

**ОТЗЫВ
ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
РАЕВСКОГО АЛЕКСЕЯ СЕРГЕЕВИЧА
на диссертационную работу
ШУГУРОВА АЛЕКСАНДРА ИВАНОВИЧА
«Детектирование терагерцовых волн ультракороткими
лазерными импульсами в толстых электрооптических кристаллах»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.19. Лазерная физика**

1. Актуальность диссертации

Терагерцовый диапазон частот, занимающий промежуточное положение между оптическим и микроволновым диапазонами, в настоящее время является наименее исследованным. В этом диапазоне плохо применимы хорошо разработанные методы генерации излучений соседних оптического и микроволнового диапазонов. Несмотря на сложности генерации уникальные свойства терагерцового излучения стимулируют освоение данного диапазона.

Терагерцовое излучение является неионизирующим, в отличие от рентгеновского излучения, используемого в медицинской диагностике. В то же время, различные биологические ткани обладают существенно различным поглощением в данном диапазоне, что позволяет обеспечить контрастность снимков. В терагерцовом диапазоне прозрачны многие сухие диэлектрические материалы, такие как ткани, дерево, бумага, пластмассы, что позволяет производить в нём неразрушающий контроль материалов, сканирование в аэропортах и пр. В терагерцовом диапазоне лежат резонансы вращательных и колебательных переходов многих молекул. Это позволяет проводить идентификацию молекул. Когерентная терагерцовая спектроскопия во временной области, обеспечивающая сверхширокую частотную полосу и высокое разрешение по времени, позволяет исследовать состав, электронные и колебательные свойства твердых тел, жидкостей и газов, а

также может применяться для диагностики заболеваний, обнаружения биологических и химических агентов, загрязнений, контроля качества продуктов питания и медикаментов.

Наиболее распространенные методы генерации и детектирования импульсного терагерцового излучения основаны на нелинейно-оптических преобразованиях фемтосекундных лазерных импульсов ближнего инфракрасного диапазона в электрооптических средах или на их взаимодействии с фотопроводящими средами. При детектировании терагерцовых импульсов требуется, как правило, измерить их временную форму (осциллограмму), имеющую пикосекундный масштаб изменений. Это достигается стробированием терагерцовых импульсов более короткими оптическими импульсами фемтосекундных лазеров в электрооптических кристаллах или фотопроводящих антенах. В стандартных схемах электрооптического стробирования измеряемый терагерцевый импульс и пробный оптический импульс распространяются в кристалле коллинеарно. При этом их эффективное взаимодействие ограничено длиной когерентности. Неколлинеарные схемы способны обеспечить оптико-терагерцевый синхронизм при любой длине волны пробного оптического пучка без необходимости подбора электрооптического кристалла просто путем задания нужного (черенковского) угла между оптическим и терагерцевым пучками. При этом обеспечивается большая длина когерентности, что позволяет использовать толстые (сантиметровой толщины) кристаллы и проводить измерения в больших (порядка сотен пикосекунд) временных окнах с высоким (порядка нескольких ГГц) спектральным разрешением измерений.

В связи с этим *диссертация Шугурова А.И., посвященная развитию нелинейно-оптических методов измерения временной формы импульсного терагерцового излучения в условиях неколлинеарного (черенковского) синхронизма пробного оптического и терагерцевого импульсов в электрооптических кристаллах сантиметровой толщины, обеспечивающих высокое (до нескольких гигагерц) спектральное разрешение измерений, безусловно, является актуальной и практически востребованной.*

2. Научная новизна и достоверность основных выводов и результатов диссертации

Автор диссертации хорошо знаком с существующими коллинеарными и неколлинеарными методами детектирования терагерцовых импульсов, знает их сильные и слабые стороны. В своей работе он разработал методы: неколлинеарного эллипсометрического детектирования терагерцовых волн в кристаллах GaAs сантиметровой толщины; неколлинеарного неэллипсометрического детектирования терагерцовых волн в кристаллах GaAs сантиметровой толщины; неколлинеарного эллипсометрического детектирования терагерцовых волн в LiNbO₃ в конфигурации подавленного собственного двулучепреломления кристалла.

Автором впервые предложены схемы неколлинеарного электрооптического детектирования терагерцовых волн фемтосекундными лазерными импульсами с длиной волны 1,56 мкм в кристаллах GaAs, в которых терагерцовый и пробный пучки заводятся в кристалл непосредственно через одну из граней кристалла без использования согласующих призм. Впервые экспериментально продемонстрировано неколлинеарное эллипсометрическое детектирование временной формы терагерцовых волн импульсами волоконного фемтосекундного лазера (с длиной волны 1,56 мкм) в кристалле GaAs сантиметровой толщины с высоким спектральным разрешением и на порядок большей эффективностью по сравнению со стандартным методом коллинеарного эллипсометрического детектирования в кристаллах GaAs (суб)миллиметровой толщины. Впервые экспериментально продемонстрировано неколлинеарное неэллипсометрическое детектирование временной формы терагерцовых волн импульсами волоконного фемтосекундного лазера (с длиной волны 1,56 мкм) в кристалле GaAs сантиметровой толщины, основанное на измерении интенсивности пробного оптического пучка при ее нелинейно-оптической модуляции электрическим полем терагерцовой волны. Впервые предложен и экспериментально продемонстрирован метод неколлинеарного эллипсометрического детектирования временной формы терагерцовых

волн фемтосекундными оптическими импульсами лазера с длиной волны 0,8 мкм и 1,56 мкм в кристалле LiNbO₃, не чувствительный к паразитному эффекту сильного собственного двулучепреломления кристалла LiNbO₃ и работоспособный при различной длине волны пробного оптического пучка.

При выполнении работы автор использовал апробированные экспериментальные методы терагерцовой спектроскопии во временной области. В качестве источников оптических импульсов использовались фемтосекундные лазеры с длинами волн 1,56 мкм и 0,8 мкм. Терагерцовое излучение генерировалось с помощью фотопроводящей антенны при воздействии на нее лазером, а также при накачке лазером оптико-терагерцового преобразователя в виде пластины кристалла LiNbO₃, расположенной между двух кремниевых призм полного внутреннего отражения. Измерения модуляции пробного пучка проводились методом синхронного детектирования. Мощность терагерцового излучения измерялась с помощью ячейки Голлея, мощность зондирующего пучка – с помощью пироэлектрического детектора. Ширина терагерцового пучка измерялась методом «knife-edge», для измерения ширины оптического пучка использовалась CCD-камера. Длительность оптических импульсов измерялась автокоррелятором. Расчеты спектров измеренных электрооптических сигналов проводились методом быстрого преобразования Фурье.

Достоверность полученных результатов подтверждается согласованием результатов диссертационной работы в частных случаях с имеющимися теоретическими и экспериментальными данными других авторов, а также апробацией результатов на солидных международных конференциях и публикациями в высокорейтинговых международных рецензируемых журналах.

3. Ценность для науки и практики проделанной работы

В ходе проведённых исследований Шугуровым А.И. разработаны методы нелинейно-оптического измерения временной формы импульсного терагерцового излучения, обеспечивающие высокое спектральное разрешение, которые мо-

гут быть использованы в целях терагерцовой спектроскопии во временной области. Предложенные схемы детектирования на основе кристалла GaAs могут быть использованы в компактных терагерцовых спектрометрах. Метод неколлинеарного неэллипсометрического детектирования временной формы терагерцовых волн импульсами фемтосекундного волоконного лазера в кристалле GaAs сантиметровой толщины позволяет проводить эффективное электрооптическое стробирование с высоким спектральным разрешением без использования поляризационной оптики и балансного детектора; что упрощает схему детектирования. Предложенный метод неколлинеарного эллипсометрического детектирования временной формы терагерцовых волн в структуре, состоящей из кристалла LiNbO₃ специальной кристаллографической ориентации и прикрепленной к нему кремниевой призмы, обеспечивает высокие характеристики детектирования при различной длине волны стробирующих оптических импульсов (от 0,8 до 1,56 мкм), что позволяет применять данную структуру в качестве универсального детектирующего элемента терагерцовых спектрометров, совместимых с различными лазерными источниками.

4. Оценка содержания диссертации, ее завершенности

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка сокращений, списка использованной литературы, включающего 59 наименований, и списка публикаций по диссертации из 14 наименований. Работа изложена на 79 страницах машинописного текста, включая 17 рисунков.

Во *Введении* обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель исследования, указаны научная новизна и практическая значимость диссертации, кратко описано ее содержание, приведены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена разработке метода эллипсометрического детектирования терагерцовых волн импульсами фемтосекундного волоконного лазера в толстых (сантиметровой толщины) кристаллах GaAs в условиях неколлинеарного

оптико-терагерцового синхронизма. Проведен анализ факторов, влияющих на эффективность детектирования в неколлинеарной геометрии. Приведена схема неколлинеарного детектирования и описание экспериментальной установки. Приведены результаты экспериментов по неколлинеарному детектированию в кристаллах GaAs различной толщины в сравнении с результатами, полученными с помощью стандартной коллинеарной схемы. Экспериментально определены оптимальные значения толщины кристалла и угла ввода пробного пучка в кристалл.

Вторая глава посвящена разработке неэллипсометрического, основанного на измерении модуляции интенсивности в пробном пучке, метода электрооптического детектирования терагерцовых волн импульсами фемтосекундного волоконного лазера в толстых (сантиметровой толщины) кристаллах GaAs в условиях неколлинеарного оптико-терагерцового синхронизма. Приведена схема детектирования и описание экспериментальной установки. Определены теоретически и подтверждены экспериментально оптимальные поляризации терагерцового и пробного оптического пучков относительно кристаллографических осей кристалла GaAs. Приведены экспериментальные осциллограммы электрооптических сигналов и их спектры, проведено их сравнение с результатами эллипсометрических измерений, а также с теоретическими предсказаниями.

Третья глава посвящена разработке неколлинеарного эллипсометрического метода электрооптического детектирования терагерцовых волн фемтосекундными лазерными импульсами в кристалле LiNbO₃ в конфигурации с распространением пробного импульса вдоль главной оптической оси кристалла, обеспечивающей подавление паразитного эффекта собственного двулучепреломления кристалла. Экспериментально продемонстрирована работоспособность метода при двух длинах волн пробного импульса – 1,5 мкм и 0,8 мкм. Проведено сравнение с детектированием с помощью фотопроводящей антенны и кристалла GaAs.

В *Заключении* автор подытожил результаты диссертационной работы.

Содержание диссертации изложено последовательно, методически правильно и достаточно полно раскрывает решение поставленных научных задач.

Диссертация является завершенным научно-квалификационным исследованием поставленной научной задачи. Работа написана грамотно. Оформление работы соответствует установленным нормам.

По материалам диссертации опубликовано 14 работ в рецензируемых изданиях, в том числе 3 статьи в журналах, включенных в перечень ВАК по специальности 1.3.19, 2 патента на изобретения, 9 работ в сборниках докладов конференций. Автореферат достаточно полно отражает основное содержание диссертации.

5. Замечания по работе

1. Стр. 4 диссертации: не понятно, учитывалась ли дисперсия в пределах спектра терагерцового импульса.
2. Стр. 20: очевидно, неправильная ссылка на работу [29].
3. Стр. 23 и 39: одинаковым ли образом определялась длина Рэлея?
4. Стр. 24: из текста не понятно, как для конкретного образца кристалла GaAs экспериментально определялся оптимальный угол β ?
5. Непонятно, что такое «длина дисперсионного расплывания». Есть ли определение этой величины?
6. Учитывается ли влияние нелинейности на уширение импульса?
7. Из схемы измерений, приведённой на рис. 1.1, не понятно, как варьировалась задержка пробных импульсов при стробировании.
8. Стр. 40: не понятно, что такое «разные половины пробного пучка».
9. Стр. 47: не понятно, что значит «импульс наклонён».
10. Стр. 54: эффект отсутствия двулучепреломления при распространении волны вдоль оптической оси, вроде бы, хорошо известен. Что является оригинальным в его применении?
11. Стр. 63: говорится про величину динамического диапазона, но в тексте не даётся определения этого понятия, а даётся только ссылка, что несколько затрудняет понимание.
12. В выводах по главе 3: не совсем понятно, зачем производится измерение на длине волны 0,8 мкм наряду с измерением на длине волны 1,56 мкм.

ВЫВОДЫ

1. Диссертационная работа Шугурова А.И. посвящена актуальной теме и является законченной научно-исследовательской квалификационной работой, содержащей решение важной научной проблемы – развития нелинейнооптических методов измерения временной формы импульсного терагерцового излучения в условиях неколлинеарного (черенковского) синхронизма пробного оптического и терагерцового импульсов в электрооптических кристаллах сантиметровой толщины, обеспечивающих высокое (до нескольких гигагерц) спектральное разрешение измерений. Научные положения и выводы являются обоснованными.

2. Указанные в данном отзыве недостатки имеют частный характер и не снижают в целом положительной оценки работы.

Исходя из вышеизложенного, считаю, что диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ (включая п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней»), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Шугуров Александр Иванович – заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Официальный оппонент,

Заведующий кафедрой «Физика и техника оптической связи»
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ),
доктор физико-математических наук (01.04.03 – Радиофизика),
профессор

А.С. Раевский

27 апреля 2023 г.

Раевский Алексей Сергеевич
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»
603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24, тел.: +7(831) 436-82-33,
E-mail: raevsky_as@mail.ru

Подпись заверяю:

Учёный секретарь Учёного совета НГТУ

к.т.н., доцент



И.Н. Мерзляков