

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

кандидата физико-математических наук, Костюковой Надежды Юрьевны

на диссертационную работу Рыбак Алины Анатольевны

«Развитие методов и техники фильтрации и субдискретизации в импульсной терагерцовой спектроскопии»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – «Оптика»

На рассмотрение были представлены один том диссертации и автореферат. Диссертация изложена на 106 страницах, включает введение, четыре главы, заключение, список публикаций соискателя, состоящий из 3 статей, 20 материалов научных конференций и 2 свидетельств о регистрации Ноу-Хау, список литературы, состоящий из 171 источника. Отзыв составлен на основании изучения материалов диссертации, автореферата и опубликованных автором статей.

Интерес к устройствам терагерцового (ТГц) диапазона обусловлен широкой перспективой их применения для спектроскопии молекулярных газов в системах мониторинга атмосферы, в системах безопасности в аэропортах, в промышленности для контроля полимерных изделий, а также для фармацевтики и медицины.

Одним из современных спектроскопических методов является импульсная терагерцовая спектроскопия (ИТС), использующая фемтосекундные лазеры ближнего ИК-диапазона для генерации импульсов длительностью ~ 1 пс в терагерцовой части спектра. Такие спектрометры позволяют проводить исследование оптических свойств различных материалов, в том числе и биологического происхождения, в широком спектральном диапазоне.

Диссертационная работа Рыбак А.А. посвящена разработке и применению квазиоптических фильтров на базе интерференционных метаматериалов, применяемых для развития методов и техники антиалиасной фильтрации и субдискретизации в широкополосной ИТС. Предложенные методы продемонстрировали эффективность применения для повышения точности и сокращения времени измерения спектра в ограниченной частотной полосе. Это дает основание утверждать, что сформулированная в диссертационной работе соискателем тема исследований является актуальной.

Постановка научно-технических задач, перечень методов исследования и ожидаемые результаты изложены в тексте диссертации внятно и в достаточном объеме. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации. Диссертация и автореферат оформлены по правилам ВАК.

Структура работы построена логически целесообразно.

Во введении представлены необходимые структурные элементы диссертационной работы: актуальность работы, краткое описание методов ИТС, методов алиасинга и субдискретизации, цели и задачи диссертационного исследования, научная новизна, практическая значимость и апробация результатов исследования, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе, посвященной описанию теоретических основ и методов исследования, дается подробное описание физических принципов генерации и детектирования ТГц излучения в системе ИТС, приводится схема импульсного терагерцового спектрометра, разработанного в ИАиЭ СО РАН. В разделах 1.2 и 1.3 описываются теорема отсчетов и возникновение искажений восстановленного сигнала, т.е. алиасинга при недостаточной частоте дискретизации. В разделе 1.4 описывается метод субдискретизации для восстановления сигнала ИТС.

Во второй главе описывается применение сетчатых фильтров низких частот (ФНЧ) для антиалиасной фильтрации в ИТС. Для оценки применимости подхода проведено исследование спектральных характеристик ФНЧ, представляющих собой интерференционные структуры, состоящие из нескольких слоёв емкостных пластинчатых метаповерхностей. Продемонстрирована возможность сокращения времени измерения спектрометра до 12 раз при повышении точности измерений за счет нивелирования долговременного дрейфа нормировочного сигнала.

Третья глава диссертационного исследования посвящена разработке узкополосного пропускающего полосового фильтра на основе эталона Фабри-Перо (ФФП). В разделе 3.2 описывается численное моделирование пропускания ФФП с заданными параметрами и их экспериментальная реализация, а в разделе 3.3 представлено тестирование метода субдискретизации в ИТС при исследовании пропускания кремниевой пластины.

В четвёртой главе с применением предложенных методов приводится исследование оптических и диэлектрических свойств в терагерцовом диапазоне сегнетоэлектрических кристаллов. В частности, описывается экспериментальное исследование температурной дисперсионной зависимости и коэффициента поглощения кристалла KTiOPO_4 (раздел 4.1), который широко применяется для нелинейно-оптического преобразования, и комплексной диэлектрической проницаемости кристалла $\text{Sr}_{0,75}\text{Ba}_{0,25}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (SBN-75, раздел 4.2).

Оценка достоверности и новизны работы. Достоверность результатов работы обеспечивается хорошим согласованием модельных оценок с результатами экспериментов, использованием апробированных исследовательских процедур и современного оборудования. Полученные результаты не противоречат известным научным данным.

Достоверность представленных результатов также подтверждается 2 свидетельствами о регистрации Ноу-Хау.

В качестве новых, диссертантом представлены **следующие научные результаты**:

1. Предложен и протестирован способ сокращения времени измерения ИТС для случая низкочастотных измерений, основанный на применении антиалиасных фильтров и одновременном увеличении интервала дискретизации системы регистрации спектрометра.
2. Разработана конструкция узкополосного квазиоптического фильтра ФФП. Впервые экспериментально показана возможность реализации метода субдискретизации в импульсной терагерцовой спектроскопии, позволившего сократить время измерения в 2 раза, при измерении пропускания кремниевой пластины с помощью разработанного фильтра с центральной частотой $\sim 0,8$ ТГц и с полной шириной на полувысоте менее 4%.
3. Экспериментально исследована температурная дисперсионная зависимость и коэффициент поглощения кристаллов KTiOPO_4 в субтерагерцовой области спектра в диапазоне температур -192 — $+150$ °С.
4. Проведено экспериментальное исследование комплексной диэлектрической проницаемости монокристалла SBN-75 в субтерагерцовой области спектра при комнатной температуре.

В соответствии с изложенным материалом **на защиту выносятся следующие основные положения**, обладающие, по моему мнению, **научной новизной и практической значимостью**:

1. Применение высокоэффективных емкостных микроструктур в качестве антиалиасных (anti-aliasing) фильтров в широкополосной импульсной терагерцовой спектроскопии в случае субтерагерцовых измерений позволяет сократить время измерения сигнала спектрометра до 12 раз при сохранении точности измерений.
2. Применение узкополосных квазиоптических фильтров с полной шириной на полувысоте менее 4% позволяет реализовать метод субдискретизации в импульсной терагерцовой спектроскопии и сократить время измерения сигнала спектрометра в 2 раза.
3. Дисперсия трёх главных компонент показателя преломления кристалла KTiOPO_4 в диапазоне $0,2$ — 1 ТГц может быть описана одночленными выражениями Зельмейера с линейной зависимостью значений коэффициентов для диапазона температур -192 — $+150$ °С.

Все защищаемые положения соответствуют п. 9–11, 13, 14 паспорта специальности 1.3.6. «Оптика».

В целом, представленную к защите диссертацию можно квалифицировать, с одной стороны, как **квалифицированную работу**, соответствующую всем установленным

нормам и правилам, а с другой стороны – как завершенное на данном этапе **научное исследование**, которое имеет очевидную перспективу продолжения и дальнейшего применения. Оригинальный характер полученных автором результатов, не вызывает сомнения. Число публикаций и уровень апробации (1 статья в зарубежном журнале и 2 статьи в российских журналах, входящих в базы цитирования Scopus и Web of Science и перечень ВАК, 20 работ в сборниках трудов научных конференций российского и международного уровня), а также 2 свидетельства о регистрации ноу-хау, соответствует общепринятым критериям.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

Полученные в ходе диссертационных исследований результаты вносят вклад в развитие современной оптики, в особенности для решения задач, связанных с совершенствованием метода импульсной терагерцовой спектроскопии (ИТС), а также исследования оптических свойств нелинейных кристаллов в терагерцовой части спектра. Результаты могут быть рекомендованы для применения в организациях Российской академии наук, ведомственных институтах, высших учебных заведениях и на предприятиях различного профиля.

Замечания по диссертационной работе. По диссертации можно указать на некоторые недостатки не принципиального плана:

1. В разделе 4.2 четвертой главы даны некоторые сведения о кристалле $\text{Sr}_{0,61}\text{Ba}_{0,39}\text{Nb}_2\text{O}_6$. При этом указана только три ссылки на работы, посвященные описанию этого материала, причем ссылки даны лишь на следующей странице. Поэтому, когда читаешь данную главу, складывается впечатление, что диссертант лично изучил структуру кристалла, что в диссертации также явно не отражено.
2. Также на мой взгляд, в разделе 4.2 диссертации недостаточно описан исследуемый образец, указана лишь его толщина, при этом не указаны ни размеры образца, ни его ориентировка, ни производитель.

В заключение можно сказать, что рассматриваемая **диссертация является законченным научно-исследовательским трудом**, выполненным автором самостоятельно и на высоком научном уровне. В работе приведены научные результаты, позволяющие их квалифицировать как новые научно обоснованные решения, имеющие высокое значение в области фундаментальной и прикладной оптики терагерцового диапазона, полезные для широкого круга применений.

Несмотря на указанные недостатки, которые не касаются ключевых результатов проведенного диссертационного исследования, считаю, что выполненная Рыбак Алиной Анатольевной научно-исследовательская квалификационная работа отвечает всем

требованиям действующего «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему **ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. «Оптика».**

Официальный оппонент, заведующая Лабораторией квантовых оптических технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЛФ СО РАН), кандидат физико-математических наук

Н. Ю. Костюкова
«19» августа 2024 г.

Подпись Н. Ю. Костюковой удостоверяю
кандидат физико-математических наук
учёный секретарь ИЛФ СО РАН



П. В. Покасов

Сведения о лице, представившем диссертацию
заведующая Лабораторией квантовых оптических технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЛФ СО РАН), кандидат физико-математических наук.

Почтовый адрес: 630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, д. 15Б;
+7 (383) 333-29-67, info@laser.nsc.ru, <https://laser.nsc.ru/>

Кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.05- Оптика.