

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Рыбак Алины Анатольевны

«Развитие методов и техники фильтрации и субдискретизации в импульсной терагерцовой спектроскопии»,
представленную на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.6 – «Оптика»

Актуальность темы

Диссертация А. А. Рыбак посвящена совершенствованию относительно нового спектроскопического метода – импульсной терагерцовой спектроскопии (ИТС).

Терагерцовая спектроскопия – относительно новый бурно развивающийся раздел оптики и спектроскопии, расширяющий возможности исследования самых разнообразных объектов и применений в новый спектральный диапазон. Новые методы, разумеется, требуют развития как новой экспериментальной техники, так и новых методов обработки результатов экспериментальных измерений. Таким образом, тематика рецензируемой работы, несомненно, весьма актуальна.

Использование метаповерхностей в этой спектроскопии расширяет её возможности. Моделирование метаповерхностей позволяет заранее определить необходимые электродинамические и оптические свойства, что открывает более широкие перспективы для создания квазиоптических устройств. Поскольку длина терагерцовых волн составляет всего несколько сотен микрон, субволновые стандарты для создания метаповерхностей могут быть достигнуты с помощью существующей литографии.

Для многих приложений ИТС не требуется весь широкий диапазон частот. К ним относятся, например, исследования низкочастотной динамики решетки кристаллов, в частности мягких мод в сегнетоэлектриках, определение характеристик материалов в миллиметровом диапазоне, проектирование устройств, в том числе для систем связи нового поколения, исследования водных растворов и газовый анализ.

При низкочастотных измерениях для подавления неинформативных коротковолновых составляющих спектра используется фильтр нижних частот (ФНЧ). Это позволяет увеличить размер шага дискретизации в соответствии с теоремой Котельникова, что уменьшает общее время измерения или снижает погрешность измерения при сохранении общего времени измерения.

Другим способом улучшения характеристик ИТС является использование узкополосных полосовых фильтров и применение методов субдискретизации.

В рамках диссертационной работы А. А. Рыбак продемонстрировала применение разработанных ею подходов на примере исследования оптических и диэлектрических свойств сегнетоэлектрических кристаллов, таких как титанат-фосфат калия (KTiOPO_4 , КТП) и ниобат бария стронция ($\text{Sr}_{0,75}\text{Ba}_{0,25}\text{Nb}_2\text{O}_6$, SBN-75).

Структура и основное содержание работы

Диссертационная работа А. А. Рыбак состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и библиографии из 171 наименований. Диссертация состоит из 106 страниц, содержит 3 таблицы и 54 рисунков.

Во введении определена актуальность выбранной темы исследования, представлены цели и задачи, изложена научная новизна, установлена практическая значимость исследования, представлены защищаемые положения.

В главе 1 дан краткий обзор развития импульсной терагерцовой спектроскопии, описаны ее основные принципы и характеристики. Представлены существующие методы фильтрации и субдискретизации сигнала, рассмотрены возможности их применения в импульсной терагерцовой спектроскопии.

Во второй главе описано применение емкостных интерференционных микроструктур в качестве антиалиасных фильтров в импульсной терагерцовой спектроскопии. Исследуются свойства ФНЧ с различными частотами среза.

Полученные результаты показывают, что время измерения может быть существенно (до 12 раз) сокращено за счет устранения долговременного дрейфа сигнала при одновременном повышении точности измерений.

В главе 3 представлены результаты разработки узкополосного пропускающего фильтра на основе эталона Фабри–Перо и результаты тестирования разработанного фильтра с использованием метода субдискретизации.

В главе 4 представлены результаты исследования диэлектрических и оптических свойств сегнетоэлектрических кристаллов КТР и SBN-75 в терагерцовой области с применением разработанных методик.

Основные результаты

Научная новизна работы заключается в том, что автор предлагает метод сокращения времени измерения импульсно-терагерцовых спектрометров в низкочастотном диапазоне. Метод предполагает использование интерференционных емкостных микроструктур в качестве антиалиасных фильтров для увеличения интервала дискретизации регистрирующей системы спектрометра. Полученные результаты показывают, что время измерения спектрометра может быть сокращено при сохранении точности измерений.

Узкополосный квазиоптический фильтр на основе резонатора Фабри–Перо, был объединен с последовательно соединенным широкополосным полосовым фильтром для подавления резонансов высших порядков Фабри–Перо. Применимость метода субдискретизации для импульсной терагерцовой спектроскопии была экспериментально продемонстрирована с помощью разработанного фильтра при измерении пропускания модельного объекта – кремниевой пластины.

С использованием разработанной методики исследованы температурные зависимости оптических свойств кристаллов КТР в терагерцовом диапазоне и в диапазоне температур от 192 до 150°С.

Показано, что изменение главных компонент показателя преломления кристалла описывается обобщенным уравнением Зельмейера; коэффициенты

уравнения Зельмейера практически линейны с температурой, что свидетельствует о незначительном влиянии механизма ионной проводимости на оптические свойства КТР в исследованном терагерцовом диапазоне.

Впервые с высокой точностью исследована комплексная диэлектрическая проницаемость монокристаллов SBN-75 в терагерцовой области в диапазоне температур $+25 \div +200$ °С с применением антиалиасной фильтрации.

Недостатки

Диссертация вызывает некоторые вопросы, а также содержит ряд опечаток и стилистических ошибок.

- Во Введении при постановке задачи достаточно подробно обсуждаются исследования нелинейных восприимчивостей сегнетоэлектриков, хотя такие измерения в работе не проводятся.
- В главе 1 было бы полезно хотя бы кратко рассмотреть существующие методы обработки и анализа данных в ТГц импульсной спектроскопии (аподизация сигналов во временной области, вейвлетная фильтрация шумов, деконволюция сигналов во временной области и т. п.) и сравнить их с обсуждаемым методом.
- Стр. 16 «Полученные комплексные функции пропускания обычно усредняются по четырём независимым измерениям» – а этого достаточно?
- Стр. 32 «Чтобы можно было удовлетворить теореме Котельникова и детектировать ТГц-сигнал без искажений, требуется достаточно малое значение шага выборки Δt .» Слишком общая фраза. Вообще без искажений? Малый шаг выборки – по сравнению с чем?
- Стр. 34. «Полипропилен (PP) выбран в качестве материала подложек ввиду его малых диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta \sim 10^{-3}$) и малой дисперсии в ТГц диапазоне ($n = 1.5$)». Недостаточно обоснованный выбор. Тефлон имеет меньшие потери. Что значит «малая дисперсия в ТГц» – какой диапазон? На сколько в нем меняется показатель преломления?
- Рис. 9. Что такое «неоднородность пропускания»? Какие размеры картинка (и фильтра) по сравнению с диаметром пучка? На какой конкретно частоте был получен Рис. 9? «пределы неоднородности» – что это такое? Тоже самое касается рис. 14.
- На стр. 42 есть фраза «доверительный интервал сокращается с уменьшением номера фильтра т. е. сокращается время сканирования» – из текста не следует, как они связаны.
- Стр. 44. «Линии поглощения атмосферы в основном обусловлены вращательными и колебательно-вращательными модами молекулярного водяного пара» – колебательный и колебательно-вращательный спектр H_2O лежит выше 3200 см^{-1} (выше 100 ТГц). Приведенный на рис. 18 спектр – это чисто вращательные переходы.
- Рис. 33 – подпись неинформативна. Рис. 34 «зависимость... в зависимости от...».

- Глава 4. Непонятно, зачем здесь повторяется обоснование актуальности исследований, это уже было описано во Введении.
- При обсуждении результатов исследований кристалла КТР со ссылкой на [148] утверждается, что фононные моды ниже 6 ТГц связаны с колебаниями калиевой подрешетки кристалла. Однако в сложной решетке этого кристалла невозможно выделить фононные моды, связанные с колебаниями отдельных подрешеток; в этом же низкочастотном диапазоне, например, будут находиться колебания, соответствующие вращательным степеням свободы групп PO_4 , и собственные векторы фононов будут представлять собой линейную комбинацию таких смещений – несомненно, и с участием ионов калия. По данным [146], самые низкочастотные резонансные линии поглощения КТР лежат в области выше 2 ТГц; было бы интересно измерить температурную зависимость ширины этих линий, что позволит определить преимущественный механизм уширения: связан ли он с беспорядком (процессами проводимости) в решетке кристалла или с ангармонизмом решеточных колебаний.
- Диссертант приводит исследования терагерцовых оптических и диэлектрических свойств двух сегнетоэлектриков, при этом не указывая и не обосновывая, почему для разных кристаллов в одном случае приводятся оптические свойства, а в другом – диэлектрические. Также при исследовании кристалла SBN-75 приведены стандартные отклонения, а при исследовании кристаллов КТР – нет.

Защищаемые положения

Изложенные в тексте защищаемые положения отражают научную новизну и практическую значимость, подтверждены полученными результатами.

Теоретическая и практическая значимость

Предлагаемый метод основан на фильтрации за счет увеличения интервала дискретизации и полосовой фильтрации с использованием субдискретизации, что позволяет значительно сократить время измерения сигналов импульсного терагерцового спектрометра при исследовании сред в ограниченном частотном диапазоне или при реализации методов терагерцовой визуализации.

На основе полученных термооптических параметров кристаллов $KTiOPO_4$ можно в широком диапазоне учитывать влияние температуры при использовании этих кристаллов, в частности, для разработки нелинейно-оптических генераторов терагерцового излучения.

Результаты измерений комплексной проницаемости монокристаллов $Sr_{0,75}Ba_{0,25}Nb_2O_6$ могут быть использованы при разработке оптических и электронных устройств.

Достоверность и обоснованность выводов

диссертации обеспечиваются квалифицированным использованием такого спектроскопического метода, как ИТС, внутренней непротиворечивостью

экспериментальных результатов, обоснованностью сделанных выводов, сравнением полученных результатов с результатами других авторов.

Результаты, изложенные в диссертации **апробированы** на профильных международных и всероссийских конференциях, опубликованы в трех статьях, рекомендованных ВАК и индексируемых базами данных Scopus и Web of Science.

Заключение

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.

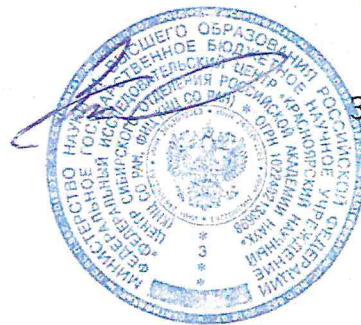
Работы автора опубликованы в установленные сроки и в полной мере отражают основные результаты диссертации. Диссертация выполнена на актуальную тему, отвечает требованиям п. 9–11, 13, 14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор, Рыбак Алина Анатольевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика.

Официальный оппонент,

Втюрин Александр Николаевич
доктор физ.-мат. наук, старший научный сотрудник
главный научный сотрудник
Института физики им. Л.В. Киренского
Сибирского отделения Российской академии наук
– обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН,
г. Красноярск

«02» сентября 2024 г.

Подпись А. Н. Втюрина заверяю
Ученый секретарь ИФ СО РАН
канд. физ.-мат. наук



Злотников А. О.