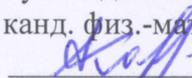


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)
Радиофизический факультет
Кафедра радиоэлектроники

ДОПУСТИТЬ К ПРЕДСТАВЛЕНИЮ ГЭК
Руководитель ООП
канд. физ.-мат. наук, доцент
 А.Г. Коротаев
« 18 » 06 2022 г.

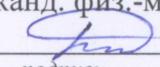
НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

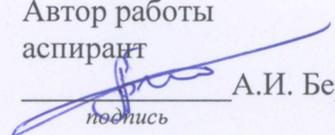
об основных результатах подготовленной научно – квалификационной работы
(диссертации)

ТЕРАГЕРЦОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ НЕОДНОРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ РЕГИСТРАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ОТКЛИКА

по основной образовательной программе подготовки научно-педагогических кадров в
аспирантуре
направление подготовки 03.06.01 – Физика и астрономия

Бердюгин Александр Игоревич

Научный руководитель
канд. физ.-мат. наук, доцент
 А.В. Бадьин
подпись
« 18 » 06 2022 г.

Автор работы
аспирант
 А.И. Бердюгин
подпись

Введение

Исследование электрофизических свойств материалов является фундаментальной научной задачей. Область применения таких знаний крайне обширна. Она затрагивает многие стороны научного прогресса, начиная от создания всевозможных радиопоглощающих материалов, позволяющих снизить отрицательное влияние электромагнитного излучения на биологические объекты, заканчивая изучением свойств нелинейных кристаллов, предназначенных для создания излучения большой мощности. Одним из важнейших параметров материала является его диэлектрическая проницаемость. Знание этой величины позволяет судить об изменении электрофизических свойств материала под воздействием электромагнитного излучения. Создание устройства, способного быстро и с высокой точностью определять диэлектрическую проницаемость исследуемого вещества, является перспективной задачей науки и техники.

Одним из перспективных направлений исследований электрофизических свойств материалов является диагностика неоднородных сред. Современные широко применяемые методы диагностики используют технику, работающую в инфракрасном, ультрафиолетовом, а также рентгеновском диапазонах частот. Однако, перечисленные выше методы имеют существенный недостаток - отрицательное влияние на биологические объекты. В качестве альтернативы применяемым методам рационально использовать терагерцовое излучение. Среди основных достоинств терагерцовой диагностики важно отметить то, что большинство характерных спектральных особенностей различных сред, а также спектры инородных включений попадают именно в терагерцовый диапазон длин волн.

Актуальность темы исследования

Терагерцовый диапазон радиоволн пока еще слабо освоен технически, элементная база этого диапазона (генераторы, детекторы, линии передачи, антенны и преобразователи) большей частью находятся в разработке. Создание элементов терагерцовой техники требует разработки новых функциональных композиционных материалов на основе нанокристаллических магнитных материалов и углеродных наноструктур, таких, как углеродные нанотрубки, графен, ферриты, углерод луковичной структуры, нановолокна, сегнетоэлектрики. Активно развивающиеся сегодня аддитивные технологии позволили создавать трехмерные конструкции, эффективно взаимодействующие с терагерцовым излучением. Важным свойством при этом является высокая технологичность, однако разработка более высокочастотных элементов требует от аддитивной технологии повышения пространственного разрешения. Одним из подходов в решении данных задач является экспериментальная проверка с использованием терагерцовых систем визуализации. Малые длины волн субмиллиметрового диапазона позволяют определять неоднородности контролируемых объектов с высокой точностью и локально различать их химический состав путем определения спектра диэлектрической проницаемости. На сегодняшний день актуальной задачей является исследование диэлектрических композиционных структур. Диссертационная работа посвящена разработке метода терагерцовой дефектоскопии неоднородностей композиционных материалов на основе принципа регистрации распределения электромагнитного отклика.

Степень разработанности темы исследования

Российский рынок испытывает дефицит производителей систем терагерцового контроля. Изучением материалов, связанным с их диагностикой, преимущественно занимаются научно-исследовательские центры. Однако, для обеспечения данных исследований чаще всего используется дорогостоящее оборудование зарубежного производства. Для задач неразрушающего контроля материалов используется оборудование, основанное на матричном приемнике терагерцового излучения. Данная методика, не смотря на свою способность в короткие сроки провести сканирование, обладает существенными недостатками: низкой разрешающей способностью, ограниченной матричной областью сканирования. Увеличение разрешающей способности осуществимо за счёт применения малой диэлектрической частицы, формирующей фотонную струю. Кроме этого, существующие системы визуализации имеют существенное ограничение на получение пространственного распределения только одной величины (коэффициент прохождения или отражения). На сегодняшний день полного аналога системы, позволяющей получать пространственные распределения эффективной диэлектрической проницаемости исследуемых объектов в мире не представлено.

Цели и задачи, объект и предмет исследования

Цель диссертационного исследования заключается в разработке метода визуализации распределения электромагнитного отклика неоднородных композиционных диэлектриков в терагерцовом диапазоне частот.

Задачи, которые необходимо решить для достижения цели:

1. Анализ литературных источников для выработки методов достижения поставленной цели.
2. Численное моделирование распределения электромагнитного отклика плоской электромагнитной волны от набора тестовых композитов с различными величинами диэлектрической проницаемости.
3. Разработка математической модели расчета матрицы двумерного распределения электромагнитного отклика от образца материала на основании соотношений Френеля для свободного пространства.
4. Разработка трехмерной геометрической модели фокусирующего элемента с использованием эффекта формирования фотонной струи для повышения разрешающей способности системы дефектоскопии.
5. Разработка макетного образца системы терагерцовой дефектоскопии неоднородностей композиционных материалов, основанной на принципе регистрации электромагнитного отклика.
6. Разработка алгоритма программного обеспечения для управления системой терагерцовой дефектоскопии.
7. Разработка алгоритма программного обеспечения для расчета распределения эффективной диэлектрической проницаемости на основании результатов системы терагерцовой дефектоскопии.
8. Апробация системы терагерцовой дефектоскопии и оценка влияния неоднородностей на электромагнитный отклик от исследуемых тестовых объектов.
9. Подготовка статей к печати в рецензируемых журналах.

10. Подготовка докладов и выступление на конференциях по тематике проводимого диссертационного исследования.

Объект исследования:

Процесс взаимодействия электромагнитного излучения с неоднородными композиционными конструкциями из диэлектрических материалов в терагерцовом диапазоне частот.

Предмет исследования:

Величины электромагнитных характеристик неоднородных композиционных конструкций из диэлектрических материалов в зависимости от концентрации и локализации включений.

Научная новизна заключается в том, что:

- метод визуализации распределения эффективной диэлектрической проницаемости исследуемых объектов на основе принципа регистрации электромагнитного отклика в терагерцовом диапазоне частот реализован впервые;
- метод визуализации распределения эффективной диэлектрической проницаемости впервые адаптирован для задач терагерцовой дефектоскопии неоднородных композиционных конструкций на основе диэлектрических материалов;
- показаны функциональные связи однородности пространственного распределения электромагнитных характеристик при исследовании объектов в терагерцовом диапазоне частот от концентрации, локализации и способа приготовления композита.

В результате выполненного исследования получены новые технические решения, авторство на которые защищено двумя свидетельствами на программу для ЭВМ.

Теоретическая и практическая значимость работы

На основе измеренных распределений электромагнитных характеристик получены новые знания о локализации неоднородностей композиционных материалов, которые можно использовать для совершенствования технического процесса изготовления данных материалов. Так же теоретической ценностью обладает рассчитанная численная модель повышения разрешающей способности систем терагерцовой визуализации с применением малой диэлектрической частицы, формирующей фотонную струю.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанная система терагерцовой дефектоскопии может применяться для неразрушающего контроля композиционных материалов и структур на их основе. Система позволяет оценить такие параметры тестовых объектов как: однородность поверхности и внутренней структуры, геометрические параметры объектов и их включений. Наконец, разработанный метод может быть использован для задач дефектоскопии нелинейных кристаллов $ZnGeP_2$, микроэлектронных чипов, а также структур, создаваемых при помощи 3D-печати.

Методология и методы исследования

Система терагерцовой дефектоскопии была построена на базе интерферометра Маха-Цендера, в качестве источника непрерывного излучения использовалась лампа обратной волны, а в качестве детектора терагерцового излучения выступил оптоакустический детектор (ячейка Голея). Для оценки достоверности получаемых результатов производились сравнительные экспериментальные исследования электромагнитного отклика на спектрометре терагерцового диапазона СТД-21 методом свободного пространства, а также с использованием импульсно-временного спектрометра T-Spec 1000 в частотном диапазоне 0,1-3,5 ТГц. Значения комплектной диэлектрической проницаемости рассчитывались с использованием плосковолнового приближения при нормальном падении излучения на образец. Моделирование электромагнитного отклика осуществлялось в среде CST Studio Suite.

Степень достоверности и апробация результатов

В пользу достоверности получаемых результатов свидетельствует факт совпадения рассчитанных величин комплексной диэлектрической проницаемости исследуемых образцов экспериментальном с результатами полученных двумя другими независимыми методиками на оборудовании (спектрометр терагерцового диапазона СТД-21 и импульсный спектрометр T-Spec 1000) центра коллективного пользования, аккредитованного на техническую компетентность, а также при сравнении результатов с паспортными характеристиками образцов, аттестованных в Сибирском научно-исследовательском институте метрологии в качестве стандартных образцов предприятия.

Результаты работы апробированы на 15 Международных и Всероссийских научных конференциях.

Основные результаты исследования

- Макетный образец системы терагерцовой дефектоскопии неоднородностей композиционных материалов, основанный на принципе регистрации электромагнитного отклика.
- Программное обеспечение для управления системой терагерцовой дефектоскопии.
- Программное обеспечение для расчета распределения эффективной диэлектрической проницаемости на основании результатов измерения электромагнитного отклика системой терагерцовой дефектоскопии.
- Трехмерная геометрическая модель повышения разрешающей способности систем терагерцовой визуализации с применением малой диэлектрической частицы, формирующей фотонную струю.
- Изображения распределения интенсивности прошедшего электромагнитного излучения терагерцового диапазона через образцы скрытых объектов за оптически непрозрачными препятствиями.
- Изображения распределения интенсивности прошедшего электромагнитного излучения терагерцового диапазона через образцы микронных чипов.
- Изображения распределения интенсивности прошедшего электромагнитного излучения терагерцового диапазона через образцы нелинейного кристалла ZnGeP₂.

- Изображения распределения интенсивности прошедшего и отраженного электромагнитного излучения терагерцового диапазона от образцов композитов на основе МУНТ.
- Изображения распределения интенсивности отраженного электромагнитного излучения терагерцового диапазона от образцов композитов на основе ВаTiO₃.
- Изображения распределения интенсивности отраженного электромагнитного излучения терагерцового диапазона через образцы композитов на основе акрилонитрил бутадиен стирола, модифицированного нановолкнами.
- Изображения распределения интенсивности отраженного электромагнитного излучения терагерцового диапазона через образцы композитов на основе акрилонитрил бутадиен стирола с массивом сферических полостей, заполненных воздухом.
- Распределение эффективной диэлектрической проницаемости терагерцового излучения прошедшего через образец композита, на основе проводящего акрилонитрил бутадиен стирола и полиэтилентерефталат гликоля.

Список работ, опубликованных автором диссертации

По теме диссертации автором было опубликовано 27 научных трудов, 2 из которых вышли в рецензируемых периодических журналах из списка ВАК (Известия вузов. Физика; Ural Radio Engineering Journal), 8 из списка Scopus, 5 из списка Web of Science, 16 из перечня РИНЦ.

Всего автором опубликовано 38 публикации, 2 из которых вышли в рецензируемых периодических журналах из списка ВАК, 9 в материалах конференций, индексируемых Web of Science или Scopus и 27 в других научных изданиях. По результатам работы получены 2 свидетельства на программу для ЭВМ.

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Бадьин А.В. Исследование температурных зависимостей электромагнитных характеристик материалов в терагерцовом диапазоне частот / А.В. Бадьин, В.Ю. Выговский, **А.И. Бердюгин**, К.В. Дорожкин // Известия вузов. Физика. – 2017. – Т. 60, № 12/2. – С. 62–64.

2. **Бердюгин А.И.** Терагерцовый сканирующий рефлектометр для визуализации строения полимерных конструкций в аддитивном производстве / А.И. Бердюгин, А.В. Бадьин, Р.П. Гурский, Е.А. Трофимов, Г.Е. Кулешов // Ural Radio Engineering Journal. – 2021. – Т. 5. – № 3. – С. 207–224.

Публикации в сборниках материалов конференций, индексируемы Web of Science или Scopus:

1. **Berdugin A.I.** Anisotropic Materials Based on Magnetic Microwires in EHF Range / A.I. Berdugin, V.U. Vigovskiy, A.V. Badin, G.E. Kuleshov // Key Engineering Materials. – 2017. – vol. 743. – pp. 81-85.

2. Badin A.V. System of automated measurement of electromagnetic response of anisotropic materials in quasi-optical beams / A.V. Badin, **A.I. Berdyugin**, V.Y. Vigovskii, G.E. Duaevskii // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – IEEE, 2017. – pp. 301-304.

3. Badin A.V. Quasi-optical 2D system for non-contact non-destructive testing of defects in natural and artificial crystals / A.V. Badin, K.V. Dorozhkin, V.I. Suslyaev, **A.I. Berdyugin**, V.Y. Vigovskiy // 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – International Society for Optics and Photonics, 2017. – Vol. 10466. – P. 1046625.
4. Zhakupov S.N. Automated Quasioptical System for EHF Imaging of Heterogeneous Materials with Subwavelength Resolution / S.N. Zhakupov, A.V. Badin, **A.I. Berdyugin** // 2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – IEEE, 2019. – pp.1-4.
5. Zhakupov S., The practical application of subwavelength focusing elements in the EHF imaging system / S. Zhakupov, A. Badin, **A. Berdyugin** // ITM Web of Conferences. – EDP Sciences, 2019. – vol. 30. – P. 12008.
6. **Berdyugin A.I.** Continuous terahertz wave imaging of microelectronics objects / A.V. Badin, A.I. Berdyugin // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 1862. – No. 1. – P. 012030.
7. Badin A.V. BWO based imaging for control of MWCNTs polymer composites homogeneity / A.V. Badin, G.E. Kuleshov, **A.I. Berdyugin**, E.A. Trofimov, P.P. Smygalina, R.P. Gurskii, K.V. Dorozhkin, G.E. Dunaevskii // 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz) – IEEE, 2021 – pp. 1-2.
8. Badin A.V. Two-dimensional THz reflectometry of a periodic structure obtained by additive technology / A.V. Badin, **A.I. Berdyugin**, V.D. Moskalenko, K.V. Simonova, R.P. Gursky // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 2140. – No. 1. – P. 012015.
9. Bilinskiy K.V. Broadband selection of EHF radiation of metamaterial surface obtained by photolithography / K.V. Bilinskiy, K.V. Dorozhkin, V.D. Moskalenko, G.E. Kuleshov, A.V. Badin, E.A. Trofimov, **A.I. Berdyugin** // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 2140. – No. 1. – P. 012012.

Публикации в других научных изданиях:

1. Выговский В.Ю. Автоматизация процесса исследования электрофизических свойств анизотропных материалов в квазиоптических пучках / В.Ю. Выговский, **А.И. Бердюгин** // Труды Международной молодежной научной школы "Актуальные проблемы радиофизики". АПР-2015» –Томск: Изд-во НТЛ. – 2015-96 с.
2. Бадьин А.В. Механизм углового позиционирования исследуемых образцов материалов для квазиоптических спектрометров / А.В. Бадьин, В.Ю. Выговский, **А.И. Бердюгин** // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2015. – Т. 15. – №. 1. – С. 130-132.
3. Выговский В.Ю. Разработка температурного модуля квазиоптического спектрометра для исследования электрофизических свойств материалов / В.Ю. Выговский, **А.И. Бердюгин**, А.В. Бадьин // Материалы 54-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2016. – 2016. – С. 14-14.
4. Выговский В.Ю. Применение микроконтроллеров для термостабилизации образцов при исследовании электрофизических свойств материалов в терагерцовом спектрометре / В.Ю. Выговский, **А.И. Бердюгин** // Перспективы развития фундаментальных наук. – 2016. – С. 27-29.
5. Выговский В.Ю. Температурный модуль терагерцового спектрометра для исследования электрофизических свойств материалов / В.Ю. Выговский, **А.И. Бердюгин** // Труды XIII Всероссийской конференции студенческих научно-исследовательских инкубаторов. Томск, 17–18 мая 2016 г. – Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2016. – С. 63-66.
6. **Бердюгин А.И.** Интеллектуальная система термостабилизации образцов материалов в квазиоптических трактах / А.И. Бердюгин, А.В. Бадьин, В.Ю. Выговский // Материалы

Международной научно-технической конференции "INTERMATIC-2016" – М.: Галлея-Принт, 2016. – Часть 4. – С. 234 – 236.

7. **Бердюгин А.И.** Анизотропные материалы на основе магнитных микропроводов в области крайне высоких частот / А.И. Бердюгин, В.Ю. Выговский, А.В. Бадьин // *Материалы V Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов*, г. Томск, 5–7 декабря 2016 г.: сборник трудов. – Томск: STT, 2016. – с. 46 – 47.

8. **Бердюгин А.И.** Модуль для автоматической угловой ориентации исследуемых материалов в квазиоптическом тракте / А.И. Бердюгин, В.Ю. Выговский // *Материалы 55-й МНСК-2017: Инструментальные методы и техника экспериментальной физики*. – Новосибир. гос. ун-т. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2017. – с. 25.

9. **Бердюгин А.И.** Система автоматической двумерной регистрации электрофизических свойств материалов / А.И. Бердюгин, В.Ю. Выговский // *Материалы 55-й МНСК-2017: Инструментальные методы и техника экспериментальной физики*. – Новосибир. гос. ун-т. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2017. – с. 26.

10. **Бердюгин А.И.** Автоматизированная система двумерной диагностики неоднородностей материалов в квазиоптических пучках / А.И. Бердюгин, В.Ю. Выговский, Р.А. Кремзер // *Материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 55-летию ТУСУРа*, Томск, 10–12 мая 2017 г.: в 8 частях. – Томск: В-Спектр, 2017 – Ч. 1. – 298 с.

11. **Бердюгин А.И.** Система терагерцового видения / А.И. Бердюгин, В.Ю. Выговский // *Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ-2017)*. – 2017. – С. 151-157.

12. Бадьин А.В. Терагерцовая система двумерной диагностики неоднородностей материалов / А.В. Бадьин, **А.И. Бердюгин**, В.Ю. Выговский // *Сб. трудов конференции NI Academic Days*. – 2017. – С. 214-217.

13. Жакупов С.Н., Бердюгин А.И., Бадьин А.В. Использование трехмерной геометрической фигуры для субволновой фокусировки терагерцового излучения в ближней зоне / С.Н. Жакупов, **А.И. Бердюгин**, А.В. Бадьин // *Программно-техническое обеспечение автоматизированных систем*. – 2018. – С. 45-48.

14. Badin A.V. THz visualization of inhomogeneities in composites based on carbon nanotubes / A.V. Badin, K.V. Dorozhkin, S.I. Moseenkov, V.L. Kuznetsov, V.I. Suslyayev, **A.I. Berdygin**, G.V. Golubtsov // *Proceedings III International Workshop on Electromagnetic Properties of Novel Materials*. – NRNU MEPhI, 2018, P. 101.

15. **Бердюгин А.И.** Терагерцовый имиджинг микроэлектронных устройств / А.И. Бердюгин, С.Н. Жакупов // *Труды семнадцатой Всероссийской конференции студенческих научно-исследовательских инкубаторов*: г. Томск, 11–15 мая 2020 г. Под редакцией В.В. Дёмина. – STT Publishing. – С. 33.

16. Жакупов С.Н. Практическое применение субволновых фокусирующих элементов в системе КВЧ имиджинга / С.Н. Жакупов, К.В. Дорожкин, А.В. Бадьин, **А.И. Бердюгин** // *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии*. – 2020. – № 1-1. – С. 426-427.

17. **Бердюгин А.И.** Неразрушающий терагерцовый имиджинг объектов микроэлектроники / А.И. Бердюгин, А.В. Бадьин, С.Н. Жакупов // *Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции*. – 2020. – № 1-1. – С. 162-164.

18. Гурский Р.П. Применение терагерцового излучения для визуализации однородности композиционных материалов / Р.П. Гурский, **А.И. Бердюгин** // *Восемнадцатая Всероссийская конференция студенческих научно-исследовательских инкубаторов*, Томск, 05–07 мая 2021 года. – Томск: Общество с ограниченной ответственностью "СТТ", 2021. – С. 15-19.

19. **Бердюгин А.И.** Применение субмиллиметрового имиджинга для анализа однородности композиционных материалов / А.И. Бердюгин, А.В. Бадьин, Р.П. Гурский, Т.Н. Шематило // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2021. – № 3. – С. 207-208.
20. Бадьин А.В. Двумерная ТГц рефлектометрия периодической структуры, полученной аддитивной технологией / А.В. Бадьин, **А.И. Бердюгин**, В.Д. Москаленко, К.В. Симонова, Р.П. Гурский // Актуальные проблемы радиофизики АПР-2021 : Сборник трудов IX Международной научно-практической конференции, Томск, 20–22 октября 2021 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2021. – С. 121-123.
21. **Бердюгин А.И.** Терагерцовая рефлектометрия для задач дефектоскопии углеродосодержащих материалов, создаваемых методом 3D-печати / А.И. Бердюгин, А.В. Бадьин, Р.П. Гурский // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XVII Международной научно-практической конференции (17–19 ноября 2021 г.): в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2021. – с. 125 - 127.

Введите текст:

...или загрузите файл:

Файл не выбран...

[Выбрать файл...](#)

Укажите год публикации:

Выберите коллекции

Все

Рефераты

Авторефераты

Иностранные конференции

PubMed

Википедия

Российские конференции

Иностранные журналы

Российские журналы

Энциклопедии

Англоязычная википедия

[Анализировать](#)

[Проверить по расширенному списку коллекций системы Руконтекст \(http://text.rucont.ru/like\)](http://text.rucont.ru/like)

Обработан файл:

01. НД Бердюгин А.И..docx.

Год публикации: 2022.

Оценка оригинальности документа - 100.0%

Процент условно корректных заимствований - 0.0%

Процент некорректных заимствований - 0.0%

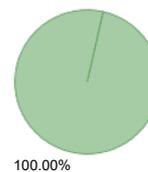
Время выполнения: 9 с.

Заимствования отсутствуют

[Значимые оригинальные фрагменты](#)

[Библиографические ссылки](#)

[Искать в Интернете](#)



100.00%

[Дополнительно](#)