

Рыбак Алина Анатольевна

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

1.3.6 – «Оптика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата

физико-математических наук

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

Официальные оппоненты: Минин Игорь Владимирович
доктор технических наук, профессор СГУГиТ, член-корреспондент академии Метрологии РФ

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

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

Защита состоится «28» ноября 2023 г. в _____ часов 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 «___» _____ 2023 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 может расширять возможности ИТС. Метаповерхности 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 доступных 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; исследование свойств материалов и разработка устройств в миллиметровом диапазоне (120-350 ГГц), в том числе телекоммуникационных систем нового поколения; водные растворы, в том числе биологические; газовый анализ; исследование узких фононных мод в кристаллических структурах; определение свойств метаповерхностных

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. Такой ФНЧ называется антиалиасным, поскольку он предотвращает смешение информационного 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. Например, 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 методики к исследованию сегнетоэлектрических кристаллов: титанилфосфат калия (KTiOPO_4 , КТП), представляющий собой жесткий сегнетоэлектрик; второй кристалл - ниобат бария-стронция ($\text{Sr}_{0,61}\text{Ba}_{0,39}\text{Nb}_2\text{O}_6$, SBN-61), который обладает размытым фазовым переходом вблизи комнатной температуры, 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 метаматериалов, с целью 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 нибата бария-стронция ($\text{Sr}_{0,61}\text{Ba}_{0,39}\text{Nb}_2\text{O}_6$) 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 $\sim 12\%$. В результате показано уменьшение времени измерения спектрометра до 12 раз при сохранении точности измерений.

Разработан узкополосный квазиоптический фильтр, основанный на эталоне Фабри-Перо, последовательно совмещенный с широкополосным полосовым пропускающим фильтром, подавляющим высшие резонансы эталона. На примере измерения пропускания кремниевой пластины с помощью разработанного фильтра с центральной частотой в окрестности 0,8 ТГц и с полной шириной на полувысоте менее 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 KTiOPO_4 в субтерагерцовой области спектра в диапазоне температур $-192 \div +150$ °С. Изменения трёх главных компонент показателя преломления кристалла описаны универсальными выражениями Земльмейера, зависящими от температуры. Показано, что коэффициенты выражений Земльмейера 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 $\text{Sr}_{0,61}\text{Ba}_{0,39}\text{Nb}_2\text{O}_6$ в субтерагерцовой области спектра при комнатной температуре.

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 KTiOPO_4 позволят учесть влияние температуры в широком диапазоне при разработке нелинейно-оптических генераторов терагерцового излучения на основе данных кристаллов.

Измеренная комплексная диэлектрическая проницаемость монокристалла $\text{Sr}_{0,61}\text{Ba}_{0,39}\text{Nb}_2\text{O}_6$ позволит на его основе разрабатывать оптические и электронные устройства, в которых требуются среды с большими значениями диэлектрической восприимчивости.

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—1 ТГц может быть описана одночленными выражениями Земльмейера 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 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).

Личный вклад автора. Все экспериментальные результаты, изложенные в работе, получены автором лично или при его участии. Автор лично провёл численное моделирование

разрабатываемых узкополосных пропускающих фильтров и экспериментально исследовал их спектральные характеристики. Автор выполнял обработку экспериментальных данных, принимал активное участие в обсуждении полученных результатов и их интерпретации, и также в подготовке научных публикаций.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 25 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 краткое 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 экспериментальной установки – разработанного в ИАиЭ СО РАН ИТС. Так как типичным сигналом спектрометра является однопериодное колебание электромагнитного поля, длительностью ~ 1 пс и несущее спектр частот, перекрывающих декаду [7,8]. 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 учитывать требования теоремы отсчётов (Уиттекера-Котельникова-Шеннона) [9,10], в соответствии с которой происходит выбор временного шага дискретизации, однозначно связанного с 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 сигналов дискретизация сигналов, теорема отсчётов, возникновение алиасинга при недостаточной частоте дискретизации, т.е. искажение восстановленного сигнала, т.к. при этом 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 $f_s/2$. 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 терагерцовой спектроскопии. Субдискретизация происходит, когда частота дискретизации меньше заданного теоремой отсчётов критерия. Это метод, при котором производится выборка сигнала после полосовой фильтрации с частотой дискретизации ниже его частоты Найквиста, но при этом сохраняется возможность восстановления исходного сигнала в выделенной полосе частот [12]. Привидится вывод критерия субдискретизации:

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

где k – порядок субдискретизации, т.е. во сколько раз можно увеличить шаг дискретизации; f_H, f_L – высшая и низшая частоты, присутствующие в спектре полезного сигнала, соответственно.

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

Для исследования используются ФНЧ с частотами среза (ГГц) 248, 503, 1018, 1682 (Рисунок 1), реализованные в виде многослойных плазмонных структур на основе метаповерхностей. ФНЧ разработаны в НГУ совместно с Филиалом ИФП СО РАН «КТИПМ», в котором отработана технология фотолитографии на тонких гибких подложках [13,14]. ФНЧ представляют собой интерференционные структуры, состоящие из 6 слоёв емкостных патчевых метаповерхностей, склеенных вместе через полипропиленовые подложки при помощи технологии горячего прессования. 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 внеполосовое подавление на уровне 40–50 дБ без паразитных пиков пропускания.

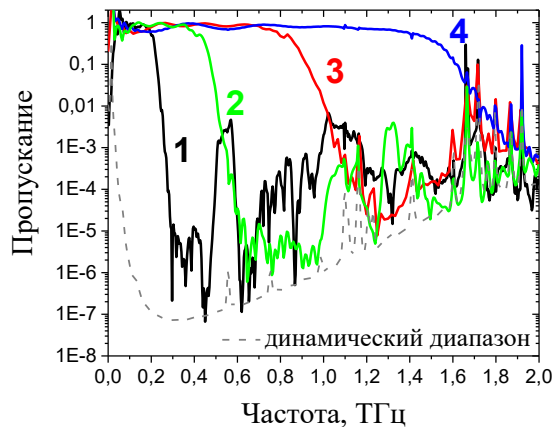


Рисунок 1. Спектры пропускания исследуемых ФНЧ.

Полученные результаты измерений соответствуют ожиданиям. Значения центральной частоты f_{max} , определённые с помощью аппроксимации, с хорошей точностью совпадают (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 сканирования без ФНЧ превышает время с ФНЧ в 2 и более раз.

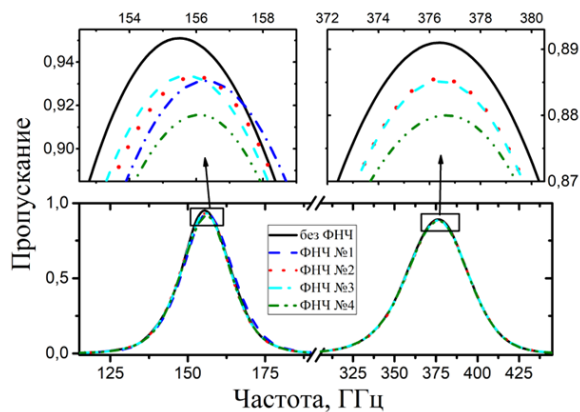


Рисунок 2. Спектры пропускания ППФ 156 (слева) и 376 ГГц (справа). Нижние рисунки – обзорный вид, верхние – максимум пропускания в увеличенном масштабе.

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

В третьей главе описываются моделирование, разработка и исследование характеристик узкополосного квазиоптического фильтра в окрестности частоты 0,8 ТГц ($\lambda = 375$ мкм) на основе эталона Фабри-Перо для реализации метода субдискретизации в ИТС. Данная частота 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 ТГц находится локальное окно прозрачности атмосферы; 3) на частоте 806 ТГц расположена линия поглощения молекулы СО, являющегося эталонным газом для частотной калибровки систем ТГц спектроскопии, что в будущем образом позволит протестировать метод субдискретизации при измерении характеристик узкой линии поглощения; 4) потенциально исследование в окрестности 0,8 ТГц позволит изучить моду, предположительно связанную с нарушением стехиометрии в кристалле КТР [17].

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

Далее, на основе полученных при моделировании данных были изготовлены образцы ФФП с FWHM $\approx 4\%$. В качестве диэлектрического слоя был применен полипропилен толщиной ~ 120 мкм. Поскольку для ТГц структур типичные топологические размеры его микрорисунка лежат в диапазоне 3–300 мкм, для изготовления ФФП использовался метод контактной фотолитографии. FWHM изготовленного ФФП составляет 5,2%, что довольно близко к расчетному. На Рисунок 3 приведено сравнение пропускания изготовленного и модельного ФФП.

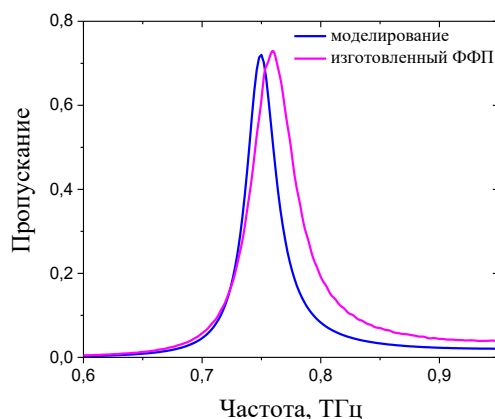


Рисунок 3. Пропускание модельного и изготовленного ФФП.

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.

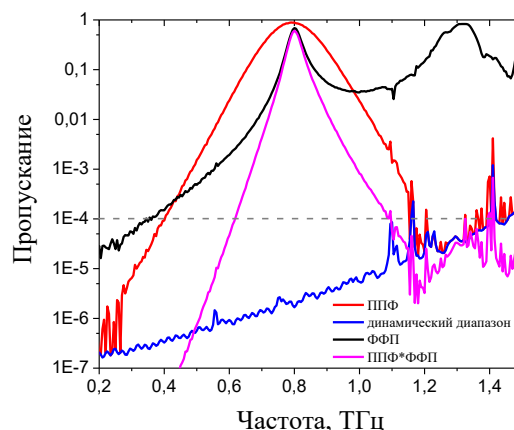


Рисунок 4. Измеренное пропускание результирующего фильтра шириной 4% (розовый), состоящего из полосового фильтра с центральной частотой 800 ГГц и FWHM = 20% (красный) и фильтра Фабри-Перо (чёрный) с FWHM = 5,2%. Синий – граница динамического диапазона ИТС. Серый пунктир – уровень пропускания 10^{-4} .

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

В результате показана возможность разработки узкополосного фильтра с FWHM = 4% с максимум пропускания $\sim 79\%$, позволяющим применить метод субдискретизации в ИТС при увеличении шага выборки в 2 раза.

В параграфе 3.3 на примере измерения кремниевой пластинки с использованием разработанных узкополосных фильтров на основе эталона Фабри-Перо показано, что метод субдискретизации работает в импульсной терагерцовой спектроскопии. Полученные пропускание пластины хорошо согласуется с измерениями без применения метода субдискретизации.

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 (ИК) лазерного излучения в

терагерцовое [17–22]. Это важно для создания малогабаритных терагерцовых (ТГц) источников излучения, перестраиваемых в широком диапазоне частот и обладающих высокой спектральной яркостью. Среди задач, которые можно решать с помощью таких источников, следует отметить газоанализ, в частности, создание терагерцового ЛИДАРа для мониторинга малых газовых компонентов в приземном слое атмосферы на километровых трассах для мониторинга экологической обстановки и климата. [23,24]; продвижение нелинейной оптики в новые спектральные диапазоны [25] и изучение избирательного действия терагерцового излучения на живые организмы [26].

В исследовании кристаллов КТР осуществлено в полосе 0,2–1 ТГц с использованием ФНЧ. Без ФНЧ ТГц-сигналы регистрировались с временным шагом 125 фс в диапазоне 60 пс, что соответствует спектральному разрешению ~ 20 ГГц, при использовании ФНЧ3+ФНЧ4 (исследованные в главе 2) временной шаг составил 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 5). Дисперсия показателей преломления хорошо аппроксимируется в виде уравнений 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.

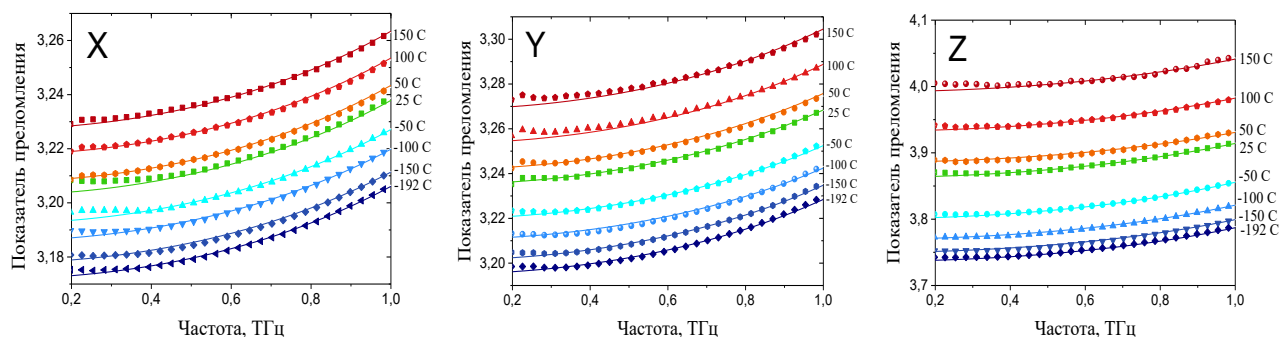


Рисунок 5. Дисперсия показателей преломления осей x, y и z при разных температурах. Символы — измеренные данные; непрерывные линии являются аппроксимацией уравнениями Зельмейера.

Данные Рисунок 6 показывают, что температурные зависимости коэффициентов Зельмейера хорошо аппроксимируются линейными функциями:

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

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

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

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

Таблица. Значения коэффициентов Зельмейера

Ось	A_0	$\delta_A \times 10^{-1}, \text{K}^{-1}$	B_0	$\delta_B \times 10^{-1}, \text{K}^{-1}$	$C_0, \mu\text{m}^2$	$\delta_C, \mu\text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \mu\text{m}$
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

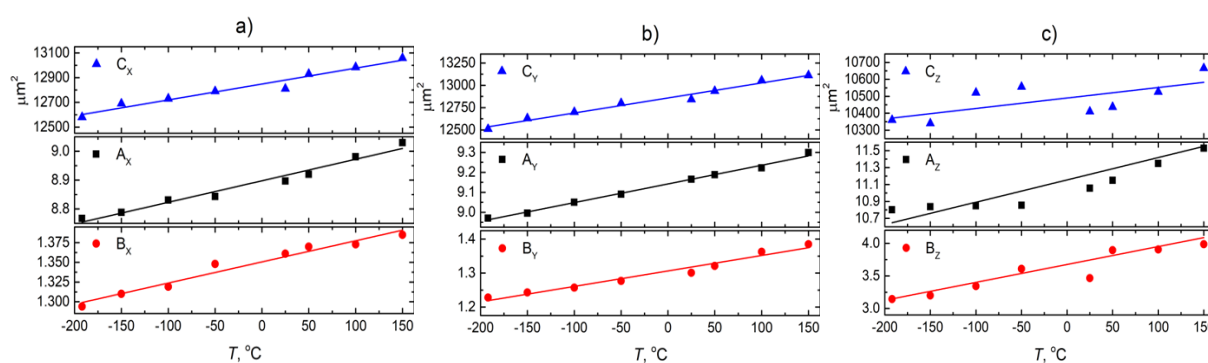


Рисунок 6. Температурная зависимость коэффициентов Зельмейера для осей x , y и z . Символы представляют измеренные значения; сплошные линии — линейные приближения.

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. Поэтому это не должно сказываться на нелинейно-оптических процессах, происходящих в терагерцовом диапазоне или основанных на взаимодействиях с фононами, связанными с колебаниями калиевой подрешетки.

Также было установлено, что температурное изменение угла V_z в субтерагерцовом спектре составляет несколько градусов. Следовательно, для корректного проектирования нелинейных фотонных устройств преобразования терагерцовой частоты необходимо учитывать зависимость оптических свойств кристалла КТР от температуры.

В параграфе 4.2 описывается исследование диэлектрических свойств кристалла SBN-61. SBN имеет высокий электрооптический коэффициент, что означает, что его показатель преломления можно модулировать, применяя электрическое поле. Это свойство позволяет использовать SBN в модуляторах терагерцового диапазона, переключателях и других устройствах, требующих быстрого и эффективного управления терагерцовыми сигналами [27,28].

В данной работе для исследования диэлектрических свойств кристалла SBN-61 использовались последовательно установленные ФНЧ 2 и ФНЧ 3, а также ФНЧ 3 и ФНЧ 4 (Рис. 22, Рис. 23) для повышения внеполосового подавления и невелирования эффекта алиасинга, так как одиночных фильтров оказалось недостаточно. В предыдущем случае измерения эталонных ППФ с пропусканием $>90\%$ (вторая глава), 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-61, обладающего пропусканием менее 10^{-3} (-30 дБ) при толщине 160 мкм, вклад алиасинга с амплитудой -40 дБ может оказаться сопоставим с уровнем полезного сигнала, поэтому потребовалась дополнительная фильтрация. В данном случае применение ФНЧ при измерениях позволило нам сократить время измерения до 10 раз. Этот результат будет весьма актуален при записи температурной зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика в окрестности фазового перехода.

Результаты измерений комплексной диэлектрической проницаемости кристалла SBN-61 методом ИТС при комнатной температуре представлены на Рисунок 7. Измеренные диэлектрические ТГц свойства кристалла по величинам и характеру дисперсии качественно достаточно хорошо согласуются с данным других групп для монокристаллов SBN-35 [29] и SBN-61 [28].

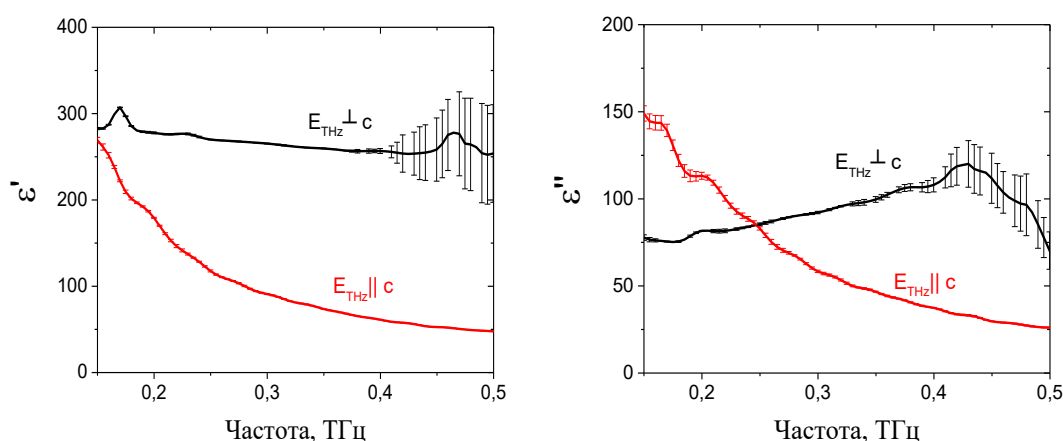


Рисунок 7. Реальная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости кристалла SBN-61.

Диэлектрическая проницаемость ортогональной оси ($E_{\perp c}$) выше чем у полярной ($E_{\parallel c}$), что может быть объяснено влиянием сильных фононных пиков лежащих за пределами наших измерений на частотах в окрестности 1,5, 2,4 и 3 ТГц [28].

Возрастание как реальной, так и мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости полярной оси в низкочастотном диапазоне относят к центральному пику в работе [28]. Однако, судя по температурному поведению, представленному в этой же статье, это

вероятнее всего мягкая мода. Уточнение этих данных требует проведение дополнительных температурных исследований, возможно на более тонких образцах материала, в чем могут помочь разработанные в данной диссертации методы.

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 с центральными частотами 156 ГГц и 376 ГГц и полосой пропускания ~12%. 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 $+150$ °C. Изменение трёх главных компонент показателя преломления кристалла описывается универсальным уравнением Зельмейера, которое зависит от температуры. Полученные результаты показывают, что коэффициенты уравнения Зельмейера имеют температурную зависимость, близкую к линейной, что свидетельствует о незначительном влиянии ионного механизма проводимости кристалла в терагерцовой области спектра на оптические свойства.

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

Список работ, опубликованных по теме диссертации

- [A1] **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.
- [A2] **Rybak A.**, Antsygin V., Mamrashev A., Nikolaev N. Terahertz optical properties of KTiOPO₄ crystal in the temperature range of (−192)–150°C // Crystals. 2021. Т. 11. № 2.
- [A3] **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.
- [A4] **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.
- [A5] Николаев Н.А., **Рыбак А.А.**, Мамрашев А.А., Анцыгин В.Д. Терагерцовые свойства сегнетоэлектриков KTiOPO₄, KTiOAsO₄ и KNbO₃ // ФОТОНИКА 2021. СО РАН, ИФП СО РАН при содействии Министерства науки и высшего образования РФ. 2021. С. 117.
- [A6] **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.
- [A7] Рыбак А.А. Терагерцовые свойства нелинейных кристаллов KTiOPO₄ в диапазоне температур -192 ÷ +150 °С // МНСК-2021. Материалы 59-й Международной научной студенческой конференции. Новосибирск, 2021. С. 40.
- [A8] 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. СО РАН, ИФП СО РАН при содействии Министерства науки и высшего образования РФ. 2021. С. 48.
- [A9] 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.

- [A10] **Rybak A.A.**, Antsygin V.D., Nikolaev N.A. Terahertz properties of potassium titanil phosphate in a wide temperature range // Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications—TERA 2020. The 4-th International Conference. 2020. P. 16.
- [A11] 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.
- [A12] 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.
- [A13] **Rybak A.A.**, Antsygin V.D., Nikolaev N.A. Thermo-optical properties of potassium titanil phosphate in terahertz radiation // International Conference on Laser Optics. 2020. P. 32.
- [A14] 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.
- [A15] **Рыбак А.А.**, Николаев Н.А., Кузнецов С.А. Повышение технических характеристик импульсных терагерцовых спектрометров с помощью микроструктурных квазиоптических фильтров нижних частот // ФОТОНИКА 2019. СО РАН, ИФП СО РАН при содействии Министерства науки и высшего образования РФ. 2019. С. 153.
- [A16] 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.
- [A17] 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.
- [A18] 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.

- [A19] **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.
- [A20] **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.
- [A21] 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.
- [A22] **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.
- [A23] 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.
- [A24] 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.
- [A25] 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 цитируемых работ

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. 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.
15. Wu Q., Zhang X.-C. Free-space electro-optics sampling of mid-infrared pulses // *Applied Physics Letters*. 1997. Vol. 71, № 10. P. 1285–1286.

16. Gordon I.E. et al. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2022. Vol. 277. P. 107949.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. Hsieh Y.-D. et al. Dynamic terahertz spectroscopy of gas molecules mixed with unwanted aerosol under atmospheric pressure using fibre-based asynchronous-optical-sampling terahertz time-domain spectroscopy // *Sci Rep*. 2016. Vol. 6. P. 28114.
25. 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.
26. Cherkasova O. et al. Effects of Terahertz Radiation on Living Cells: a Review // *Optics and Spectroscopy*. 2020. Vol. 128. P. 855–866.
27. 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.
28. Buixaderas E. et al. Infrared and Dielectric Spectroscopy of the Relaxor Ferroelectric $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6$ // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2005. Vol. 17. P. 653.
29. Pavlenko A.V. et al. Structural Characteristics of Thin $\text{Sr}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{Nb}_2\text{O}_6$ Films in the Temperature Range 20–500°C // *Inorg Mater*. 2020. Vol. 56, № 11. P. 1188–1192.