

УТВЕРЖДАЮ:

врио директора ИАиЭ СО РАН  
заместитель директора по научной работе  
д.т.н.  
Корольков Виктор Павлович



« 23 » июля 2023 г

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института автоматки 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 нанoeлектроники 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, и.о. ведущего научного сотрудника 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» 04.07.2023.

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 источника и детектора ТГц волн. Однако часто определённые спектроскопические задачи требуют выделить только характерную 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.

Система регистрации ИТС основана на эквидистантной выборке напряженности терагерцового поля. Чтобы сигнал был зарегистрирован без потери информации, должна удовлетворяться теорема отсчётов (Уиттекера-Котельникова-Шеннона).

В работе предложен метод, основанный на применении высокоэффективных емкостных микроструктур в качестве антиалиасных фильтров в ИТС в случае субтерагерцовых измерений. Показана эффективность его применения как на модельных объектах (полосовых низкочастотных фильтров), так и при изучении диэлектрических свойств сегнетоэлектриков КТР и SBN в ТГц диапазоне. Для случая полосовых измерений, предложена и рассчитана конструкция узкополосного фильтра, основанная на эталоне Фабри-Перо с сеточными рефлекторами. Показана 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.

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. 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 центральными частотами 156 и 376 ГГц и шириной полосы ~12%. В результате показано уменьшение времени измерения на спектрометре до 12 раз при сохранении точности измерений.
2. Предложен метод создания узкополосного квазиоптического фильтра 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 примере исследования пропускания кремниевой пластины 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  $\text{KTiOPO}_4$  в диапазоне  $-192 \div +150$  °С. Изменение трех главных компонент показателя преломления кристалла описаны универсальными выражениями Зельмейера, зависящими от температуры. Показано, что коэффициенты выражений Зельмейера демонстрируют близкие к линейной температурные зависимости.
4. Впервые исследована комплексная диэлектрическая проницаемость монокристалла  $\text{Sr}_{0,5}\text{Ba}_{0,5}\text{Nb}_2\text{O}_6$  в субтерагерцовой области спектра при температуре 22 °С.

## **Степень достоверности результатов.**

Все полученные результаты не противоречат известным научным положениям и экспериментальным результатам других работ. Все измерения производились с помощью апробированных 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 частотной областью и при реализации техники терагерцовой визуализации.

2. Полученные термооптические свойства кристаллов  $\text{KTiOPO}_4$  позволят учесть влияние температуры в широком диапазоне при разработке нелинейно-оптических генераторов терагерцового излучения на основе данных кристаллов.

#### **Соответствие специальности.**

Диссертационная работа соответствует специальности 1.3.6 (01.04.05) «Оптика», так как в работе используются оптический метод исследования – импульсная терагерцовая спектроскопия, а основными объектами исследования являются квазиоптические метаструктуры и метаповерхности; помимо того исследованы оптические свойства (показатель преломления и коэффициент поглощения) сегнетоэлектрических кристаллов в терагерцовом спектральном диапазоне.

#### **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 фотоники 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 and Applications» TERA (Москва, 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 KTiOPO<sub>4</sub> crystal in the temperature range of (−192)–150°C // Crystals. 2021. Т. 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 терагерцевых 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



УТВЕРЖДАЮ:

Ректор НГУ  
академик РАН

Федорук Михаил Петрович

«28» июня 2023 г

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (НГУ)

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

В период подготовки диссертации соискатель Рыбак Алина Анатольевна проходила обучение в аспирантуре Новосибирского государственного университета в период с 2018-2022 гг, а также работала в должности младшего научного сотрудника в лаборатории функциональной диагностики низкоразмерных структур для нанoeлектроники аналитического и технологического исследовательского центра «Высокие технологии и наноструктурированные материалы», и в ИАиЭ СО РАН в должности и. о. инженера-исследователя.

В 2016 г. окончила бакалавриат физико-технического факультета Новосибирского государственного технического университета по направлению подготовки 12.03.05 «Лазерная техника и лазерные технологии», 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, старший научный сотрудник лаборатории функциональной диагностики низкоразмерных структур для нанoeлектроники аналитического и технологического исследовательского центра «Высокие технологии и наноструктурированные материалы», старший научный сотрудник, заведующий лаборатории терагерцовой фотоники ИАиЭ СО РАН.

Диссертация «Развитие методов и техники фильтрации и субдискретизации в импульсной терагерцовой спектроскопии» была рассмотрена на семинаре ЛабФДНС АТИЦ ФФ НГУ 28 июня 2023г.

На семинаре присутствовали:

Асеев Александр Леонидович, академик, д. ф.-м. н., г. н. с., АТИЦ ФФ НГУ

Володин Владимир Алексеевич, д. ф.-м. н. в. н. с., ЛабФДНС АТИЦ ФФ НГУ

Шкляев Александр Андреевич, д. ф.-м. н., в. н. с. ЛабФДНС АТИЦ ФФ НГУ

Гейдт Павел Викторович, к. ф.-м. н., заведующий ЛабФДНС АТИЦ ФФ НГУ

Азаров Иван Алексеевич, н. с. ЛабФДНС АТИЦ ФФ НГУ

Николаев Иван Владимирович, к. ф.-м. н., н.с. ЛабФДНС АТИЦ ФФ НГУ

Николаев Назар Александрович, к. т. н., с. н. с., ЛабФДНС АТИЦ ФФ НГУ

Шаяпов Владимир Равильевич, к. ф.-м. н., н. с., ЛабФДНС АТИЦ ФФ НГУ

Милёхин Илья Александрович, Ph. D., м. н. с., АТИЦ ФФ НГУ

Бердиева Сабохат Бахромовна, м. н. с., ЛабФДНС АТИЦ ФФ НГУ

Богословцева Алена Леонидовна, м. н. с., ЛабФДНС АТИЦ ФФ НГУ

Ильясова Анастасия Валерьевна, лаборант, ЛабФДНС АТИЦ ФФ НГУ

Кузнецов Сергей Александрович, с. н. с., ЛабФДНС АТИЦ ФФ НГУ

Лазорский Павел Александрович, инженер 2 категории, ЛабФДНС АТИЦ ФФ НГУ

Миронова Мария Ивановна, м. н. с., ЛабФДНС АТИЦ ФФ НГУ

Митрофанов Андрей Сергеевич, м. н. с., ЛабФДНС АТИЦ ФФ НГУ



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 фазовом переходе, 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 отсчетов (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 фоновых мод и характеристики метаповерхностей с высокочастотными 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 экспериментальными 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  $\text{KTiOPO}_4$  в диапазоне  $-192 \div +150$  °С. 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  $\text{Sr}_{0,61}\text{Ba}_{0,39}\text{Nb}_2\text{O}_6$  в субтерагерцовой области спектра при температуре 22 °С.

### **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 интересующей частотной областью и при реализации техники терагерцовой визуализации.

2. Полученные термооптические свойства кристаллов  $\text{KTiOPO}_4$  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 фотоники 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 and Applications» TERA (Москва, 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 KTiOPO<sub>4</sub> crystal in the temperature range of (−192)–150°C // Crystals. 2021. Т. 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. Т. 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 терагерцевых спектрометрах // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17. № 1. С. 78-92.

Диссертация «Развитие методов и техники фильтрации и субдискретизации в импульсной терагерцевой спектроскопии» Рыбак Алины Анатольевны рекомендуется к



защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 «Оптика».

Председатель семинара

академик РАН, д. ф.-м. н., профессор



Асеев А. Л.

Секретарь семинара

к. ф.-м. н.



Гейдт П. В.