

На правах рукописи



Рыбак Алина Анатольевна

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ И ТЕХНИКИ ФИЛЬТРАЦИИ И
СУБДИСКРЕТИЗАЦИИ
В ИМПУЛЬСНОЙ ТЕРАГЕРЦОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

1.3.6 – «Оптика»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Новосибирск 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и электрометрии сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН) и в Лаборатории функциональной диагностики низкоразмерных структур для наноэлектроники аналитического и технологического исследовательского центра «Высокие технологии и наноструктурированные материалы» физического факультета Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (НГУ).

**Научный
руководитель:**

Николаев Назар Александрович, кандидат технических наук, ИАиЭ СО РАН, заведующий лабораторией, г. Новосибирск

**Официальные
оппоненты:**

Втюрин Александр Николаевич
доктор физико-математических наук ИФ СО РАН,
главный научный сотрудник, г. Красноярск

Костюкова Надежда Юрьевна
кандидат физико-математических наук ИЛФ СО РАН,
заведующая лабораторией, г. Новосибирск

**Ведущая
организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Защита состоится «20» сентября 2024 г. в 11 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 003.005.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН) по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАиЭ СО РАН.

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Учёный секретарь диссертационного совета

д.ф.-м.н.



Ильичёв Л. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Терагерцовый (ТГц) диапазон спектра электромагнитного излучения обычно ограничивается нижним пределом в 100 ГГц (3 мм) и верхним пределом в 30 ТГц (10 мкм). ТГц-излучение обладает низкой энергией кванта (частоте 1 ТГц соответствует 4,1 мэВ) и, в отличие от рентгеновских лучей, является неионизирующим, что делает его безопасным для живых организмов, в том числе и для человека [1]. ТГц-излучение применяется в фармацевтике для контроля целостности оболочек таблеток [2,3]; в промышленности – для контроля полимерных изделий и покрытий [2,4]; ТГц-излучение перспективно для развития телекоммуникационных систем, в том числе беспроводных сетей, которые открываются по мере повышения частот передачи до субТГц диапазона [5,6].

Импульсная терагерцовая спектроскопия (ИТС) – относительно новый спектроскопический метод, основанный на электромагнитных переходных процессах, генерируемых фемтосекундными лазерными импульсами. Эти процессы происходят на субпикосекундных временных масштабах и генерируют одиночные периодические колебания электромагнитного поля, обычно менее 1 пс, со спектром от 50 ГГц до 6 ТГц и выше.

Применение метаматериалов и метаповерхностей позволит расширить возможности ИТС. Они представляют собой искусственные субволновые структуры, их геометрия и диэлектрические свойства материала непосредственно влияют на амплитудные и фазочастотные свойства метаповерхности. При их моделировании возможно заранее задать необходимые электродинамические и оптические свойства, что приводит к широкому применению квазиоптических устройств на основе метаматериалов. Поскольку длины волн терагерцового диапазона составляют порядка нескольких сотен микрон, достижение субволновых критериев при проектировании метаповерхностей возможно с помощью существующих в настоящее время литографических технологий.

Многие спектроскопические приложения ИТС не требуют столь широкой полосы пропускания. Например, некоторые задачи требуют выделения только низкочастотной области ТГц-спектра: изучение мягких мод в сегнетоэлектриках, частота которых при температуре фазового перехода стремится к нулю; разработка устройств в миллиметровом диапазоне (120-350 ГГц), в том числе телекоммуникационных систем нового поколения; исследование свойств водных растворов, в том числе биологических; газовый анализ; исследование узких

фононных мод в кристаллических структурах; определение свойств метоповерхностных сенсоров с характерными высокодобротными резонансами, расположенными в ограниченной части ТГц-спектра.

Для низкочастотных измерений целесообразно использовать фильтры нижних частот (ФНЧ) для подавления неинформативной коротковолновой составляющей спектра, что позволяет увеличить величину шага дискретизации согласно теореме отсчётов. В результате можно уменьшить общее время измерения или за счёт увеличения постоянной времени интегрирования сигнала на каждом шаге уменьшить погрешность измерения при сохранении общего времени измерения. Такие ФНЧ называются антиалиасными, поскольку они предотвращают смешение информативного спектра сигнала с алиасами, лежащими выше частоты Найквиста.

Другой подход к улучшению характеристик ИТС основан на применении узкополосных полосовых фильтров (ППФ) и реализации субдискретизации. Для реализации этого метода в ИТС необходимо соблюдение ряда критериев. Для восстановления сигнала с помощью субдискретизации система детектирования должна удовлетворять критериям, вытекающим из теоремы отсчётов. Также необходимо учитывать требования к полосе пропускания и степень внеполосового подавления используемого фильтра.

В данной работе предлагается применить вышеупомянутые методы к исследованию сегнетоэлектрических кристаллов титанил-фосфата калия (KTiOPO_4 , КТР), представляющего собой жесткий сегнетоэлектрик, и ниобата бария-стронция ($\text{Sr}_{0,75}\text{Ba}_{0,25}\text{Nb}_2\text{O}_6$, SBN-75), который обладает размытым фазовым переходом вблизи комнатной температуры и классифицируется как мягкий сегнетоэлектрик или релаксор.

Цель диссертационной работы заключается в развитии методов и техники антиалиасной фильтрации и субдискретизации в широкополосной импульсной терагерцовой спектроскопии посредством разработки и применения квазиоптических фильтров на базе интерференционных метоповерхностей для повышения точности и сокращения времени измерения спектра в ограниченной частотной полосе при исследовании диэлектрических свойств сегнетоэлектрических кристаллов.

В рамках поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- Исследование свойств и применение интерференционных метаповерхностей в качестве антиалиасных фильтров при исследованиях характеристик модельных образцов в низкочастотной области спектра техникой импульсной терагерцовой спектроскопии с увеличенным шагом выборки;
- Разработка, исследование характеристик и тестирование узкополосного пропускающего полосового фильтра на основе интерференционных метаповерхностей при исследовании характеристик модельных образцов с применением метода субдискретизации в импульсной терагерцовой спектроскопии;
- Исследование терагерцовых оптических и диэлектрических характеристик сегнетоэлектрических кристаллов титанл фосфата калия (KTiOPO_4) и ниобата бария-стронция ($\text{Sr}_{0,75}\text{Ba}_{0,25}\text{Nb}_2\text{O}_6$) в субтерагерцовом спектральном диапазоне.

Научная новизна работы. Предложен способ сокращения времени измерения импульсных терагерцовых спектрометров для случая низкочастотных измерений, основанный на применении высокоэффективных интерференционных емкостных микроструктур в качестве антиалиасных (anti-aliasing) фильтров и одновременном увеличении интервала дискретизации системы регистрации спектрометра. Способ протестирован при измерении спектров пропускания эталонных образцов – пропускающих полосовых фильтров с центральными частотами 156 и 376 ГГц и шириной полосы ~12%. В результате показано сокращение времени измерения спектрометра до 12 раз при сохранении точности измерений.

Разработан узкополосный квазиоптический фильтр, основанный на эталоне Фабри-Перо (ФФП), последовательно совмещаемый с широкополосным полосовым пропускающим фильтром, подавляющим высшие резонансы эталона. На примере измерения пропускания кремниевой пластины с помощью разработанного фильтра с центральной частотой в окрестности 850 ГГц и с полной шириной на полувысоте ~4% впервые экспериментально показана возможность реализации метода субдискретизации в импульсной терагерцовой спектроскопии, позволившего сократить время измерения в 2 раза.

Исследована температурная зависимость оптических свойств кристаллов КТР в субтерагерцовой области спектра в диапазоне температур $-192 \div +150$ °С. Изменения трёх главных компонент показателя преломления кристалла описаны универсальными выражениями Зельмейера, зависящими от температуры.

Показано, что коэффициенты выражений Зельмейера демонстрируют близкие к линейной температурные зависимости, что свидетельствует о незначительном влиянии ионного механизма проводимости кристалла на оптические свойства в терагерцовом спектральном диапазоне.

Исследована комплексная диэлектрическая проницаемость монокристалла SBN-75 в субтерагерцовой области спектра в диапазоне температур $+25 \div +200$ °С. Показано, что характер и спектр диэлектрической проницаемости в диапазоне $0,2 \div 1$ ТГц для излучения, поляризованного ортогонально полярной оси кристалла, не меняется с температурой, в то время как для излучения, поляризованного вдоль полярной оси, наблюдается рост диэлектрической проницаемости при нагреве до 100 °С и последующее уменьшение при дальнейшем нагреве кристалла, соответствующее уширенному фазовому переходу характерному для сегнетоэлектриков релаксорного типа.

Практическая значимость работы. Предложенные методы, основанные на антиалиасной фильтрации с последующим увеличением интервала дискретизации и полосовой фильтрации с применением субдискретизации, позволяют значительно сократить время измерения сигналов импульсных терагерцовых спектрометров при исследовании сред в ограниченной, представляющей интерес частотной области и при реализации техники терагерцовой визуализации.

Полученные термооптические свойства кристаллов КТР позволят учесть влияние температуры в широком диапазоне при разработке нелинейно-оптических генераторов терагерцового излучения на основе данных кристаллов.

Измеренная комплексная диэлектрическая проницаемость монокристалла SBN-75 позволит на его основе разрабатывать нелинейно-оптические и электронные устройства, в которых требуются среды с большими значениями диэлектрической восприимчивости и электрооптического коэффициента.

Защищаемые положения:

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 $0,2 \div 1$ ТГц может быть описана одночленными выражениями Зельмейера с линейной зависимостью значений коэффициентов для диапазона температур $-192 \div +150$ °С.

Апробация работы. Результаты работы докладывались автором на: международной научно-технической конференции «Молодежь, инновации, технологии» (Новосибирск 2019); Российской конференции и школе молодых учёных по актуальным проблемам полупроводниковой фотозлектроники 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), XVI международная конференция Pulsed Lasers and Laser Applications AMPL (Томск, 2023), Российской конференции и школе молодых учёных по актуальным проблемам полупроводниковой фотозлектроники ФОТОНИКА (Новосибирск 2023).

Личный вклад автора. Все экспериментальные результаты, изложенные в работе, получены автором лично или при её участии. Автор лично провела численное моделирование разрабатываемых узкополосных пропускающих фильтров и экспериментально исследовала их спектральные характеристики. Автор выполняла обработку экспериментальных данных, принимала активное участие в обсуждении полученных результатов и их интерпретации, и также в подготовке научных публикаций.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 26 работ, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 20 – тезисы международных и всероссийских конференций, получено 2 свидетельства о регистрации Ноу-Хау.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении даётся описание терагерцового диапазона частот электромагнитного спектра, его основные свойства и области применения. Описываются этапы освоения ТГц диапазона частот и развитие метода широкополосной импульсной терагерцовой спектроскопии, (ИТС). Даётся описание эффекта алиасинга и метода субдискретизации. Обосновывается актуальность исследования, его цели и задачи. Формулируются новизна и практическая значимость полученных результатов, представляются основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится описание физических принципов генерации и детектирования ТГц излучения в системе ИТС, её устройство, возможности и особенности. Даётся подробное описание импульсного терагерцового спектрометра, разработанного в ИАиЭ СО РАН. Типичным сигналом спектрометра является однопериодное колебание электромагнитного поля, длительностью ~ 1 пс и несущее спектр частот, перекрывающих декаду [7,8], а его регистрация базируется на аналогово-цифровом преобразовании, а дальнейшая обработка осуществляется в цифровом виде с применением преобразования Фурье. Таким образом, для метода импульсной спектроскопии необходимо выполнение теоремы отсчётов (Уиттакера-Котельникова-Шеннона) [9,10], в соответствии с которой происходит выбор временного шага дискретизации, однозначно связанного с пространственным шагом линии задержки системы регистрации спектрометра [11]:

$$f_s \geq 2f_{max}$$

где f_s – частота дискретизации, f_{max} – максимальная частота в спектре непрерывного сигнала.

Далее, в *параграфах 1.2-1.3* подробно излагаются хорошо известные из теории дискретизация сигналов, теорема отсчётов, возникновение эффекта алиасинга при недостаточной частоте дискретизации, приводящего к искажению восстановленного сигнала. Копии частотного спектра исходного сигнала суммируются в пересекающихся областях, что даёт мнимое увеличение веса компонент с этими частотами в спектре, подмену высокочастотных компонент низкочастотными. Для устранения эффекта алиасинга применяется антиалиасный фильтр – фильтр нижних частот, подавляющий спектральные компоненты выше $f_s/2$ (частота Найквиста). Такой фильтр блокирует все частоты,

которые могут давать алиасинг в дискретизированном сигнале. Рассматривается эффект алиасинга и его влияние на последующий анализ спектров в ИТС.

В *параграфе 1.4* рассматривается метод субдискретизации (англ. undersampling) для применения в импульсной терагерцевой спектроскопии. Субдискретизация реализуется контролируемо при частоте дискретизации меньше заданного теоремой отсчётов критерия. При этом производится предварительная полосовая фильтрация сигнала [12]. Для восстановления сигнала без искажений необходимо удовлетворение следующему критерию:

$$1 < k < \frac{f_H}{f_H - f_L}$$

где k – порядок субдискретизации, т. е. кратность увеличения шага выборки; f_H, f_L – высшая и низшая частоты, присутствующие в спектре полезного сигнала, соответственно. Если полоса фильтра обеспечивает $k > 2$, субдискретизация возможна.

Вторая глава посвящена описанию и применению емкостных интерференционных микроструктур в качестве антиалиасных фильтров (фильтры нижних частот, ФНЧ) в ИТС при субтерагерцевых измерениях. Приводится краткий исторический экскурс в развитии технологий ФНЧ в дальнем инфракрасном и ТГц диапазонах.

Для исследования использовались ФНЧ с частотами среза (ГГц) 248, 503, 1018, 1682 (рисунок 1). ФНЧ разработаны в АТИЦ ФФ НГУ совместно с филиалом ИФП СО РАН «КТИПИМ» под руководством С. А. Кузнецова и реализованы в виде многослойных интерференционных структур на основе плазмонных метаповерхностей емкостного типа [13,14]. Эффект интерференции между слоями обеспечивает резкий край фильтра и подавление сигнала на уровне 30–40 дБ выше частоты среза.

В качестве эталонных объектов исследования выбраны пропускающие полосовые фильтры (ППФ) с центральными частотами $f_{max} = 156$ и 376 ГГц и полной шириной на полувысоте (FWHM) $\sim 12\%$, собранные из трёх и четырёх, соответственно, свободно стоящих медных фольг с прорезями в виде триполей и крестов [15], обеспечивающие внеполосное подавление на уровне 40–50 дБ без паразитных пиков пропускания. Данные ППФ, как и ФНЧ разработаны под руководством С. А. Кузнецова.

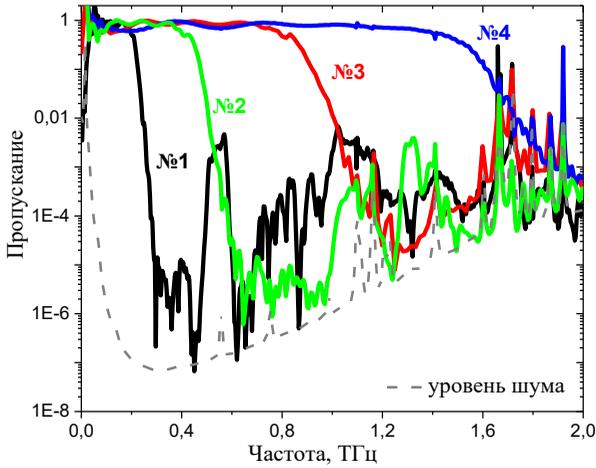


Рисунок 1. Спектры пропускания исследуемых ФНЧ, измеренные с помощью ИТС.

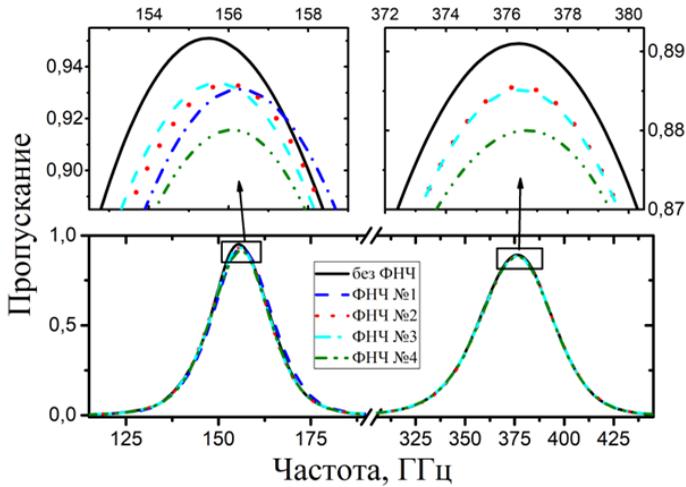


Рисунок 2. Спектры пропускания ППФ 156 (слева) и 376 ГГц (справа), измеренные с различными ФНЧ. Нижние рисунки – обзорный вид, верхние – максимум пропускания в увеличенном масштабе.

Полученные результаты измерений соответствуют ожиданиям. Значения центральной частоты f_{max} , определённые с помощью аппроксимации, совпадают с хорошей точностью (рисунок 2). Разброс этих значений для обоих ППФ находится в диапазоне $\sim 0,1$ ГГц. Разброс измеренных значений T_{max} , составляет

1% для 376 ГГц ППФ и около 4% для 156 ГГц ППФ. Это можно связать с отношением сигнал/шум ТГц генератора, которое приблизительно в 2,5 раза больше для частоты 376 ГГц, чем для 156 ГГц. Для обоих случаев при измерении без ФНЧ T_{max} превышает значения, полученные с ФНЧ. Это может быть связано с влиянием долговременного дрейфа ТГц-сигнала системы, поскольку время измерения без ФНЧ превышает время с ФНЧ в 2 и более раз.

В результате исследования в предельном случае была показана возможность сокращения времени измерения спектрометра до 12 раз при повышении точности измерений за счёт нивелирования долговременного дрейфа нормировочного сигнала. Данный подход применим для увеличения динамического диапазона и отношения сигнал/шум спектрометра в субтерагерцовом диапазоне.

В третьей главе описываются моделирование и разработка дизайна, а также исследование характеристик узкополосного квазиоптического фильтра с центральной частотой в окрестности 0,8 ТГц ($\lambda = 375$ мкм), пригодного для реализации метода субдискретизации в ИТС. Сам метод апробирован при измерении пропускания высокоомной кремниевой пластины – эталонного материала для ТГц диапазона. Частота 0,8 ТГц выбрана исходя из ряда критериев: 1) метод субдискретизации целесообразно применять на высоких частотах, так как в длинноволновой области возможно применение ФНЧ; 2) в диапазоне 800–900 ГГц находится локальное окно прозрачности атмосферы; 3) на частоте 806 ГГц расположена линия поглощения молекулы СО, являющегося эталонным газом для частотной калибровки систем ТГц спектроскопии, что в будущем позволит протестировать метод субдискретизации при измерении характеристик узкой линии поглощения данного газа; 4) потенциально исследование в окрестности 0,8 ТГц позволит изучить моду, предположительно связанную с нарушением стехиометрии в кристалле КТР [16].

Конструкция фильтра основана на эталоне Фабри-Перо и представляет из себя полипропиленовую плёнку с нанесёнными с обеих сторон рефлекторами, представляющими собой частотно-избирательные поверхности (ЧИП) в форме квадратных прорезей в напылённом слое алюминия. Посредством численного моделирования пропускания предложенной структуры определены точные геометрические параметры элементарной ячейки структуры ЧИП.

Далее на основе полученных при моделировании данных были изготовлены ФФП с $FWHM \approx 4\%$. В качестве диэлектрического слоя взята

полипропилен толщиной ~ 120 мкм. $FWHM$ изготовленного ФФП составляет 5,2%, что довольно близко к расчетному (рисунок 3).

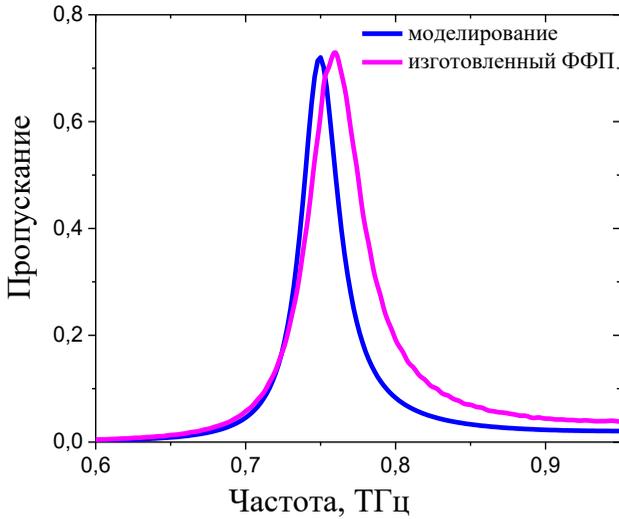


Рисунок 3. Пропускание модельного и изготовленного ФФП.

Для оценки выигрыша от применения метода субдискретизации было сделано предположение, что алиасинг от внеполосового сигнала допустим на уровне 0,01%. По полученным графикам (рисунок 4) определены: $f_L = 617$ ГГц и $f_H = 1096$ ГГц.

При фильтрации сигнала результирующим фильтром с применением субдискретизации параметр k принимает целочисленное значение $k = 2$, т.е. шаг дискретизации можно увеличить в **2** раза.

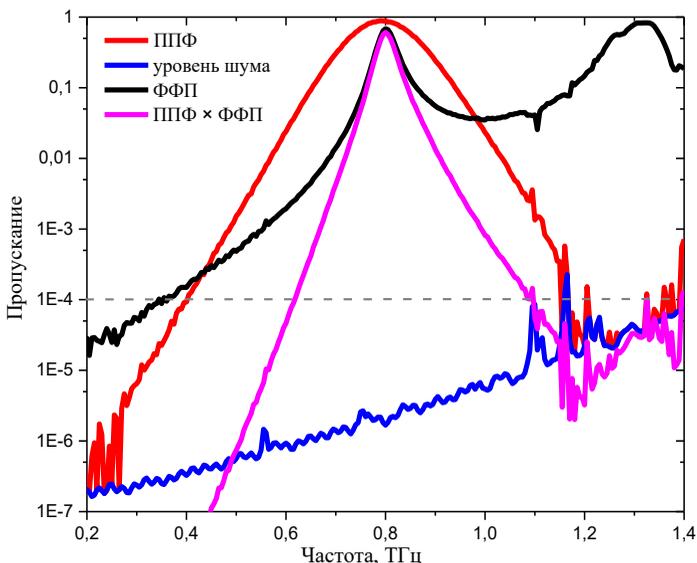


Рисунок 4. Измеренное пропускание результирующего фильтра шириной 4% (розовый), состоящего из полосового фильтра с центральной частотой 0,8 ТГц и FWHM = 20% (красный) и ФФП (чёрный) с FWHM = 5,2%. Синий – уровень шума ИТС. Серый пунктир – уровень пропускания 10^{-4} .

В параграфе 3.3 на примере измерения пропускания высокоомоной кремниевой пластинки с использованием разработанных узкополосных фильтров на основе эталона Фабри-Перо впервые в мире протестирован метод субдискретизации в ИТС.

ФФП был отстроен на максимальную частоту пропускания 0,85 ТГц, что соответствует центру локального атмосферного окна. Таким образом $f_N \geq f_H = 1,099$ ТГц, частота дискретизации взята с небольшим запасом, $f_S = 2f_N = 2,44$ ТГц, что соответствует интервалу дискретизации $\Delta t = 410$ фс для случая обычного измерения, выполняемого в соответствии с теоремой отсчетов. В случае субдискретизации $\Delta t_s = \Delta t \times k = 820$ фс (рисунок 5).

Показано, что метод субдискретизации работает в импульсной терагерцовой спектроскопии с 95% точностью. Полученные при этом результаты хорошо согласуются с измерениями без применения ФФП и метода субдискретизации. Но при этом применение данного метода, как и антиалиасных фильтров, даёт выигрыш по времени измерения.

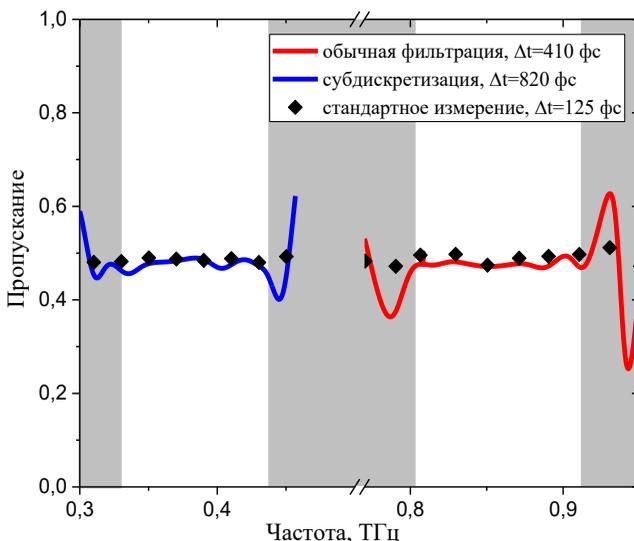


Рисунок 5. Пропускание высокоомной кремниевой пластины при фильтрации (красная кривая) и с субдискретизацией (синяя кривая). Черные ромбы - обычные измерения на ИТС без фильтрации. Не закрашенным серым цветом областям соответствуют диапазоны с достоверными данными.

В четвёртой главе приводится исследование оптических и диэлектрических свойств в терагерцовом диапазоне сегнтоэлектрических кристаллов с применением предложенных подходов.

В *параграфе 4.1* описываются исследования оптических свойств кристалла КТР в широком температурном диапазоне в ТГц области. Кристалл КТР рассматривается как перспективный материал для преобразования инфракрасного лазерного излучения в терагерцовое [16–21]. Это важно для создания малогабаритных терагерцовых источников излучения, перестраиваемых в широком диапазоне частот и обладающих высокой спектральной яркостью. Среди задач, которые можно решать с помощью таких источников, следует отметить создание терагерцового ЛИДАРа для мониторинга малых газовых компонентов в приземном слое атмосферы [22,23]; продвижение нелинейной оптики в новые спектральные диапазоны [24] и изучение избирательного действия терагерцового излучения на живые организмы [25].

Исследование кристаллов КТР осуществлено в полосе 0,2–1 ТГц с использованием ФНЧ. Применение ФНЧ позволило увеличить временной шаг до

400 фс при таком же диапазоне, что позволило сократить время измерения до 5 раз. Результаты экспериментального исследования оптических свойств кристаллов КТР проведены в интервале температур $-192 \div +150$ °С для трёх главных оптических осей (рисунок 6).

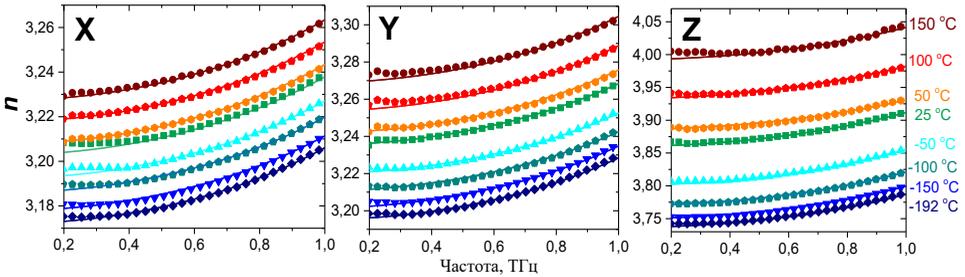


Рисунок 6. Дисперсия показателей преломления осей x , y и z при разных температурах. Символы — измеренные данные; непрерывные линии — аппроксимация выражениями Зельмейера.

Дисперсия показателей преломления хорошо аппроксимируется выражениями Зельмейера:

$$n_i^2 = A_i + \frac{B_i \lambda^2}{\lambda^2 - C_i}$$

где A_i , B_i , C_i — коэффициенты Зельмейера, определяемые по экспериментальным данным методом наименьших квадратов; i обозначает оси x , y , z ; λ — длина волны в мкм. Результаты показывают, что температурная зависимость коэффициентов Зельмейера для всех оптических осей близка к линейной и не испытывает экстремума вблизи температур активации катионной проводимости кристалла КТР при $-73 \dots 23$ °С.

Температурные зависимости коэффициентов Зельмейера хорошо аппроксимируются линейными функциями:

$$A_i = A_{01} + \delta_{A_i} T,$$

$$B_i = B_{01} + \delta_{B_i} T,$$

$$C_i = C_{01} + \delta_{C_i} T.$$

Значения этих коэффициентов, полученные из экспериментальных данных, указаны в таблице:

Значения коэффициентов Зельмейера

Ось	A_0	$\delta_A \times 10^{-1}, K^{-1}$	B_0	$\delta_B \times 10^{-1}, K^{-1}$	$C_0, \mu m^2$	$\delta_C, \mu m^2 \cdot K^{-1}$
x	8.89	7.32	1.35	2.65	12848.15	1.28
y	9.14	9.36	1.31	4.54	12857.17	1.68
z	11.08	22	3.67	21.3	10566.31	0.83

На основании отсутствия сильного отклонения от линейной зависимости сделан вывод, что изменение механизма электропроводности КТР вдоль оси c при её охлаждении незначительно влияет на терагерцовые оптические свойства. Следовательно, это не должно сказываться на нелинейно-оптических процессах, происходящих на терагерцовых частотах в том числе при взаимодействии с фононами, связанными с колебаниями калиевой подрешетки.

Также было установлено, что температурное изменение угла V_z в субтерагерцовом спектре составляет несколько градусов ($<5^\circ$). Следовательно, для проектирования преобразователей терагерцовой частоты необходимо учитывать данную зависимость от температуры.

В параграфе 4.2 описывается исследование диэлектрических свойств кристалла SBN-75. SBN имеет высокий электрооптический коэффициент. Это свойство позволяет использовать SBN в модуляторах терагерцового диапазона, переключателях и других устройствах, требующих быстрого и эффективного управления терагерцовыми сигналами [26,27].

В данной работе для исследования диэлектрических свойств кристалла SBN-75 использовались последовательно установленные ФНЧ 2 и ФНЧ 3, а также ФНЧ 3 и ФНЧ 4 для повышения внеполосового подавления и устранения эффекта алиасинга, так как одиночных фильтров оказалось недостаточно ввиду низкого пропускания исследуемого образца. В предыдущем случае измерения эталонных ППФ с пропусканием $>90\%$ (глава два) вклад ложных компонент спектра, связанных с алиасингом сигнала от внеполосового просачивания ФНЧ, лежащего ниже уровня -40 дБ, был ниже шума измерений, что позволило использовать единичные ФНЧ. В случае с SBN-75, обладающего пропусканием менее -30 дБ при толщине 160 мкм, вклад алиасинга с амплитудой -40 дБ может оказаться сопоставим с уровнем полезного сигнала, поэтому потребовалась дополнительная фильтрация.

Результаты измерений комплексной диэлектрической проницаемости кристалла SBN-75 методом ИТС в диапазоне температур $+25 \div +200$ °С

представлены на рисунке 7. Измеренные диэлектрические ТГц свойства кристалла по величинам и характеру дисперсии качественно достаточно хорошо согласуются с данным других групп для монокристаллов SBN-35 [28] и SBN-61 [27].

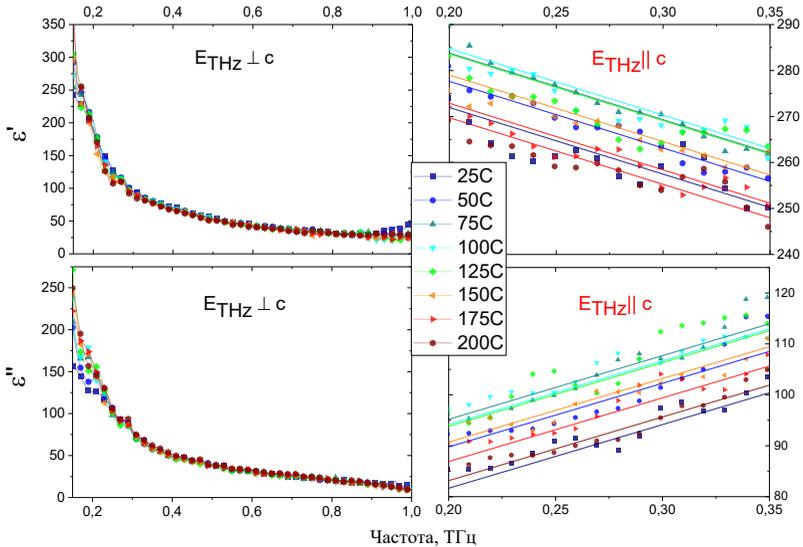


Рисунок 7. Дисперсия действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости при различных температурах кристалла SBN-75. Для полярной оси сплошными линиями представлена линейная аппроксимация экспериментальных данных.

Диэлектрическая проницаемость неполярной оси ($E \perp c$) выше чем у полярной ($E \parallel c$), что может быть объяснено влиянием сильных фоновых пиков лежащих за пределами наших измерений на частотах в окрестности 1,5, 2,4 и 3 ТГц [27]. Диэлектрическая проницаемость для неполярной оси практически не зависит от температуры, в то время как ее изменение для полярной оси испытывает рост при нагреве кристалла до 100 °С и последующее уменьшение при дальнейшем нагреве.

Из-за слабого сигнала, обусловленного низким пропусканием необыкновенной волны в кристалле, и высоким уровнем измерительных шумов сложно оценить изменение наклона кривых для полярной оси с изменением температуры. Поэтому, для наглядности проведена линейная аппроксимация экспериментальных данных в диапазоне 0,2—0,35 ТГц с сохранением угла

наклона прямой для каждой температуры (правые графики рисунка 7). Для наглядности температурная зависимость значения диэлектрической проницаемости для полярной оси на частоте 0,25 ТГц представлена на рисунке 8.

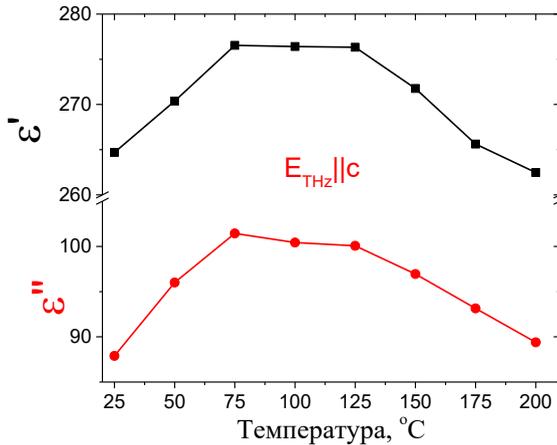


Рисунок 8. Температурная зависимость комплексной диэлектрической проницаемости кристалла SBN-75 для полярной оси ($E_{THz} || c$) для частоты 0,25 ТГц.

Из рисунка 8 как реальная, так и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости полярной оси демонстрируют схожее поведение. Известно, что температура, при которой диэлектрическая проницаемость релаксора для определенной частоты принимает максимальное значение ϵ'_m , смещается в большие значения с ростом частоты электромагнитной волны. Сам же характер изменения значения от температуры $\epsilon'(T)$ демонстрирует уширение и уменьшение максимально достигаемого значения ϵ'_m [29]. В нашем случае максимум ϵ'_m наблюдается в окрестности 100 °C, а характер поведения $\epsilon'(T)$ в диапазоне +25 ÷ +200 °C демонстрирует слабое изменение в пределах 10%. В целом такое поведение хорошо согласуется с данными для частоты 9,4 ГГц, представленными в [29], в которой наблюдается такая же «уплощенная» вершина зависимости $\epsilon'(T)$, полученная по измерениям диэлектрики образцов SBN-75 волноводным методом. Но в отличие от отмеченной работы, в которой $\epsilon_m(9,4 \text{ ГГц}) \approx 10^3$, в нашем случае $\epsilon_m(0,25 \text{ ТГц}) \approx 276$, т.е. приблизительно в 3,6 раза меньше.

С помощью метода антиалиасной фильтрации, заключающейся в применении ФНЧ и увеличении интервала дискретизации, а также пропорциональном увеличении времени интегрирования сигнала, впервые удалось определить с хорошей точностью значения комплексной

диэлектрической проницаемости кристалла SBN-75 в субтерагерцовой области для диапазона температур $+25 \div +200$ °С, несмотря на низкое пропускание образцов. При этом, по сравнению с обычным режимом мы сократили время измерения до 5 раз.

Полученные данные согласуются с результатами, полученными ранее другими научными группами. Однако, для более точного описания физических механизмов, происходящих в релаксорах SBN, включая SBN-75, требуется температурное исследование диэлектрической восприимчивости в более широком спектральном диапазоне частот. Тем не менее полученные значения диэлектрической восприимчивости SBN-75 уже могут быть использованы для разработки нелинейно-оптических генераторов субтерагерцовых волн на основе излучения черенковского типа [30,31]. В предложенной схеме генерации поглощение материала играет второстепенную роль, так как сам процесс реализуется в приповерхностном слое. А высокое значение электрооптического коэффициента, а значит и квадратичной восприимчивости, SBN-75 может быть большим преимуществом.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе:

Предложен метод сокращения времени измерения на ИТС при низкочастотных измерениях, основанный на применении высокоэффективной интерференционной емкостной микроструктуры в качестве антиалиасного фильтра и одновременном увеличении интервала дискретизации системы регистрации спектрометра. Метод был опробован путём измерения спектров пропускания эталонных образцов – полосовых пропускающих фильтров. Результаты показали, что время измерений на спектрометре может быть сокращено в 12 раз при сохранении точности измерений.

Разработана конструкция узкополосного квазиоптического фильтра на основе эталона Фабри-Перо в виде полипропиленовой плёнки с решетчатым отражателем, последовательно совмещаемого с широкополосным полосовым пропускающим фильтром, подавляющим высшие резонансы эталона. Впервые экспериментально продемонстрирована возможность внедрения в импульсную терагерцовую спектроскопию метода субдискретизации, позволяющего сократить время измерения в 2 раза на примере измерения пропускания кремниевой пластины с использованием разработанного ФФП.

Температурная зависимость оптических свойств кристаллов KTiOPO_4 в субтерагерцовой области исследована в диапазоне температур от -192 до $+150$ °С. Изменение трёх главных компонент показателя преломления кристалла описывается универсальными выражениями Зельмейера, которое зависит от температуры. Полученные результаты показывают, что коэффициенты данных выражений имеют температурную зависимость, близкую к линейной, что свидетельствует о незначительном влиянии ионного механизма проводимости кристалла в терагерцовой области спектра на оптические свойства.

Исследована комплексная диэлектрическая проницаемость монокристалла SBN-75 в субтерагерцовой области спектра в диапазоне температур $+25 \div +200$ °С. Показано, что характер и спектр диэлектрической проницаемости в диапазоне $0,2\text{—}1$ ТГц для излучения, поляризованного ортогонально полярной оси кристалла, не меняется с температурой, в то время как для излучения, поляризованного вдоль полярной оси, наблюдается рост диэлектрической проницаемости при нагреве до 100 °С и последующее уменьшение при дальнейшем нагреве кристалла, соответствующее уширенному фазовому переходу характерному для сегнетоэлектриков релаксорного типа.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

- 1) **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.
- 2) **Rybak A.**, Antsygin V., Mamrashev A., Nikolaev N. Terahertz optical properties of KTiOPO_4 crystal in the temperature range of $(-192)\text{—}150$ °C // Crystals. 2021. Т. 11. № 2.
- 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.
- 4) **Rybak A.A.**, Antsygin V.D., Mamrashev A.A., Nikolaev N.A. Temperature dependence optical properties of KTP crystals in the millimeter wavelength range // Pulsed Lasers and Laser Applications (AMPL-2021). Abstracts of XV International Conference. Tomsk, 2021. PP. 107-108.

- 5) Николаев Н.А., **Рыбак А.А.**, Мамрашев А.А., Анцыгин В.Д. Терагерцовые свойства сегнетоэлектриков KTiOPO_4 , KTiOAsO_4 и KNbO_3 // ФОТОНИКА 2021. ИФП СО РАН при содействии Министерства науки и высшего образования РФ. 2021. С. 117.
- 6) **Rybak A.**, Antsygin V., Mamrashev A., Nikolaev N. Temperature dependence optical properties of KTP crystals in the terahertz range // Modern problems of laser physics - MPLP-2021. The IX International Symposium technical digest. Novosibirsk, 2021. P. 180-18.
- 7) Рыбак А.А. Терагерцовые свойства нелинейных кристаллов KTiOPO_4 в диапазоне температур $-192 \div +150$ °С // МНСК-2021. Материалы 59-й Международной научной студенческой конференции. Новосибирск, 2021. С. 40.
- 8) Кузнецов С.А., Гельфанд А.В., Лазорский П.А., Федоринин В.Н., Аржанников А.В., Николаев Н.А., Мамрашев А.А., **Рыбак А.А.**, Генцелев А.Н., Бессмельцев В.П. Высокоэффективные квазиоптические частотные фильтры ТГц диапазона на основе частотно-избирательных поверхностей // ФОТОНИКА 2021. ИФП СО РАН при содействии Министерства науки и высшего образования РФ. 2021. С. 48.
- 9) Nikolaev N.A., **Rybak A.A.**, Kuznetsov S.A. Application of metasurface-based low-pass filters for improving THz-TDS characteristics // Journal of Physics: Conference Series. 4th International Conference on Metamaterials and Nanophotonics, METANANO 2019. 2020. P. 012118.
- 10) **Rybak A.A.**, Antsygin V.D., Nikolaev N.A. Terahertz properties of potassium titanyl phosphate in a wide temperature range // Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications—TERA 2020. The 4-th International Conference. 2020. P. 16.
- 11) Рыбак А.А. Исследование терагерцовых свойств нелинейных кристаллов калий титанил фосфата в широком диапазоне температур // Фотоника и квантовые оптические технологии. Материалы 58-й Международной научной студенческой конференции. Новосибирск, 2020. С. 28.
- 12) Mamrashev A., Minakov F.A., Nikolaev N.A., **Rybak A.A.**, Kuznetsov S.A., Gelfand A.V. Broadband 1D-grid-based terahertz polarizers and their applications in THz-TDS // Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications—TERA 2020. The 4-th International Conference. 2020. P. 34.
- 13) **Rybak A.A.**, Antsygin V.D., Nikolaev N.A. Thermo-optical properties of potassium titanyl phosphate in terahertz radiation // International Conference on Laser Optics. 2020. P. 32.

- 14) Рыбак А.А. Применение высокоэффективных микроструктурных фильтров нижних частот в терагерцовой импульсной спектроскопии // Молодежь, инновации, технологии. Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции. Под редакцией Е.Г. Гуровой, С.В. Макарова. 2019. С. 140-141.
- 15) **Рыбак А.А.**, Николаев Н.А., Кузнецов С.А. Повышение технических характеристик импульсных терагерцовых спектрометров с помощью микроструктурных квазиоптических фильтров нижних частот // ФОТОНИКА 2019 ИФП СО РАН при содействии Министерства науки и высшего образования РФ. 2019. С. 153.
- 16) Рыбак А.А. Применение микроструктурных квазиоптических фильтров нижних частот для повышения технических характеристик импульсного терагерцового спектрометра // МНСК-2019. Фотоника и квантовые оптические технологии. Материалы 57-й Международной научной студенческой конференции. 2019. С. 22.
- 17) Рыбак А.А. Применение квазиоптических микроструктур в качестве антиалиасных фильтров для задач импульсной терагерцовой спектроскопии // Материалы Юбилейной международной молодежной конференции по люминесценции и лазерной физике, посвященной 50-летию первой школы по люминесценции в Иркутске. 2019. С. 79.
- 18) Nikolaev N., **Rybak A.**, Kuznetsov S., Yang S.H. Metasurface-based anti-alias filters for improved THZ-TDS measurements // International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz. 2019. P. 8874107.
- 19) **Rybak A.**, Nikolaev N., Kuznetsov S. Design and investigation of a narrowband terahertz filter based on Fabry-Perot etalon // The 5-th International Conference "Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications" (TERA-2023). Abstract book. Moscow, 2023. С. 88-89.
- 20) **Рыбак А.А.**, Кузнецов С.А. Николаев Н.А. Терагерцовый узкополосный пропускающий фильтр на базе интерференционной микроструктуры // HOLOEXPO 2022. Тезисы докладов. XIX международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям. Барнаул, 2022. С. 373-378.
- 21) Рыбак А. А. Моделирование узкополосного фильтра на основе резонатора фабри - перо для применения в импульсной терагерцовой спектроскопии // МНСК-2022. Фотоника и квантовые оптические технологии. Материалы 60-й Международной научной студенческой конференции. Новосибирск, 2022. С. 41.

- 22) **Рыбак А.А.**, Кузнецов С.А., Николаев Н.А. дизайн терагерцового фильтра с шириной полосы менее 4 % на базе частотно-избирательных поверхностей // XII международная конференция по фотонике и информационной оптике. Сборник научных трудов. Москва, 2023. С. 436-437.
- 23) Nikolaev N.A., **Rybak A.A.**, Kuznetsov S.A. Metamaterials for antialiasing filtration and harmonic mixing in terahertz time-domain spectroscopy // The 5-th International Conference "Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications" (TERA-2023). Abstract book. Moscow, 2023. С. 118.
- 24) Nikolaev N.A., Rybak A.A., Kuznetsov S.A. Improving the technique of terahertz time-domain spectroscopy by means of antialiasing filtration and undersampling // Proc. SPIE 12776, Infrared, Millimeter-Wave, and Terahertz Technologies X, 127760G (26 November 2023).
- 25) Способ сокращения времени измерения и уменьшения шума сигнала импульсных терагерцовых спектрометров с разрешением во времени на основе применения метода андерсемплинга. Николаев, Н. А., Кузнецов, С. А. & **Рыбак, А. А.**, Новосибирский государственный университет. Результат исследования: Патенты/Свидетельства о регистрации > свидетельство о регистрации ноу-хау. Дата приоритета 28 дек 2021.
- 26) Разработка узкополосных пропускающих фильтров для терагерцового диапазона на основе эталона Фабри-Перо. **Рыбак, А. А.**, Кузнецов, С. А. & Николаев, Н. А. Новосибирский государственный университет. Результат исследования: Патент/Свидетельства > свидетельство о регистрации ноу-хау № 77. Дата приоритета 22 дек. 2022.

Список цитируемой литературы

1. Mittleman D.M. Perspective: Terahertz science and technology // Journal of Applied Physics. 2017. Vol. 122, № 23. P. 230901.
2. Linden K. Single mode, short cavity, Pb-salt diode lasers operating in the 5, 10, and 30 μm spectral regions // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1985. Vol. 21, № 4. P. 391–394.
3. Nikitkina A.I. et al. Terahertz radiation and the skin: a review // J Biomed Opt. 2021. Vol. 26, № 4. P. 043005.
4. Nourinovin S. et al. Terahertz metastructures for noninvasive biomedical sensing and characterization in future health care [Bioelectromagnetics] // 70. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2022.

5. Novikova A. et al. A non-destructive method for quality control of the pellet distribution within a MUPS tablet by terahertz pulsed imaging // *European Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2018. Vol. 111. P. 549–555.
6. Ferguson B., Zhang X.-C. Materials for terahertz science and technology // *Nat Mater*. 2002. Vol. 1, № 1. P. 26–33.
7. Sartorius B. et al. All-fiber terahertz time-domain spectrometer operating at 1.5 μm telecom wavelengths // *Opt. Express*. 2008. Vol. 16, № 13. P. 9565.
8. Анцыгин В. Д., Мамрашев А. А., Николаев Н. А., Потатуркин О. И. Малогабаритный терагерцовый спектрометр с использованием второй гармоники фемтосекундного волоконного лазера. *Автометрия*. 2010, Т. 46, №3. С. 110-117.
9. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов, М: Радио и связь, 1986. – 512 с.
10. Shannon C.E. Communication in the Presence of Noise // *Proceedings of the IRE*. 1949. Vol. 37, № 1. P. 10–21.
11. Mamrashev A.A., Potaturkin O.I. Characteristics of the system of polarization-optical detection of a pulsed terahertz spectrometer // *Optoelectron.Instrument.Proc*. 2011. Vol. 47, № 4. P. 332–337.
12. Макс Жак. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: В 2-х томах. Пер. с франц. — М.: Мир, 1983. — Т. 1. 312 с.
13. Navarro-Cia M. et al. Route for Bulk Millimeter Wave and Terahertz Metamaterial Design // *Quantum Electronics, IEEE Journal of*. 2011. Vol. 47. P. 375–385.
14. Kuznetsov S.A., Arzhannikov A.V., Fedorinin V.N. Narrowband Ultra-Thin Metasurface Absorbers for subTHz Band and Their Application in Spectrometric Pyroelectric Detectors // 2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). 2018. P. 1–2.
15. Kuznetsov S.A. et al. Microstructured frequency selective quasi-optical components for subterahertz and terahertz applications // 2013 38th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). 2013. P. 1–2.
16. Antsygin V.D. et al. Terahertz optical properties of potassium titanyl phosphate crystals // *Opt. Express, OE. Optica Publishing Group*, 2014. Vol. 22, № 21. P. 25436–25443.
17. Mamrashev A. et al. Optical Properties of KTP Crystals and Their Potential for Terahertz Generation: 8 // *Crystals. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2018. Vol. 8, № 8. P. 310.
18. Huang J.-G. et al. Phase matching in RT KTP crystal for down-conversion into the THz range // *Laser Phys. Lett. IOP Publishing*, 2018. Vol. 15, № 7. P. 075401.
19. Wu M.-H. et al. Generation of ~100 kW narrow-line far-infrared radiation from a KTP off-axis THz parametric oscillator // *Optica, OPTICA. Optica Publishing Group*, 2019. Vol. 6, № 6. P. 723–730.

20. Wu M.-H. et al. Terahertz parametric generation and amplification from potassium titanyl phosphate in comparison with lithium niobate and lithium tantalate // *Opt. Express*, OE. Optica Publishing Group, 2016. Vol. 24, № 23. P. 25964–25973.
21. Nikolaev N.A. et al. β -BBO, LBO, AND KTP Nonlinear Crystals as Sources of Millimeter-Wave Radiation // *Russ Phys J.* 2020. Vol. 63, № 6. P. 1025–1029.
22. Bigourd D. et al. Detection and quantification of multiple molecular species in mainstream cigarette smoke by continuous-wave terahertz spectroscopy // *Opt. Lett.*, OL. Optica Publishing Group, 2006. Vol. 31, № 15. P. 2356–2358.
23. Hsieh Y.-D. et al. Dynamic terahertz spectroscopy of gas molecules mixed with unwanted aerosol under atmospheric pressure using fiber-based asynchronous-optical-sampling terahertz time-domain spectroscopy // *Sci Rep.* 2016. Vol. 6. P. 28114.
24. Hafez H.A. et al. Terahertz Nonlinear Optics of Graphene: From Saturable Absorption to High-Harmonics Generation // *Advanced Optical Materials.* 2020. Vol. 8, № 3. P. 1900771.
25. Cherkasova O. et al. Effects of Terahertz Radiation on Living Cells: a Review // *Optics and Spectroscopy.* 2020. Vol. 128. P. 855–866.
26. Стрюков Д.В. и др. Структура, динамика решетки и диэлектрические характеристики в диапазоне 0.1–2.5 ТГц гетероэпитаксиальных пленок ниобата бария-стронция // *Неорганические Материалы.* 2022. Vol. 58, № 1. P. 61–68.
27. Buixaderas E. et al. Infrared and Dielectric Spectroscopy of the Relaxor Ferroelectric Sr_{0.61}Ba_{0.39}Nb₂O₆ // *Journal of Physics: Condensed Matter.* 2005. Vol. 17. P. 653.
28. Pavlenko A.V. et al. Structural Characteristics of Thin Sr_{0.5}Ba_{0.5}Nb₂O₆ Films in the Temperature Range 20–500°C // *Inorg Mater.* 2020. Vol. 56, № 11. P. 1188–1192.
29. Kersten O., Rost A., Schmidt G. Dielectric dispersion of relaxor ferroelectrics (SBN 75 and PLZT 8/65/35) // *physica status solidi (a).* 1983. Vol. 75, № 2. P. 495–500.
30. Suizu K. et al. Extremely frequency-widened terahertz wave generation using Cherenkov-type radiation // *Opt. Express*, OE. Optica Publishing Group, 2009. Vol. 17, № 8. P. 6676–6681.
31. Wang Z., Su F., Hegmann F.A. Ultrafast imaging of terahertz Cherenkov waves and transition-like radiation in LiNbO₃ // *Opt. Express*, OE. Optica Publishing Group, 2015. Vol. 23, № 6. P. 8073–8086.