

ОТЗЫВ

официального оппонента 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

В последнее время существенно расширился круг работ по исследованию различных полупроводниковых и диэлектрических материалов, конденсированных и газообразных сред (без нарушения их свойств), по изучению внутренней структуры и идентификации сложных биологических молекул, по неинвазивной, в т.ч. медицинской, диагностике, по обнаружению опасных веществ в терагерцовом (ТГц) диапазоне длин волн. Большой интерес к этой, достаточно неизведанной до последнего времени, области спектра обусловлен, с одной стороны, наличием в ней многих характерных линий молекулярного поглощения и поддиапазонов пропускания соединений, материалов и веществ, а с другой – отсутствием на практике широкого класса генераторов и приемников ТГц излучения. В настоящее время значительная часть экспериментальных работ в этом диапазоне выполняется с применением широкополосных терагерцовых систем, в т.ч. импульсных спектрометров. Однако с появлением таких мощных когерентных источников перестраиваемого по частоте излучения, как лазеры на свободных электронах (ЛСЭ), возникают принципиально новые возможности для проведения исследований в указанных выше научных и прикладных областях. Эти установки имеют ряд принципиальных преимуществ, делающих их незаменимыми для многих приложений. В первую очередь следует отметить большие средние выходные мощности в единицы и десятки киловатт, как правило, импульсно-периодический режим с характерными импульсными мощностями в тысячи раз превышающими их средние мощности, высокую степень пространственной и временной когерентности. Крайне важна также возможность плавной перестройки длины волны излучения ЛСЭ в большой полосе спектрального диапазона (от миллиметров до микрон, т.е. в терагерцовой и инфракрасной областях спектра). Следовательно, для широкого применения ЛСЭ в науке и технике необходимы комплексные исследования, непосредственно ориентированные на разработку базовых компонент с высокими техническими и эксплуатационными характеристиками, средств диагностики основных параметров излучения ЛСЭ, методик измерения основных оптических характеристик новых перспективных материалов, структур и соединений. Отсюда вытекает **актуальность темы диссертационной работы**, ее цель и задачи.

Диссертационная работа В.В. Кубарева состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 321 страницу, список литературы состоит из 189 ссылок.

Во введении автор перечисляет основные действующие в мире ЛСЭ терагерцового и дальнего ИК диапазонов, описывает их уникальные возможности, отмечает основные преимущества Новосибирского ЛСЭ (НЛСЭ) как источника лазерного излучения Центра коллективного пользования. Далее обосновывается актуальность диссертационной работы, приводятся пункты научной новизны и практической ценности, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе описаны базовые принципы аналитических методов приближенного расчета лазерных резонаторов различного типа. Рассматриваются открытые резонаторы и гибридные оптические резонаторы, содержащие как открытые, так и волноводные участки. Решена задача об оптимальной выходной связи для пространственно-однородного и неоднородного выводов лазерного излучения. Показано, что неоднородный вывод существенно уменьшает выходную связь и максимальную выходную мощность ЛСЭ. Отмечена важность однородного вывода излучения на основе интерферометра Майкельсона с алмазным делителем.

Во второй главе рассмотрены конструкция и оптимизация различных оптических резонаторов на основе разработанных аналитических методов расчета. Дано краткое описание уникальной установки НЛСЭ, состоящей из ускорительной части и трех лазеров на свободных электронах ТГц, дальнего ИК и ИК спектральных диапазонов. Аналогично изложены вопросы оптимизации оптического резонатора компактного КЛСЭ (Корейского института исследований в области атомной энергии), созданного при непосредственном участии ИЯФ СО РАН. Особенность этой установки заключается в компактности, которая потребовала применения полого планарного волновода с присущей ему спецификой. Рассмотрен проект гибридного оптического резонатора для мощного ЛСЭ, в котором, в отличие от КЛСЭ, зеркала отнесены далеко от торцов планарного волновода. Отдельно, для общности описания вопросов оптимизации оптических резонаторов, рассмотрены волноводные резонаторы газовых лазеров. Показано преимущество их использования за счет значительно большего модового объема, определены величины допустимых зазоров между волноводом и зеркалами, при которых еще можно пренебречь потерями связи. Такие лазеры успешно применяются в составе НЛСЭ и предназначены для различных технологических и метрологических измерений.

Третья глава посвящена каналам транспортировки излучения трех лазеров НЛСЭ, находящихся в радиационно-опасном ускорительном зале, в безопасное помещение к рабочим станциям. Для всех каналов выбрана открытая оптическая схема с суммарной длиной более 100 метров. Описаны устройство и оптический расчет каналов, который

основан на предложенном автором методе оптимального разложения излучения на круглой выходной апертуре зеркала оптического резонатора по модам свободного пространства. Рассмотрен принципиальный вопрос поглощения терагерцового излучения атмосферными парами воды и способы решения этой проблемы. Экспериментально получены оценки потерь в «окнах прозрачности» и на сильных линиях поглощения в каналах транспортировки. Представлено сравнение расчетных и экспериментальных размеров лазерных пучков на разных длинах волн.

В четвертой главе описаны методы и приборы, разработанные для диагностики основных параметров излучения НЛСЭ. В первую очередь это измерения длины волны и структуры спектра излучения с усреднением по многим импульсам. Большое внимание уделено измерениям средней мощности терагерцового излучения с помощью калориметров различного типа, а также импульсной мощности и структуры отдельных световых импульсов. Показано, что на основе экспериментальных данных средней мощности и результатов сверхбыстрых измерений формы импульсов можно определять импульсную мощность НЛСЭ в любых режимах. Особо следует отметить сверхбыструю спектроскопию отдельных импульсов НЛСЭ для неустойчивых режимов, когда спектры отдельных импульсов и их временная форма сильно нестабильны. Разработан и экспериментально реализован спектрометр, в котором амплитуда и фаза импульса излучения восстанавливаются по одновременным измерениям 2-х (или 4-х) интерференционных сигналов гетеродина и сдвинутыми по фазе измеряемыми сигналами со скрещенными поляризациями.

В пятой главе приведены результаты экспериментальных исследований, выполненных на НЛСЭ. Во-первых, это измерения потерь в оптических резонаторах, коэффициента усиления и интенсивности насыщения активной среды, определение оптимальных коэффициентов выходной связи. Подробно проанализирован вариант однородного вывода излучения при помощи интерферометра Майкельсона с алмазным делителем. Далее рассмотрены характерные режимы работы терагерцового НЛСЭ и генерация на высших гармониках, предназначенная для существенного расширения спектрального диапазона его излучения. Показана возможность выравнивания максимальной мощности лазера на третьей гармонике относительно первой за счет изменения соотношения потерь с помощью наклона зеркал при сохранении конструкции резонатора.

Отдельно следует отметить результаты измерения оптических параметров синтетических алмазов, изготовленных по CVD технологии, в ТГц области спектра, а также исследования в области сверхбыстрой терагерцовой газовой спектроскопии, позволяющей изучать в динамике неустойчивые неповторяющиеся процессы и принципиально однократные явления. Экспериментально показано, что предельная проходящая мощность

гауссова пучка в CVD алмазах более чем на порядок превышает аналогичную мощность для всех других оптических материалов в широком спектральном диапазоне. Это позволяет в перспективе использовать его в системах однородного вывода излучения и, как следствие, увеличить выходную мощность лазера в несколько раз.

Все научные результаты, полученные в диссертации, являются принципиально новыми и имеют важное значение для фундаментальных и прикладных исследований в области физики, химии, биологии и медицины с помощью когерентного терагерцового излучения.

С моей точки зрения, из них особо следует выделить разработанные методы расчета резонаторов разной конфигурации, в том числе с волноводами, в приближении малых потерь. Полученные данные хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований, выполненных на когерентных ТГц каналах НЛСЭ и КЛСЭ. При этом предложены и реализованы методы транспорта лазерного излучения к рабочим станциям.

Разработаны методы диагностики и методики измерений совокупности не только средних, но и импульсных параметров излучения, в том числе спектральной диагностики отдельных импульсов в устойчивых и неустойчивых режимах работы НЛСЭ с высоким разрешением (~ 15 пс). Созданы и экспериментально апробированы оригинальные приборы для определения параметров лазерного излучения (длина волны, средняя и импульсная мощность, спектральный состав, частота следования) и оптических свойств материалов, принципиально важных с точки зрения повышения функциональных возможностей ЛСЭ.

Впервые предложен и экспериментально апробирован метод сверхбыстрой одноимпульсной газовой молекулярной спектроскопии с высоким спектральным разрешением ($\lambda/\Delta\lambda \sim 10^3$ - 10^5), основанный на измерении временных сигналов излучения, возбужденных (импульсами ЛСЭ) молекул и собственно излучения ЛСЭ. Самое важное, что разработанный метод принципиально отличается от традиционных стробоскопических методов тем, что позволяет выполнять исследования пикосекундной кинетики необратимых процессов.

Практическая ценность диссертации заключается в том, что разработанные экспериментальные методы могут быть использованы при изучении различных материалов, сред, структур, сложных молекул без нарушения их свойств с помощью терагерцового лазерного излучения. Особо следует отметить уже упоминавшийся выше метод сверхбыстрой одноимпульсной спектроскопии, который может найти широкое практически важное применение при исследовании, например, быстрых неустойчивых химических и фотохимических реакций, а также других принципиально однократных явлений типа взрывов, ударных волн и т.п. Кроме того, многими исследователями в экспериментальной практике используются данные ТГц измерений оптических характеристик алмазов, которые вошли в справочники и монографии по этому материалу. Крайне важен также тот факт, что

результаты диссертационной работы позволили оптимизировать конструкцию и режимы работы НЛСЭ с целью существенного улучшения его параметров, а это, в свою очередь, значительно расширило область междисциплинарных экспериментальных исследований.

По диссертационной работе можно сделать следующие **замечания**.

Отсутствует анализ погрешности установки заданной длины волны излучения НЛСЭ в процессе ее перестройки. В сканирующих спектральных приборах, как правило, приводится точность настройки на требуемую длину волны (или частоту) излучения. Например, в ТГц спектрометрах фирмы TQPTICA эта величина составляет ± 10 МГц. Для прецизионных измерений на рабочих станциях НЛСЭ этот факт может быть принципиально важным.

К сожалению, на всех графиках с представленными экспериментальными результатами отсутствует информация о погрешностях измерений. С другой стороны, в тексте диссертации экспериментальные данные приводятся с отклонениями от измеряемых величин. Например, 510 ± 10 Вт для средней мощности ТГц излучения на длине волны 131 мкм, стр. 155, однако не ясно – это флуктуация мощности лазерного излучения или собственно погрешность измерений. На стр. 266 в табл. 5.2 дана погрешность измерений мощности ТГц излучения при оптическом пробое: $\pm 20\%$. Она имеет стохастическую природу или это систематическая ошибка?

Для прецизионного измерения средней мощности ТГц излучения используется эталонный калориметр, в котором в качестве поглощающего элемента применяется сапфировая пластина диаметром 150 мм и толщиной 12 мм. Однако в тексте диссертации недостаточно информации о свойствах применяемого поглотителя для обоснования его неселективности в рабочем диапазоне длин волн. Как известно (см., например: *Terahertz techniques* //Springer-Verlag (2012), pp.58-59), сапфир в используемой терагерцовой области обладает значительным двулучепреломлением $\Delta n = (n_e - n_o) \approx 0.45$. При неоптимальной ориентации оптических осей сапфировой пластины это может привести к погрешности коэффициента поглощения, а, следовательно, и мощности $\sim 6\%$ в зависимости от направления поляризации падающего излучения. Отметим, что при оптимальной ориентации (ТГц излучение распространяется вдоль необыкновенной оси) поляризационная зависимость должна отсутствовать; а погрешность, обусловленная селективностью свойств поглотителя, не будет превышать $\sim 0.2\%$.

Сделанные замечания не затрагивают основные положения диссертационной работы, не снижают ее уровня и общей положительной оценки. Диссертация является законченным исследованием, выполненным автором на высоком научно-техническом уровне. Научные положения, выводы и рекомендации работы обоснованы. Ее основные результаты опубликованы в печати, в том числе в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК.

Достоверность полученных результатов обеспечивается теоретической обоснованностью разработанных методов, их практической реализацией и использованием при создании НЛСЭ, как Центра коллективного пользования, а также в серьезных экспериментах с применением терагерцового лазерного излучения. Теоретические и экспериментальные результаты хорошо согласуются между собой.

В рамках диссертационной работы В.В. Кубарева решена важная научно-техническая проблема терагерцовой диагностики и изучения широкого класса материалов, сред и биологических объектов с помощью НЛСЭ в этом специфическом и мало исследованном спектральном диапазоне.

Автореферат полностью отражает основные результаты диссертационной работы и обосновывает выводы защищаемых положений.

Считаю, что представленная диссертационная работа В.В. Кубарева 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 ученых степеней». Автор диссертации, Кубарев Виталий Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент
доктор технических наук, профессор,
заместитель директора по научной работе
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки
Института автоматики и электрометрии
Сибирского отделения Российской академии наук
(ИАиЭ СО РАН)
почтовый адрес: 630090, г. Новосибирск,
проспект Академика Коптюга, 1
телефон: (383) 330-40-20
электронный адрес: potaturkin@iae.nsk.su
16.05.2016

 /О.И. Потатуркин/

Подпись О.И. Потатуркина ЗАВЕРЯЮ
Ученый секретарь ИАиЭ СО РАН
доктор технических наук
электронный адрес: mikhlyaev@iae.nsk.su
М.П.

 /С.В. Михляев/

