

УТВЕРЖДАЮ

И. о. проректора по научной и инновационной деятельности
федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский Томский
государственный университет»,
доктор физико-математических наук, профессор

Ворожцов Александр Борисович

«15» сентября 2023 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации 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

Актуальность темы

Диссертационная работа Рыбак А.А.

посвящена развитию метода импульсной терагерцовой спектроскопии (ИТС),
относительно нового метода спектроскопии, основанного на электромагнитных переходных
процессах, генерируемых фемтосекундными лазерными импульсами.

Использование метаматериалов и метаповерхностей позволяет расширить возможности
данного типа спектроскопии. Метаповерхности представляют собой искусственные субволновые
структуры, геометрия и свойства диэлектрического материала которых непосредственно влияют
на их амплитудные и фазовые частотные характеристики. При их моделировании можно заранее
определить необходимые электродинамические и оптические свойства, что открывает широкие
возможности для применения квазиоптических устройств на основе метаматериалов. Поскольку
длина терагерцовых волн составляет несколько сотен микрон, субволновые стандарты для
проектирования метаповерхностей могут быть достигнуты с помощью существующих методов
литографии.

Многие спектроскопические приложения ИТС не требуют столь широкого диапазона
частот. Примерами могут служить исследование мягких мод в сегнетоэлектриках с нулевой
частотой при температурах фазовых переходов; определение характеристик материалов в
миллиметровом диапазоне (120-350 ГГц) и разработка устройств, включая системы связи нового
поколения; исследование водных растворов, в том числе биологических; газоанализ и др.
приложения.

Для низкочастотных измерений целесообразно использовать фильтр нижних частот (ФНЧ) для подавления неинформативной коротковолновой составляющей спектра, что, согласно теореме отсчетов, приводит к увеличению шага дискретизации. Таким образом, можно сократить общее время измерения или уменьшить погрешность измерения за счет увеличения постоянной времени интегрирования сигнала на каждом шаге при сохранении общего времени измерения.

Другим способом улучшения характеристик ИТС является применение узкополосного полосового фильтра и реализация метода субдискретизации.

В диссертации Рыбак А.А. рассматривает применение вышеупомянутых методов для исследования оптических и диэлектрических свойств сегнетоэлектрических кристаллов: титанил фосфат калия (KTiOPO_4 , КТП) и ниобат бария-стронция ($\text{Sr}_{0,61}\text{Ba}_{0,39}\text{Nb}_2\text{O}_6$, SBN-61).

Структура диссертационной работы

Диссертационная работа Рыбак А.А. состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка публикаций, списка литературы из 106 наименования. Общий объём диссертации составляет 96 страниц машинописного текста, включая 3 таблицы и 49 рисунков.

Во введении автором обоснована актуальность выбранной темы исследования, сформулированы цель и задачи, изложена научная новизна, обоснована практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе автором представлен краткий обзор развития метода импульсной терагерцовой спектроскопии, описаны основные принципы данного метода и его особенности. Далее приводится описание существующих методов фильтрации и субдискретизации, рассмотрены примеры алиасинга и субдискретизации в импульсной терагерцовой спектроскопии.

Во второй главе описан подход к применению емкостных интерференционных микроструктур для антиалиасной фильтрации в импульсной терагерцовой спектроскопии. Исследовались характеристики четырёх ФНЧ с различными частотами срезов. В качестве эталонных объектов автором исследовались два пропускающих полосовых фильтра (ППФ).

В результате показана возможность сокращения времени измерения спектрометра до 12 раз при повышении точности измерений за счет нивелирования долговременного дрейфа нормировочного сигнала.

В третьей главе представлены результаты разработки узкополосного пропускающего фильтра на основе эталона Фабри-Перо, а также апробации на модельном образце разработанного фильтра, реализующего метод субдискретизации.

В четвёртой главе приведены результаты исследования диэлектрических и оптических свойств сегнетоэлектрических кристаллов с использованием импульсной терагерцовой спектроскопии и разработанных метаповерхностей.

Новизна проведенных исследований и полученных результатов

Научная новизна диссертационной работы определяется тем, что автором предложен новый метод, позволяющий сократить время измерений с использованием импульсного терагерцового спектрометра в низкочастотной области за счет использования высокоэффективных интерференционных емкостных микроструктур в качестве антиалиасных фильтров при увеличении интервала дискретизации системы регистрации спектрометра. Метод был протестирован путем измерения спектра пропускания эталонных образцов с центральными частотами 156 ГГц и 376 ГГц и полосой пропускания около 12%. Полученные результаты показывают, что время измерения спектрометра может быть сокращено до 12 раз при сохранении точности измерений.

Разработан узкополосный квазиоптический фильтр на основе эталона Фабри-Перо, который в сочетании с последовательно совмещенным широкополосным полосовым пропускающим фильтром, подавляющим резонансы высших порядков Фабри-Перо. Примеры измерений пропускания на кремниевых пластинах с использованием разработанного фильтра впервые экспериментально демонстрируют применимость метода субдискретизации в импульсной терагерцовой спектроскопии.

Исследована температурная зависимость оптических свойств кристаллов KTiOPO_4 терагерцовой области в диапазоне температур от -192 до $+150$ °C. Изменение трех главных компонент показателя преломления кристаллов описывается обобщенным уравнением Зельмейера, которое зависит от температуры. Коэффициенты уравнений Зельмейера показывают почти линейную температурную зависимость, что свидетельствует о том, что ионно-проводящий механизм кристалла мало влияет на оптические свойства в терагерцовом диапазоне.

Впервые с высокой точностью исследована комплексная диэлектрическая проницаемость монокристаллов $\text{Sr}_{0,61}\text{Ba}_{0,39}\text{Nb}_2\text{O}_6$ в терагерцовой области при комнатной температуре.

Степень обоснованности

Работа Рыбак А. А. обладает высокой степенью достоверности полученных и изложенных в диссертационной работе результатов и выводов, позволяющих использовать данные методы в дальнейших исследованиях в импульсной терагерцовой спектроскопии. Результаты диссертационной работы Рыбак А. А. демонстрируют воспроизводимость экспериментальных и расчетных данных. В диссертации выполнен сравнительный анализ полученных результатов с результатами работ других авторов, и их соответствие также подтверждает высокую степень достоверности.

Результаты диссертационной работы апробированы на научных конференциях мероприятия всероссийского и международного уровня. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 23 научных работах, в том числе в 3 статьях в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой

степени доктора наук и рецензируемых базами данных Scopus и WoS, получено 2 свидетельства о Ноу-Хау.

Значимость полученных в диссертации результатов для науки и практики

Практическая значимость результатов определяется возможностью использования разработанных методов и подходов для импульсной терагерцовой спектроскопии.

Разработанный метод может быть адаптирован для широкого круга задач, связанных с исследованиями свойств различных материалов и структур, что подтверждается использованием предложенного метода в результатах исследований по гранту Российского фонда фундаментальных исследований № 20-32-90137 «Разработка метаматериалов и развитие на их основе методов импульсной терагерцовой спектроскопии биологических жидкостей».

Соответствие автореферата диссертационной работе

Автореферат удовлетворяет предъявляемым требованиям и полностью соответствует диссертационной работе. Автореферат в полном объеме отражает результаты и сформулированные выводы диссертации.

Замечания к работе

По диссертации есть несколько замечаний:

1. В Главе 1 при описании теоремы отсчётов следовало бы добавить информацию о том, как эта теорема связана с импульсной терагерцовой спектроскопией, как она выполняется и что происходит при её нарушении.
2. Моделирование фильтра Фабри-Перо проводилось только для плоской волны, что не всегда соответствует экспериментальным условиям.
3. При экспериментальных измерениях кремниевой пластинки не указан статистический критерий для описания сравнения измерений с применением метода субдискретизации.
4. Импульсная терагерцовая спектроскопия позволяет регистрировать амплитуду и фазу, в диссертации в основном использовались только амплитудные характеристики. Измерение фазовых характеристик могло бы дополнить исследования.

В целом, диссертация оформлена аккуратно и снабжена необходимыми рисунками и таблицами. Количество опечаток и грамматических ошибок незначительное.

Заключение о соответствии работы требованиям ВАК

Высказанные замечания не снижают ценности, научной и практической значимости работы и общей положительной оценки диссертации. Диссертация Рыбак А. А. является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные методы и подходы фильтрации и субдискретизации для развития импульсной терагерцовой спектроскопии.

Работы автора опубликованы в установленные сроки и в полной мере отражают основные результаты диссертации. Диссертация выполнена на актуальную тему, отвечает требованиям п. 9–11, 13, 14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор, Рыбак Алина

Анатолевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика.

Диссертация, отзыв заслушаны, обсуждены и одобрены на совместном семинаре кафедры оптики и спектроскопии физического факультета и лаборатории лазерного молекулярного имиджинга и машинного обучения федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (протокол №1 от «15» сентября 2023 г.).

Отзыв подготовил:

Заместитель проректора по научной
и инновационной деятельности,
профессор кафедры общей и
экспериментальной физики,
заведующий лаборатории лазерного молекулярного
имиджинга и машинного обучения
Национального исследовательского
Томского государственного университета,
доктор физико-математических наук,
профессор

Кистенев Юрий Владимирович

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский государственный университет», 634050, г. Томск, пр.
Ленина, 36; (3822) 52-98-52; rector@tsu.ru; www.tsu.ru.