УТВЕРЖДАЮ:
директор ИАиЭ СО РАН
Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н.
Бабин Сергей Алексеевич

____

«_4_»___июня___2024 г

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института автоматики и электрометрии
Сибирского отделения Российской академии наук
(ИАиЭ СО РАН)

Диссертация «Развитие методов и техники фильтрации и субдискретизации в импульсной терагерцовой спектроскопии» выполнена в лаборатории терагерцовой фотоники ИАиЭ СО РАН, лаборатории функциональной диагностики низкоразмерных структур для наноэлектроники аналитического и технологического исследовательского центра «Высокие технологии и наноструктурированные материалы» физического факультета Новосибирского государственного университета (НГУ).

В период подготовки диссертации соискатель Рыбак Алина Анатольевна работала в ИАиЭ СО РАН в должности и. о. инженера-исследователя и в НГУ в должности младшего научного сотрудника, где также проходила обучение в аспирантуре в период с 2018—2022 гг.

А. А. Рыбак в 2018 г. окончила магистратуру физико-технического факультета Новосибирского государственного технического университета по направлению подготовки 16.04.01 «Техническая физика». В 2022 г. окончила аспирантуру Новосибирского государственного университета по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия», специальности 01.04.05 «Оптика».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов № 2022/34 выдана 1 июля 2022 г. НГУ.

Научный руководитель – кандидат технических наук Николаев Назар Александрович, ведущий научный сотрудник лаборатории терагерцовой фотоники ИАиЭ СО РАН.

Диссертация «Развитие методов и техники фильтрации и субдискретизации в импульсной терагерцовой спектроскопии» была рассмотрена на семинаре УНЦ «Квантовая оптика» «21» «мая» 2024

На семинаре присутствовали:

Шалагин Анатолий Михайлович, д. ф.-м. н., профессор, академик РАН

Бабин Сергей Алексеевич, д. ф.-м. н., профессор, чл.-корр РАН

Шапиро Давид Абрамович, д. ф.-м. н., профессор

Лобач Иван Александрович, к. ф.-м. н.

Николаев Назар Александрович, к.т.н.

Достовалов Александр Владимирович, к. ф.-м. н.

Харенко Денис Сергеевич, к. ф.-м. н.

Абдуллина Софья Рафисовна, к. ф.-м. н.

Анцыгин Валерий Дмитриевич, к. ф.-м. н.

Потатуркин Олег Иосифович, д.т.н., профессор,

Каблуков Сергей Иванович, д.ф.-м.н., профессор.

По результатам рассмотрения диссертации принято следующее заключение:

Актуальность работы

Современные импульсная терагерцовая спектроскопия (ИТС) охватывают широкий диапазон частот – от 50 ГГц до 6 ТГц, что связано с широкополосной природой источников и детекторов ТГц волн. Однако часто определённые спектроскопические задачи требуют выделить только узкую область спектра. К таким задачам относятся, исследование мягких мод в сегнетоэлектриках, частоты которых стремятся к нулю при температуре фазового перехода; исследование свойств материалов и разработка устройств миллиметрового диапазона (120–350 ГГц), в том числе для систем телекоммуникации будущего поколения; исследование водных растворов; газовая спектроскопия; изучение метаматериалов и структур в окрестности высокодобротного резонанса; и другие задачи.

Основная цель диссертационной работы А. А. Рыбак состояла в развитии методов и техники антиалиасной фильтрации и субдискретизации в широкополосной импульсной терагерцовой спектроскопии посредством разработки и применения квазиоптических фильтров на базе интерференционных метаматериалов, с целью повышения точности и сокращения времени измерения спектра в ограниченной частотной полосе при исследовании диэлектрических свойств сегнетоэлектрических кристаллов.

В работе предложен метод, основанный на применении высокоэффективных емкостных микроструктур в качестве антиалиасных фильтров в ИТС в случае субтерагерцовых измерений. Показана эффективность применения данного метода как на модельных объектах (полосовых пропускающих фильтров), так и при изучении диэлектрических свойств сегнетоэлектрических кристаллов KTP и SBN в ТГц диапазоне. Для случая полосовых измерений, предложена и рассчитана конструкция узкополосного фильтра, основанная на эталоне Фабри-Перо с сеточными рефлекторами. Продемонстрирована возможность реализации метода субдискретизации в импульсной терагерцовой спектроскопии с помощью предложенного фильтра.

Методики, применяемые в диссертационной работе А. А. Рыбак, являются современными и полностью подходят для решения поставленных задач.

Личное участие соискателя

Все экспериментальные результаты, изложенные в работе, получены А. А. Рыбак лично или при её участии. Соискатель лично провел численное моделирование конструкции узкополосного фильтра и экспериментальное исследование спектральных характеристик изготовленного образца. А. А. Рыбак принимала активное участие в обсуждении полученных результатов и их интерпретации, в подготовке научных публикаций.

Новизна

В диссертации получены следующие новые научные результаты:

1. Предложен подход, основанный на применении высокоэффективных емкостных микроструктур в качестве антиалиасных (anti-aliasing) фильтров в широкополосной импульсной терагерцовой спектроскопии в случае субтерагерцовых измерений. Подход апробирован при измерении спектров пропускания эталонных образцов – пропускающих полосовых фильтров с

1. Rybak A., Antsygin V., Mamrashev A., Nikolaev N. Terahertz optical properties of $KTiOPO_4$ crystal in the temperature range of (−192)–150°C // Crystals. 2021. T. 11. № 2.
2. Рыбак А.А., Николаев Н.А., Кузнецов С.А., Yang S.H. Применение емкостных микроструктур в качестве антиалиасных фильтров для задач широкополосной импульсной терагерцовой спектроскопии // Автометрия. 2020. Т. 56. № 1. С. 101-108.
3. Рыбак А.А., Кузнецов С.А., Аржанников А.В., Николаев Н.А. Разработка узкополосного фильтра для реализации метода андерсемплинга в импульсных терагерцовых спектрометрах // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17. № 1. С. 78-92.

Диссертация «Развитие методов и техники фильтрации и субдискретизации в импульсной терагерцовой спектроскопии» Рыбак Алины Анатольевны рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 (01.04.05) «Оптика».

Председатель семинара

д. ф.-м. н., профессор, академик РАН А. М. Шалагин

Секретарь семинара

к. ф.-м. н. И. А. Лобач

Уткин Дмитрий Евгеньевич, н. с., АТИЦ ФФ НГУ

Чепкасов Сергей Юрьевич, м. н. с., ЛабФДНС АТИЦ ФФ НГУ

Шевченко Олеся Николаевна, н. с., ЛабФДНС АТИЦ ФФ НГУ

Юшков Иван Дмитриевич, м. н. с., ЛабФДНС АТИЦ ФФ НГУ

По результатам рассмотрения диссертации принято следующее заключение:

Актуальность работы

Современная импульсная терагерцовая спектроскопия (ИТС) охватывает диапазон частот от 50 ГГц до 6 ТГц, что связано с широкополосной природой источника и детектора ТГц волн. Однако в некоторых спектроскопических задачах требуется изучение только определенной части терагерцового спектра. Например, исследования мягких мод в сегнетоэлектриках, которые имеют низкие частоты близкие к нулю при температуре фазового перехода, или разработка устройств для миллиметрового диапазона (120–350 ГГц) в системах связи следующего поколения. Для таких задач требуется работа в ограниченной спектральной полосе. ИТС основана на эквидистантном стробировании терагерцовой волны, и в этом методе работает теорема отсчётов (Уиттекера-Котельникова-Шеннона). В ИТС могут быть реализованы методы аналогово-цифровой электроники для повышения точности и сокращения времени измерения.

В работе Рыбак А. А. предложены два метода для улучшения ИТС в случае субтерагерцовых измерений:

Первый метод основан на использовании высокоэффективных емкостных микроструктур в качестве антиалиасных фильтров. Исследования эталонных образцов показали, что это позволяет сократить время измерения спектрометра до 12 раз при сохранении точности измерений.

Второй метод основан на использовании эталона Фабри-Перо с сеточными рефлекторами для создания узкополосного квазиоптического фильтра. Экспериментально показано, что этот подход позволяет сократить время измерения в 2 раза с использованием метода субдискретизации в ИТС.

Таким образом, новые методы предлагают способы повышения эффективности и точности ИТС в ограниченных спектральных полосах, что может быть полезным для газоанализа, исследования фононных мод и характеризации метаповерхностей с высокодобротными резонансами в терагерцовом диапазоне.

Методики, применяемые в диссертационной работе А. А. Рыбак, являются современными и полностью подходят для решения поставленных задач.

Основная цель диссертационной работы А. А. Рыбак состояла в развитии методов и техники антиалиасной фильтрации и субдискретизации в широкополосной импульсной терагерцовой спектроскопии посредством разработки и применения квазиоптических фильтров на базе интерференционных метаматериалов, с целью повышения точности и сокращения времени измерения спектра в ограниченной частотной полосе при исследовании диэлектрических свойств сегнетоэлектрических кристаллов.

Личное участие соискателя

Все экспериментальные результаты, изложенные в работе, получены А. А. Рыбак лично или при её участии. А. А. Рыбак лично провела численное моделирование и сравнила его с полученными экспериментально результатами. Также принимала активное участие в обсуждении полученных результатов и их интерпретации, в подготовке научных публикаций.

Новизна

В диссертации получены следующие новые научные результаты:

1. Предложен метод, основанный на применении высокоэффективных емкостных микроструктур в качестве антиалиасных (anti-aliasing) фильтров в широкополосной импульсной терагерцовой спектроскопии в случае субтерагерцовых измерений. Подход апробирован при измерении спектров пропускания эталонных образцов – пропускающих полосовых фильтров с центральными частотами 156 и 376 ГГц и шириной полосы ~12%. В результате показано уменьшение времени измерения спектрометра до 12 раз при сохранении точности измерений.
2. Создан узкополосный пропускающий квазиоптический фильтр с полной шириной на полувысоте менее 4%, основанный на использовании эталона Фабри-Перо с сеточными рефлекторами, совмещенного с широкополосным полосовым пропускающим фильтром, подавляющим высшие резонансы эталона. На модельном образце исследовано пропускание в окрестности частоты 0,8 ТГц, впервые экспериментально показана возможность реализации метода

субдискретизации в импульсной терагерцовой спектроскопии, позволившего сократить время измерения в 2 раза.

3. Впервые исследована температурная зависимость субтерагерцовых оптических свойств кристаллов титанил-фосфата калия $KTiOPO_4$ в диапазоне $-192 \div +150$ °C. Изменение трёх главных компонент показателя преломления кристалла описаны универсальными выражениями Зельмейера, зависящими от температуры. Установлено, что коэффициенты выражений Зельмейера демонстрируют близкие к линейной температурные зависимости.
4. Впервые исследована комплексная диэлектрическая проницаемость монокристалла ниобата бария-стронция $Sr_{0,75}Ba_{0,25}Nb_2O_6$ в субтерагерцовой области спектра в диапазоне температур $+25 \div +200$ °C.

Степень достоверности результатов

Все полученные результаты не противоречат известным научным положениям и экспериментальным результатам других работ. Все измерения производились с помощью известных методик и точных приборов. Результаты работы опубликованы в ведущих рецензируемых журналах и представлены на всероссийских и международных конференциях, что свидетельствует об обоснованности и достоверности сделанных выводов. Достоверность подтверждается также близким совпадением результатов измерений и численного моделирования.

Практическая значимость

1. Предложенные подходы, основанные на антиалиасной фильтрации с последующим увеличением интервала дискретизации и полосовой фильтрации с применением техники субдискретизации, позволяют значительно сократить время измерения сигналов импульсных терагерцовых спектрометров при исследовании сред с ограниченной или интересуемой частотной областью и при реализации техники терагероцовой визуализации.

2. Полученные термооптические свойства кристаллов $KTiOPO_4$ позволят учесть влияние температуры в широком диапазоне при разработке нелинейно-оптических генераторов терагерцового излучения на основе этих кристаллов.

Соответствие специальности

Диссертационная работа соответствует специальности 1.3.6 (01.04.05) «Оптика», так как основным объектом исследования являются сегнетоэлектрические кристаллы, квазиоптические метаструктуры и метаповерхности.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Результаты работы докладывались автором на: международной научно-технической конференции «Молодежь, инновации, технологии» (Новосибирск 2019), Российской конференции и школе молодых учёных по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники ФОТОНИКА (Новосибирск 2019); 58-й Международной научной студенческой конференции МНСК (Новосибирск, 2020); 59-й Международной научной студенческой конференции МНСК. Фотоника и квантовые оптические технологии. (Новосибирск, 2021); XV международная конференция Pulsed Lasers and Laser Applications AMPL (Томск, 2021); IX международный симпозиум Modern problems of laser physics – MPLP (Новосибирск 2021); 60-й Международной научной студенческой конференции МНСК. Фотоника и квантовые оптические технологии, (Новосибирск, 2022); 5-й международной конференции «Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection andApplications» TERA (Москва, 2023), XVI международная конференция Pulsed Lasers and Laser Applications AMPL (Томск, 2023), Российской конференции и школе молодых учёных по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники ФОТОНИКА (Новосибирск 2023). Результаты диссертационной работы достаточно подробно отражены в трёх публикациях в рецензируемых научных журналах, индексируемых в российских и международных базах данных:

1. Rybak A., Antsygin V., Mamrashev A., Nikolaev N. Terahertz optical properties of KTiOPO4 crystal in the temperature range of (−192)–150°C // Crystals. 2021. T. 11. №2.
2. Rybak A.A., Nikolaev N.A., Kuznetsov S.A., Yang S.H. Application of capacitive microstructures as anti-aliasing filters for terahertz time-domain spectroscopy // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2020. T. 56. № 1. PP. 101-108.
3. Рыбак А.А., Кузнецов С.А., Аржанников А.В., Николаев Н.А. Разработка узкополосного фильтра для реализации метода андерсемплинга в импульсных терагерцовых спектрометрах // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17. № 1. С. 78-92.

Диссертация «Развитие методов и техники фильтрации и субдискретизации в импульсной терагерцовой спектроскопии» Рыбак Алины Анатольевны рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 «Оптика».

Председатель семинара

д. ф.-м. н. Шкляев А. А.

Секретарь семинара

к. ф.-м. н. Гейдт П. В.