкой. Квантовая электроника 22 (1995) 1179-1183.
2. Кубарев В.В., Куренский Е.А. Сверхмалошумящий мощный DCN-лазер с высокочастотной накачкой. Квантовая электроника 23(4) (1996) 311-314.
3. Кубарев В.В. Ксенон как эффективный буферный газ субмиллиметровых лазеров на колебательно-вращательных переходах. Квантовая электроника 23 (1996) 197-198.
4. Кубарев В.В. Потери связи в лазерных резонаторах с полым прямоугольным или планарным волноводом. Квантовая электроника 25(5) (1998) 419-423.

5. Кубарев В.В. Оптимальные лазерные резонаторы с полым круглым волноводом. *Квантовая электроника* 37(3) (1999) 241-245.
6. Кубарев В.В. Принцип Бабинне и дифракционные потери в лазерных резонаторах. *Квантовая электроника* 30(9) (2000) 824-826.
7. Jeong Y.U., Lee. B.C., Kim S.K., Cho S.O., Cha B.H., Lee J., Kazakevich G.M., Vobly P.D., Gavrilo N.G., Kubarev V.V., Kulipanov G.N. First lasing of the KAERI compact far-infrared free-electron laser driven by a magnetron-based microtron. *Nucl Instr & Meth A* 475 (2001) 47-50.
8. Jeong Y.U., Kazakevich G.M., Lee. B.C., Cho S.O., Yoo J., Gavrilo N.G., Kubarev V.V. Upgrade of a compact FIR FEL driven by a magnetron-based microtron for the wavelength range of 100-300 μm . *Nucl Instr & Meth A* 507 (2003) 125-128.
9. Kubarev V.V., Kazakevich G.M., Jeong Y.U., Lee B.J. Quasi-optical highly sensitive Schottky-barrier detector for a wide-band FIR FEL. *Nucl Instr & Meth A* 507 (2003) 523-526.
10. Kubarev V.V., Persov B.Z., Vinokurov N.A., Davidov A.V. Optical resonator of powerful free-electron laser. *Nucl Instr & Meth A*. 528 (2004) 199-202.
11. Bolotin V.P., Cherkassky V.S., Igumenov I.K., Kayran D.A., Knyazev B.A., Kolobanov E.I., Kotenkov V.V., Kubarev V.V., Kulipanov G.N., Kuryshev G.L., Matveenko A.N., Medvedev L.E., Miginsky S.V., Mironenko L.A., Oreshkov A.D., Ovchar V.K., Petrov A.K., Popik V.M., Salikova T.V., Serednyakov S.S., Skrinisky A.N., Shevchenko O.A., Scheglov M.A., Vinokurov N.A., Zaigraeva N.S. Status of the Novosibirsk free electron laser and first experiments with high power terahertz radiation, Proc 1st Intern Conf on Sub-mm Sci & Techn, 13-15 October 2004, Ahmedabad, India, pp.1-8.
12. Kubarev V.V., Kolobanov E.I., Kotenkov V.V., Kulipanov G.N., Matveenko A.N., Medvedev L.E., Oreshkov A.D., Popik V.M., Salikova T.V., Serednyakov S.S., Shevchenko O.A., Scheglov M.A., Vinokurov N.A. High resolution mesh Fabry-Perot interferometers in experiments on free electron and gas lasers. Proc Intern Conf IRMMW-THz-2005, September 19-23, 2005, Williamsburg, USA, pp. 194-195.
13. Bolotin V.P., Knyazev B.A., Kolobanov E.I., Kotenkov V.V., Kubarev V.V., Kulipanov G.N., Matveenko A.N., Medvedev L.E., Oreshkov A.D., Persov B.Z., Popik V.M., Salikova T.V., Serednyakov S.S., Shevchenko O.A., Scheglov M.A., Vinokurov N.A. Quasi-continuous sub-millimeter optical discharge on Novosibirsk free electron laser: experiments and elementary theory. Proc Intern Conf IRMMW-THz-2005, 19-23 September 2005, Williamsburg, USA, p. 126-127.
14. Kubarev V.V., Vinokurov N.A., Kotenkov V.V., Kulipanov G.N., Matveenko A.N., Salikova T.V., Serednyakov S.S., Scheglov M.A. Observation of sideband instability in the Novosibirsk terahertz free electron laser. Proc Intern Conf IRMMW-THz-2006, Shanghai, China, September 18-22, 2006, p. 415.

15. Kubarev V.V., Vinokurov N.A., Kotenkov V.V., Kulipanov G.N., Matveenko A.N., Salikova T.V., Serednyakov S.S., Scheglov M.A. Harmonic Generation in the Novosibirsk Terahertz Free Electron Laser. Proc Intern Conf IRMMW-THz-2006, Shanghai, China, September 18-22, 2006, p.162.
16. Gavrilov N.G., Knyazev B.A., Kolobanov E.I., Kotenkov V.V., Kubarev V.V., Kulipanov G.N., Matveenko A.N., Medvedev L.E., Miginsky S.V., Mironenko L.A., Oreshkov A.D., Ovchar V.K., Popik V.M., Salikova T.V., Scheglov M.A., Serednyakov S.S., Shevchenko O.A., Skrinisky A.N., Tcheskidov V.G., Vinokurov N.A. Status of the Novosibirsk high-power terahertz FEL. Nucl Instr & Meth A 575 (2007) 54-57.
17. Kubarev V.V. Losses in optical resonator of Novosibirsk terahertz free electron laser: theory and experiment. Proc Intern Conf FEL-2007, Novosibirsk, August 26-31, 2007, pp. 107-110.
18. Kubarev V.V., Vinokurov N.A., Kolobanov E.I., Kotenkov V.V., Kulipanov G.N., Matveenko A.N., Salikova T.V., Serednyakov S.S., Scheglov M.A. Fourier spectroscopy of water vapor absorption in 40 m optical transport channel of the NovoFEL. Proc Intern Conf IRMMW-THz-2007, Cardiff, UK, Sept 3-7, 2007, v. 2, pp. 817-818.
19. Kubarev V.V., Makashov E.V., Palagin K.S., Serednyakov S.S., Fedotov M.G. Powermeters and 2D beam imaging systems on the Novosibirsk terahertz free electron laser. Proc Intern Conf IRMMW-THz-2007, Cardiff, UK, Sept 3-7, 2007, v.1, pp. 249-250.
20. Kubarev V.V. Optical properties of CVD-diamond in terahertz range and its applications on the NovoFEL. Proc Intern Conf IRMMW-THz-2007, Cardiff, UK, Sept 3-7, 2007, pp. 249-251.
21. Kubarev V.V., Kolobanov E.I., Kotenkov V.V., Kulipanov G.N., Matveenko A.N., Medvedev L.E., Ovchar V.K., Palagin K.S., Salikova T.V., Scheglov M.A., Serednyakov S.S., Vinokurov N.A. Light pulse structure, spectrum and coherency of Novosibirsk terahertz free electron laser. Proc Intern Conf FEL-2007, Novosibirsk, Russia, Aug 26-31, 2007, p. 59.
22. Kulipanov G.N., Gavrilov N.G., Knyazev B.A., Kolobanov E.I., Kotenkov V.V., Kubarev V.V., Matveenko A.N., Medvedev L.E., Miginsky S.V., Mironenko L.A., Ovchar V.K., Popik V.M., Salikova T.V., Scheglov M.A., Serednyakov S.S., Shevchenko O.A., Skrinisky A.N., Tcheskidov V.G., Vinokurov N.A. Research highlights from the Novosibirsk 400 W average power THz FEL. IEEE Transaction on Terahertz Science and Technology 1(2) (2008) 107-125.
23. Кубарев В.В. Расчёт, оптимизация и измерение параметров оптического резонатора Новосибирского терагерцевого лазера на свободных электронах. Квантовая электроника 39 (2009) 235-240.

24. Vinokurov N.A., Dementyev E.N., Dovzenko B.A., Getmanov Y.V., Knyazev B.A., Kolobanov E.I., Kubarev V.V., Kulipanov G.N., Medvedev L.E., Miginsky S.V., Mironenko L.A., Ovchar V.K., Persov B.Z., Popik V.M., Salikova T.V., Scheglov M.A., Serednyakov S.S., Shevchenko O.A., Skrinsky A.N., Tcheskidov V.G., Tokarev Y.F., Vobly P.D., Zaigraeva N.S., Matveenko A.N. Novosibirsk free electron laser facility: Two-orbit ERL with two FELs. Proc Intern Conf FEL-2009, Aug 23-28, Liverpool, UK, 2009, pp. 447-451.
25. Akberdin R.R., Chesnokov E.N., Dem'yanenko M.A., Esaev D.G., Goryachevskaya T.N., Klimov A.E., Knyazev B.A., Kolobanov E.I., Kozlov A.S., Kubarev V.V., Kulipanov G.N., Kuznetsov S.A., Matveenko A.N., Medvedev L.E., Naumova E.V., Okotrub A.V., Ovchar V.K., Palagin K.S., Paschin N.S., Peltek S.G., Petrov A.K., Prinz V.Ya., Popik V.M., Salikova T.V., Serednyakov S.S., Skrinsky A.N., Shevchenko O.A., Scheglov M.A., Vinokurov N.A., Vlasenko M.G., Yakovlev V.V., Zaigraeva N.S. High power THz applications on the NovoFEL. Proc Intern Conf IRMMW-THz-2009, Busan, Korea, Sept 21–25, 2009, report 09030521.
26. Kuznetsov S.A., Navarro-Cía M., Kubarev V.V., Gelfand A.V., Beruete M., Campillo I., and Sorolla M. Regular and anomalous extraordinary optical transmission at the THz-gap. Optics Express 17(14) (2009) 11730-11738.
27. Kubarev V.V., Ovchar V.K. and Palagin K.S. Ultra-fast terahertz Schottky diode detector. Proc Intern Conf IRMMW-THz-2009, Busan, Korea, Sept 21–25, 2009, report 09030439.
28. Knyazev B.A., Kubarev V.V. Wide-field imaging using a tunable terahertz free electron laser and a thermal image plate. Infrared Physics & Technology 52 (2009) 14–18.
29. Kubarev V.V. Optical properties of CVD-diamond in terahertz and infrared ranges. Nucl Instr & Meth A 603 (2009) 22-24.
30. Kubarev V.V., Kulipanov G.N., Kolobanov E.I., Matveenko A.N., Medvedev L.E., Ovchar V.K., Salikova T.V., Scheglov M.A., Serednyakov S.S., Vinokurov N.A. Modulation instability, three mode regimes and harmonic generation at the Novosibirsk terahertz free electron laser. Nucl Instr & Meth A603 (2009) 25–27.
31. Кубарев В.В. Особенности друммондова свечения окиси кальция. Оптика и спектроскопия 106(2) (2009) 281-287.
32. Галкин П.С., Игуменов И.К., Климов А.Э., Кубарев В.В., Неизвестный И.Г., Пашин Н.С., Чесноков Е.Н., Шумский В.Н. Разработка элементов системы регистрации изображений в терагерцовой области спектра на основе пленок PbSnTeIn. Автометрия 45(4) (2009) 80-85.

33. Naumova E.V., Prinz V.Ya., Golod S.V., Seleznev V.A., Soots R.A. and Kubarev V.V. Manufacturing chiral electromagnetic metamaterials by directional rolling of strained heterofilms. *J Optics A: Pure Appl Opt* 11(7) (2009) 11074010-11074014.
34. Kazakevich G., Davidsaver M., Edwards H., Fliiller R., Koeth T., Lumpkin A., Nagaitsev S., Ruan J., Thurman-Keup R., Jeong Y.U., Kubarev V. Bunch length monitoring at the A0 photoinjector using a quasi-optical Schottky detector. *Proc Intern Conf PAC09, Vancouver, BC, Canada, 4-8 May, 2009*, pp. 3543-3545.
35. Kuznetsov S.A., Arzhannikov A.V., Kubarev V.V., Kalinin P.V., Sorolla M., Navarro-Cía M., Aznabet M., Beruete M., Falcone F., Goncharov Yu.G., Gorshunov B.P., Gelfand, A.V., Fedorinina N.I. Development and characterization of quasi-optical mesh filters and metastructures for subterahertz and terahertz applications. *Key Engineering Materials* 437 (2010) 276-280.
36. Kuznetsov S.A., Arzhannikov A.V., Gelfand A.V., Kubarev V.V., Navarro-Cía M., Beruete M., Falcone F., Sorolla M., Thumm M. Microstructure quasi-optical components for subterahertz and terahertz applications. *Vestnik Novosibirsk State University. Series: Physics* 5 (2010) 79-90.
37. Kubarev V.V., Kulipanov G.N., Shevchenko O.A., Vinokurov N.A. Third harmonic lasing on terahertz NovoFEL. *Proc Intern Conf IRMMW-THz-2010, Rome, Italy, Sept 5-10, 2010*, report Mo-F 2.1.
38. Kubarev V.V., Kulipanov G.N., Shevchenko O.A., Vinokurov N.A. Third harmonic lasing on terahertz NovoFEL. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* 32 (2011) 1236–1242.
39. Kubarev V.V., Kulipanov G.N., Chesnokov E.N., Shevchenko O.A. Ultra-fast phenomena on powerful terahertz NovoFEL. *Proc Intern Workshop “Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications”*, Nizhny Novgorod-St.Petersburg, Russia, July 9-16, 2011, p. 258-259.
40. Okotrub A.V., Kubarev V.V., Kanygin M.A., Sedelnikova O.V. and Bulusheva L.G. Transmission of terahertz radiation by anisotropic MWCNT/polystyrene composite films. *Phys Status Solidi B* 248(11) (2011) 2568–2571.
41. Shevchenko O.A., Arbizov V.S., Chernov K.N., Dementyev E.N., Dovzhenko B.A., Getmanov Ya.V., Gorniker E.I., Knyazev B.A., Kolobanov E.I., Kondakov A.A., Kozak V.R., Kozyrev E.V., Kubarev V.V., Kulipanov G.N., Kuper E.A., Kuptsov I.V., Kurkin G.Ya., Medvedev L.E., Mironenko L.A., Ovchar V.K., Persov B.Z., Pilan A.M., Popik V.M., Repkov V.V., Salikova T.V., Scheglov M.A., Sedlyarov I.K., Serdobintsev G.V., Serednyakov S.S., Skrinsky A.N., Tararyshkin S.V., Tcheskidov V.G. Budker INP free electron laser facility – current status and future prospects. *Proc Russian Conf RUPAC-2012, Sept 27-28, Saint-Petersburg, Russia, 2012*, pp. 136-139.

42. Kubarev V.V. Detailed observation of modulation instability on THz NovoFEL. Proc Intern Conf IRMMW-THz-2012, Wollongong, Australia, Sept 23 – 28, 2012, report Fri-A-4-2.
43. Chesnokov E.N., Kubarev V.V., Koshlyakov P.V., and Kulipanov G.N. Direct observation of the terahertz optical free induction decay of molecular rotation absorption lines in the sub-nanosecond time scale. Appl Phys Lett 101 (2012) 131109-(1-4).
44. Kubarev V., Chesnokov E., Koshlyakov P. Ultrafast high-resolution THz time-domain spectroscopy. Proc Intern Conf IRMMW-THz-2012, Wollongong, Australia, Sept 23-28, 2012, report Thu-C-2-4.
45. Kubarev V., Chesnokov E, Koshlyakov P. Terahertz free induction decay of molecular transitions: direct observation and practical use. Proc Intern Conf TERA-2012, June 20-22, 2012, Moscow, Russia, pp. 68-69.
46. Кубарев В.В., Макашов Е.В., Палагин К.С., Середняков С.С., Федотов М.Г. Измерители мощности и системы визуализации терагерцового излучения на Новосибирском лазере на свободных электронах. Научный вестник НГТУ 49(4) (2012) 76-79.
47. Кубарев В.В., Винокуров Н.А., Колобанов Е.И., Кулипанов Г.И., Матвеевко А.Н., Саликова Т.В., Середняков С.С., Щеглов М.А. Фурье-спектроскопия водяных паров в 40-метровом оптическом транспортном канале Новосибирского лазера на свободных электронах. Научный вестник НГТУ 49(4) (2012) 72-75.
48. Васильев А.А., Пальчиков Е.И., Кубарев В.В., Чесноков Е.Н., Кошляков П.В., Долгих А.В. Красников И.Ю., Тен К.А. О работах по исследованию стационарных и нестационарных волн горения водородно-кислородной смеси на терагерцовом Новосибирском лазере на свободных электронах. Известия РАН: Серия физическая 77(9) (2013) 1341-1344.
49. Shevchenko O.A., Arbuzov V.S., Chernov K.N., Demytyev E.N., Dovzhenko B.A., Getmanov Ya.V., Gorniker E.I., Knyazev B.A., Kolobanov E.I., Kondakov A.A., Kozak V.R., Kozyrev E.V., Kubarev V.V., Kulipanov G.N., Kuper E.A., Kuptsov I.V., Kurkin G.Y., Medvedev L.E., Mironenko L.A., Ovchar V.K., Persov B.Z., Pilan A.M., Popik V.M., Repkov V.V., Salikova T.V., Scheglov M.A., Sedlyarov I.K., Serdobintsev G.V., Serebnyakov S.S., Skrinisky A.N., Tararyshkin S.V., Tcheskidov V.G., Vinokurov N.A., Vlasenko M.G., Vobly P.D., Volkov V.N. The Novosibirsk terahertz FEL facility – current status and future prospects. Proc of Intern Conf FEL-2012, Nara, Japan, 2013, pp. 361-364.
50. Kubarev V.V. Ultrafast high-resolution spectroscopy of separate NovoFEL pulses. Proc Intern Conf IRMMW-THz-2013, Mainz on the Rhine, Germany, Sept 1-6, 2013, report Mo14-4.

51. Kubarev V.V., Chesnokov E.N., and Koshlyakov P.V. One-pulse high-resolution THz time-domain spectroscopy: development and applications. Proc Intern Conf IRMMW-THz-2013, Mainz on the Rhine, Sept 1-6, 2013, report Tu5-5.
52. Chesnokov E.N., Kubarev V.V., Koshlyakov P.V., Kulipanov G.N. Very long terahertz free induction decay in gaseous hydrogen bromide. Laser Phys Lett 10 (2013) 055701-055703.
53. Bychanok D.S., Shuba M.V., Kuzhir P.P., Maksimenko S.A., Kubarev V.V., Kanygin M.A., Sedelnikova O.V., Bulusheva L.G., and Okotrub A.V. Anisotropic electromagnetic properties of polymer composites containing oriented multiwall carbon nanotubes in respect to terahertz polarizer applications. Journal of Applied Physics 114 (2013)114304-114309.
54. Kubarev V.V. Dynamics of the THz Optical Discharge. Proc Intern Conf IRMMW-THz-2014, Sept 14-19, 2014, Tucson, USA, report T2-A-16.2.
55. Kubarev V.V, Chesnokov E.N., and Koshlyakov P.V. Pulse effects of terahertz radiation in molecular gas mediums. Proc Intern Conf IRMMW-THz-2014, Sept 14-19, 2014, Tucson, USA, report W4-C-15.3.
56. Chesnokov E.N., Kubarev V.V., and Koshlyakov P.V. Rotation commensurate echo of asymmetric molecules - Molecular fingerprints in the time domain. Applied Physics Letters 105 (2014) 261107-(1-4).
57. Кулипанов Г.Н., Лисенко А.А., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Кубарев В.В., Чесноков Е.Н., Бабченко С.В. Экспериментальные исследования взаимодействия терагерцового излучения Новосибирского лазера на свободных электронах с водным аэрозолем. Оптика атмосферы и океана 27(12) (2014) 1070-1073.
58. Kulipanov G.N., Bagryanskaya E.G., Chesnokov E.N., Choporova Yu.Yu., Gerasimov V.V., Getmanov Ya.V., Kiselev S.L., Knyazev B.A., Kubarev V.V., Peltek S.E., Popik V.M., Salikova T.V., Scheglov M.A., Serebriakov S.S., Shevchenko O.A., Skrinisky A.N., Veber S.L., and Vinokurov N.A. Novosibirsk free electron laser – facility description and recent experiments. IEEE Transaction on Terahertz Science and Technology 5(5) (2015) 798-809.
59. Васильев А.А., Пальчиков Е.И., Кубарев В.В., Чесноков Е.Н., Кошляков П.В., Долгих А.В., Красников И.Ю. Исследование нестационарных волн горения и детонации водородо-кислородной смеси в оптическом и терагерцовом диапазонах. Известия РАН: Серия физическая 79(9) (2015) 1351–1356.
60. Kubarev V.V., Shevchenko O.A., Getmanov Ya.V., Koshlyakov P.V. Threshold conditions of quasicontinuous terahertz optical discharge in gases. Proc Intern Conf IRMMW-THz-2015, Aug 23-28, 2015, Hong Kong, China.
61. Chesnokov E.N., Kubarev V.V., Koshlyakov P.V., Getmanov Ya.V., Shevchenko O.A. Non-Faraday rotation of the free induction decay in gaseous NO. Chemical Physics Letters 636 (2015) 203-207.

КУБАРЕВ Виталий Владимирович

**Оптические системы, диагностика и эксперименты
на терагерцевых и инфракрасных лазерах
на свободных электронах**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Сдано в набор 3.12. 2015 г.

Подписано в печать 8.12. 2015 г.

Формат 60x90 1/16. Объем 2.3 печ.л., 1.8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 1

Обработано на РС и отпечатано
на ротапринтере ИЯФ СО РАН,

Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11