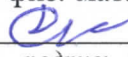


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)
Радиофизический факультет
Кафедра радиоэлектроники

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК

Руководитель ООП

д-р физ.-мат. наук

 Д.Я. Суханов
подпись

« 22 » июня 2023 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ В
ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ**

по направлению подготовки 03.04.03 Радиофизика
направленность (профиль) «Радиофизика, электроника и информационные системы»

Пидотова Диана Андреевна

Руководители ВКР

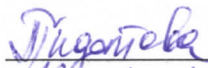
Канд. физ.-мат. наук, доцент

 А.В. Бадьин

« 12 » июня 2023 г.

Автор работы

студент группы № 072172

 Д.А. Пидотова
« 22 » июня 2023 г.

Томск – 2023

РЕШЕНИЕ

об объеме представления текста дипломной работы, содержащей закрытую
информацию

На заседании кафедры радиоэлектроники РФФ рассмотрена дипломная работа студента 072172 гр. Пидотовой Дианы Андреевны «Электрофизические свойства композиционных эластомеров в терагерцовом диапазоне частот».

Из дипломной работы «Электрофизические свойства композиционных эластомеров в терагерцовом диапазоне частот» изъяты главы 2 и 3, т.к. содержащиеся в них материалы еще не представлены в открытых источниках.

Руководитель ООП
доктор физ.-мат. наук,
профессор каф. радиофизики



Д.Я. Суханов

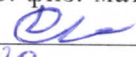
«22» июня 2023 г.

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

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель ООП

д-р. физ.-мат. наук

 Д.Я. Суханов
«29» 09 2021 г.

ЗАДАНИЕ

по выполнению выпускной квалификационной работы магистра обучающемуся

Пидотовой Диане Андреевне

(Ф.И.О. обучающегося)

по направлению подготовки 03.04.03 Радиофизика, направленность (профиль) «Радиофизика, электроника и информационные системы».

1 Тема выпускной квалификационной работы

Электрофизические свойства композиционных эластомеров в терагерцовом диапазоне частот

2 Срок сдачи обучающимся выполненной выпускной квалификационной работы:

а) на кафедре –

19.06.23

б) в ГЭК –

23.06.23

3 Исходные данные к работе:

Объект исследования – процесс взаимодействия электромагнитных волн ТГц диапазона с композиционными эластомерами на основе термопластичных полимеров.

Предмет исследования – величины электромагнитного отклика и электрофизических характеристик композиционных эластомеров в терагерцовом диапазоне

Цель исследования – исследование электрофизических свойств композиционных эластомеров в терагерцовом диапазоне частот для применения в аддитивных технологиях

Задачи:

- проведение обзора литературных источников по тематике исследования
- выбор термопластичных полимеров для матрицы и виды функциональных наполнителей
- освоение методики изготовления композиционных эластомеров
- изготовление нити композиционных эластомеров для применения в 3D принтере и печать экспериментальных образцов
- изготовление аддитивной технологией гибкого многослойного поляризатора
- расчёт электромагнитного отклика от плоского слоя функционального эластомера
- измерение электромагнитного отклика образцов функциональных эластомеров и гибкого поляризатора
- обобщение результатов НИР. Составление и редактирование текста диссертации.

Методы исследования

Измерения спектральных характеристик осуществляется методами частотной и временной спектроскопии.

Организация или отрасль, по тематике которой выполняется работа

Национальный исследовательский Томский государственный университет.

4. Краткое содержание работы

В некоторых технологических решениях в радиоэлектронной технике необходимы материалы, позволяющие изменять свою геометрию без разрушения и потерь электрофизических свойств. Для упрощения создания готовых конструкций сложных форм используется метод 3D печати послойным наплавлением. Для развития этого метода необходимо создание нитей из материалов, позволяющих изменять электрофизические свойства изготавливаемых объектов. Данная работа направлена на исследование электрофизических свойств композиционных эластомеров с различным содержанием графита, технического углерода и гексагонального феррита $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ в терагерцовом диапазоне частот.

Руководитель выпускной квалификационной работы

Доцент кафедры РЭ НИ ТГУ

(должность, место работы)



(подпись)

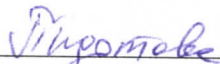
/ А. В. Бадьин

(И.О. Фамилия)

Задание принял к исполнению

студент группы 072172

(должность, место работы)



(подпись)

/ Д. А. Пидотова

(И.О. Фамилия)

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В магистерской диссертации применяются следующие обозначения и сокращения:

КВЧ – крайневыхочастотный

ТГц – терагерцовый

ЭМИ – электромагнитное излучение

TPU – термопластичный полиуретан

TPE – термопластичный эластомер «TPE flex» компании «REC»

АННОТАЦИЯ

Магистерская диссертация содержит 73 страницы, 3 главы, 57 рисунок, 7 таблиц, 29 формул, 70 источников.

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, 3D ПЕЧАТЬ, ГЕКСАГОНАЛЬНЫЙ ФЕРРИТ, ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ, МАГНИТНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ, ТГц

Объектом исследования является процесс распространения электромагнитных волн ТГц диапазона в функциональных эластомерах на основе термопластичных полимеров.

Цель работы – исследование электрофизических свойств композиционных эластомеров в терагерцовом диапазоне частот для применения в аддитивных технологиях.

В результате работы:

- а) Проведен обзор литературных источников по тематике исследования.
- б) Выбран термопластичный полимер для матрицы и виды функциональных наполнителей.
- в) Освоена методика изготовления материалов.
- г) Изготовлены нити функциональных эластомеров для применения в 3D принтере и напечатаны экспериментальные образцы.
- д) Изготовлен аддитивной технологией гибкий многослойный поляризатор.
- е) Рассчитан электромагнитный отклик от плоского слоя функционального эластомера.
- ж) Измерен электромагнитный отклик образцов функциональных эластомеров и гибкого поляризатора.
- д) Проведен анализ полученных результатов, сделаны выводы по применению исследуемых материалов.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 Литературный обзор.....	9
1.1 Композиционные материалы и включения.....	9
1.2 Взаимодействие ТГц волны с материалом	11
1.3 Терагерцовая спектроскопия в испытании эластомеров на производстве	17
1.4 Терагерцовая спектроскопия полимеров во временной области	21
2 Экспериментальное исследование	27
2.1 Спектрометр с разрешением по времени T-Spec 1000	27
2.2 Спектрометр непрерывного действия СТД-21	30
2.3 Материалы и методы получения образцов	32
2.3.1 Материалы и метод получения образцов композитных эластомеров на основе полиэтиленовой матрицы.....	32
2.3.2 Материалы и метод получения образцов композитных эластомеров на основе матрицы из TPU/TPE	33
3 Электрофизические свойства композиционных эластомеров	41
3.1 Результаты измерений материалов на основе полиэтиленовой матрицы	41
3.2 Результаты измерений материалов на основе матрицы TPE и TPU	49
3.3 Результаты измерений структуры из материала на основе полиэтиленовой матрицы и TPU	62
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	65
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	67

ВВЕДЕНИЕ

Полимерные материалы, такие как пластмассы, эластомеры и органические полимеры имеют большое значение в радиоэлектронной промышленности из-за их преимуществ в сравнении с другими материалами, таких как малый вес, возможность массового производства и относительно низкая стоимость. В частности, полимерные композиционные материалы привлекают внимание из-за их дополнительных функциональных возможностей, а именно сравнительно высокой электропроводности, долговечности и т.д., которые являются результатом включения определенных добавок в исходное связующие вещество. Фактически, полимерные композиты, состоящие из эластомеров и различных добавок, представляют собой один из наиболее широко используемых и вызывающих интерес для изучения видов полимерных материалов в современном научном сообществе.

Эластомеры представляют собой класс полимеров, которые могут изменять свои геометрические параметры до 800 % и выдерживать высокие нагрузки без разрушения [1]. В настоящее время эластомеры перспективно использовать в аддитивных технологиях, позволяющих производить материалы любых форм и размеров без отходов, взамен традиционных методов. Такие материалы, как акрилонитрилбутадиенстирол, акрилонитрилстиролакрилат, полимолочная кислота и др., обладают низкой механической гибкостью, поэтому возникает интерес к созданию более эластичных прочных материалов [2].

Эластомеры находят широкое применение в практически любой сфере деятельности человека: водо- и нефте- набухающих эластомеров для пакерного оборудования [3], для изготовления судовых виброизоляторов [4], пневматических шин, резиновых технических изделий [5], асбестово-резиновых технических изделий, паронит и электронит (герметизирующие вещества) [6-7], в авиадвигателестроении [8], медицине [9], в робототехнике для создания мышц [10].

Вместе с тем в настоящее время наблюдается интерес к использованию 3D технологии послойного наплавления для прототипирования и производства высокочастотной аппаратуры, диапазон работы которой все больше продвигается в крайневысокочастотный (КВЧ) и терагерцовый (ТГц) диапазоны [11-12]. В связи с этим требуются материалы, способные помимо прочего, обеспечить

электромагнитную герметизацию и совместимость высокочастотной техники при ее работе в любых условиях.

В силу оптически непрозрачной структуры для большинства материалов на основе полимеров возможно проведение визуальной диагностики только поверхностного слоя. В случае, когда имеется необходимость получить представление о свойствах образцов по всей их толщине целесообразно использовать радиофизические методы, такие как терагерцовая спектроскопия. Терагерцовая спектроскопия во временной области (ТГц-TDS) является мощным инструментом для характеристики оптически непрозрачных полимерных материалов. Поскольку энергия фотонов терагерцовых волн относительно мала по сравнению с энергией видимого света, то они обладают высокой проникающей способностью, что делает возможным их использование для оценки внутреннего строения материалов.

Целью данной работы является исследование электрофизических свойств композиционных эластомеров в терагерцовом диапазоне частот для применения в аддитивных технологиях.

Таким образом, для выполнения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- а) Проведение обзора литературных источников по тематике исследования.
- б) Выбор термопластичных полимеров для матрицы и виды функциональных наполнителей.
- в) Освоение методики изготовления композиционных эластомеров.
- г) Изготовление нити композиционных эластомеров для применения в 3D принтере и печать экспериментальные образцы.
- д) Изготовление аддитивной технологией гибкого многослойного поляризатора.
- е) Расчёт электромагнитного отклика от плоского слоя функционального эластомера.
- ж) Измерение электромагнитного отклика образцов функциональных эластомеров и гибкого поляризатора.
- д) Проведение анализа полученных результатов.

Объектом исследования является процесс взаимодействия электромагнитных волн ТГц диапазона с композиционными эластомерами на основе термопластичных полимеров.

Предмет исследования – величины электромагнитного отклика и электрофизических характеристик композиционных эластомеров в терагерцовом диапазоне.

Измерения спектральных характеристик осуществлялись методами частотной и временной спектроскопии.

Положения, выносимые на защиту (ПВЗ):

1. Добавление 20 массовых % коллоидного графита и 20 массовых % технического углерода к полиэтиленовой матрице с 20 массовыми % каучука приводит к увеличению действительной части диэлектрической проницаемости композита в 4,4 раза и мнимой части диэлектрической проницаемости в 4 раза в диапазоне 0,1-1 ТГц

2. В композиционном эластомере, изготовленном методом 3D печати послойным наплавлением из нити на основе термопластичного полиуретана с добавлением 50 массовых % гексагонального феррита $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ с размерами частиц менее 100 мкм наблюдается избирательное поглощение электромагнитного излучения на частоте 49 ГГц, обусловленное явлением естественного ферромагнитного резонанса.

3. В структуре на основе упорядоченных полос толщиной 400 мкм из композиционного эластомера на основе полиэтиленовой матрицы с добавлением 20 массовых % каучука, 20 массовых % технического углерода и 20 массовых % коллоидного графита, расположенного между двумя слоями термопластичного полиуретана, происходит уменьшение коэффициента прохождения при изменении поляризации падающего излучения на 90 градусов в диапазоне 0,18–0,25 ТГц.

Обоснование достоверности ПВЗ:

Достоверность полученных ПВЗ подтверждается сопоставлением результатов, полученных при помощи двух спектрометров терагерцового диапазона СТД-21 и T-Spec 1000, измеряемых независимо друг от друга.

Достоверность полученных результатов подтверждается благодаря использованию оборудования с аттестованными методиками измерения ЦКП «Центр радиоизмерений ТГУ».

Обоснование новизны ПВЗ:

Впервые получены частотные зависимости коэффициентов прохождения, отражения, поглощения, а также материальных параметров в виде диэлектрической и магнитной проницаемостей, для исследуемых материалов в диапазоне частот от 34 до 1000 ГГц.

Обоснование практической значимости ПВЗ:

Созданные материалы и исследованные характеристики матриц с наполнителями расширяют базу композиционных материалов для дальнейших фундаментальных исследований композиционных полимеров для использования в радиоэлектронной промышленности при прототипировании и производстве гибких конструкций сложной формы, поглощающих электромагнитное излучение и обладающих резонансными частотно-избирательными свойствами.

Структура и объем работы:

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа содержит: страниц – 73, рисунков – 57, таблиц – 7, формул – 29, список используемых источников – 70 наименований.

1 Литературный обзор

Диапазон частот от 0,1 до 10 ТГц (длина волны 30 мкм – 3 мм) занимают терагерцовые волны, которые находятся между инфракрасными и микроволновыми электромагнитными волнами. В последние годы многие исследователи обратили внимание на ТГц технологии ввиду их большой исследовательской ценности и перспективы применения в областях беспроводной связи следующих поколений [13-16], неразрушающего контроля в безопасности [17-18], биомедицине [19], определения безопасности пищевых продуктов и сельскохозяйственной продукции [20-21], глобального мониторинга окружающей среды [22-23], промышленного применения [24] и т.д.

Для развития терагерцовой техники важно создание и внедрение композиционных материалов, которые обладают необходимыми свойствами в этом диапазоне частот.

1.1 Композиционные материалы и включения

Композиционный материал – совокупность двух или более составляющих материалов, обладающих различными физическими или химическими свойствами, при объединении которых образуется материал, который характеризуется уникальными характеристиками, отличающимися от исходных элементов [25, 26]. Концепция композитов хорошо иллюстрируется природными композиционными материалами, такими как древесина, которая состоит из волокнистых цепочек молекул целлюлозы в матрице из органического полимера лигнина [27, 28]. Другим примером природного композита являются кости, состоящие из неорганических кристаллов, называемых гидроксиапатитом, в матрице из органического материала, называемого коллагеном [29].

Выделяют следующие типы композитов:

Полимерные матричные композиты – материалы, состоящие из термореактивных пластмасс или матрицы из термопластов с дисперсным армированием углеродными, стеклянными, кевларовыми, металлическими волокнами [30, 31]. Пластмассы имеют низкую плотность и обладают хорошей кратковременной химической стойкостью. К недостаткам можно отнести то, что

им не хватает термической стабильности, и они обладают умеренной устойчивостью к разложению в окружающей среде.

Композиты с керамической матрицей – это тип керамики, обычно состоящий из волокон углерода, карбида кремния SiC, оксида алюминия Al_2O_3 , нитрида кремния SiN, встроенных в структуру керамической матрицы [32]. Большинство таких материалов обладают низкой плотностью, высокой термической стабильностью и устойчивостью к износу, коррозии и прочим воздействиям. Однако обладают высокой степенью хрупкости и с трудом поддаются формовки.

Композиты с металлической матрицей – материал матрицы обязательно металлический (в основном алюминий Al, магний Mg, медь Cu и титан Ti), а армированием может быть либо дисперсная керамика, такая как оксиды и карбиды, либо металл (например, вольфрам, молибден, свинец) [33]. Металлы в основном имеют среднюю и высокую плотность, термически стабильны, устойчивы к коррозии путем легирования.

Композиты используются в качестве материала для защитных поверхностей, которые могут применяться в качестве микроволновых поглотителей. Электромагнитная энергия может поглощаться полностью, когда в материале сочетаются магнитные и диэлектрические потери. Повысить эффективность микроволновых поглощающих материалов возможно путем изменения их магнитных, проводящих или диэлектрических компонентов за счет внесения различных типов наполнителей. Широко используются такие наполнители, например, как углеродные нанотрубки и гексаферриты.

В конце прошлого века стало одним из значимых событий в мире науки открытие многостенных углеродных нанотрубок, которые сейчас находят широкое применение в областях от электроники до материаловедения. Нанотрубка представляет собой одну или несколько цилиндрических оболочек из графитовых листов (графен). Каждый углерод полностью связан с тремя соседними атомами углерода посредством sp^2 гибридизации, образуя бесшовную оболочку. Наружный диаметр обычно варьируется от 2 до 20 нм в нанотрубках, диаметр полости обычно составляет от 1 до 3 нм. Из синтезируемых материалов углеродные нанотрубки являются самыми жесткими и твердыми. Электропроводящие свойства

у нанотрубок либо металлические, либо полупроводниковые, в зависимости от того, как свернуты листы графена.

Также с прошлого века растет интерес к гексагональным ферритам, они стали основной частью всех производимых магнитных материалов в мире и имеют множество применений. Кроме использования в роли постоянных магнитов, широко применяются в качестве материалов для магнитной записи и хранения данных, а также в качестве компонентов в электрических устройствах, работающих на частотах гигагерцового диапазонов. Гексагональные ферриты, или как их еще называют гексаферриты, представляют собой семейство ферритов с гексагональной кристаллической решеткой. Известным примером является гексаферрит $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, ферромагнетик М-типа. Для них характерны большие значения намагниченности насыщения и поля магнитокристаллической анизотропии. Наибольшее значение поглощения ЭМИ наблюдается в области естественного ферромагнитного резонанса, определяющегося величиной поля анизотропии и частицами ферромагнитного порошка [34].

1.2 Взаимодействие ТГц волны с материалом

Падающая на материал волна испытывает три основных процесса: отражение, пропускание и поглощение, как показано на принципиальной схеме на рисунке 1.

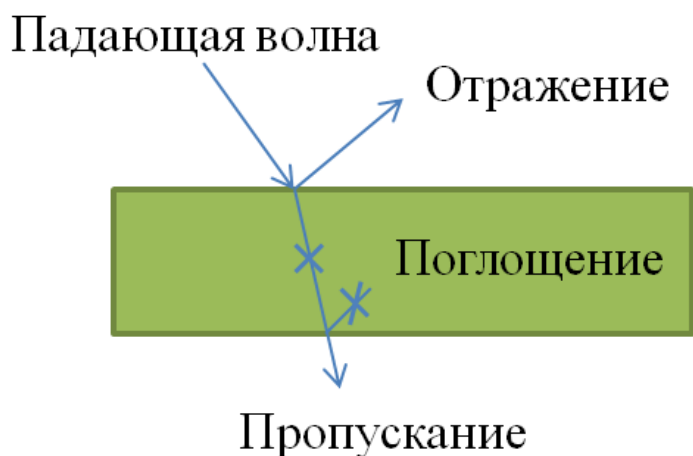


Рисунок 1 – Принципиальная схема взаимодействия волны с материалом

Поглощение определяется как процесс, при котором энергия электромагнитной волны преобразуется в другие формы энергии, главным образом в тепловую. Поглощение определяется соотношением (1) в виде:

$$A = 1 - T - R - MIR, \quad (1)$$

где A – коэффициент поглощения, T – коэффициент пропускания, R – коэффициент отражения, MIR – множественные внутренние отражения. Коэффициент пропускания определяется как отношение прошедшей мощности P_t к падающей мощности P_i . Коэффициент отражения – это отношение отраженной мощности от образца к мощности, отраженной от эталонного металлического зеркала (преимущественно золотое напыление или медь). Коэффициент мощности выражается либо в линейной шкале, либо в децибелах (дБ). Формула для преобразования линейной шкалы в шкалу дБ может быть выражена в виде уравнения (2), которое также часто называют эффективностью экранирования. Значение T равное 10 дБ означает, что 10% исходного излучения прошло через материал и 90% было заблокировано (20 дБ —99%, 30 дБ —99,9% и т.д.).

$$T(dB) = 10 \lg \left(\frac{P_t}{P_i} \right) \quad (2)$$

Проникающая волна может быть отражена изнутри любыми границами внутри материала, что вносит важный вклад в затухание волны. Переотражения в образце особенно важны для материалов с пористой структурой [35] или, например, метаматериалов [36]. Однако для хороших ТГц-поглотителей (T более 10 дБ) процессом множественных внутренних отражений можно полностью пренебречь [37], и коэффициент поглощения из них может быть выражен как:

$$A(dB) = 10 \times \ln \frac{T}{1-R} \quad (3)$$

Величины T , R , A зависят от частоты электромагнитных волн и от природы самого материала. Например, ТГц-спектр органического покрытия на основе углеродных нанотрубок толщиной 80 мкм на прозрачной подложке показан на рисунке 2.

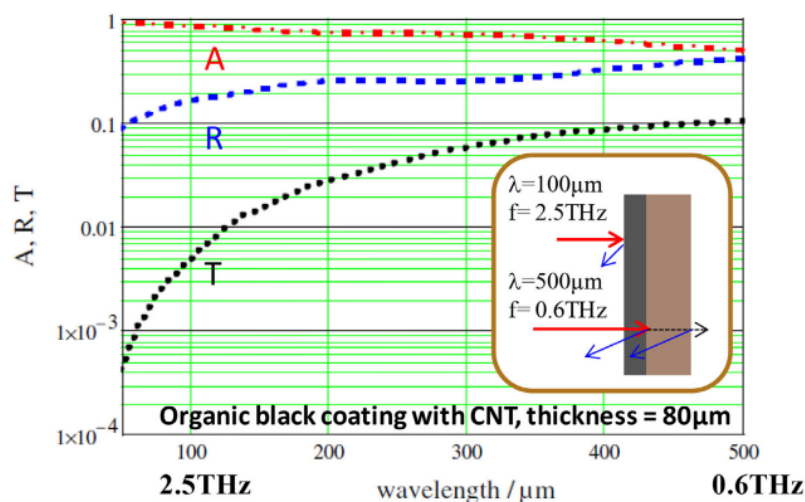


Рисунок 2 – Коэффициент пропускания, отражения, поглощения органического черного покрытия на основе углеродных нанотрубок с толщиной 80 мкм на прозрачных подложках [38]

Поглощение составляет почти 100% на частотах более 2,5 ТГц и уменьшается до 50% на частотах менее 0,6 ТГц. При более высоких длинах волн ТГц-волна может проникать сквозь покрытие и отражаться с обратной стороны. По этой причине коэффициент отражения увеличился до 40% при частоте 0,6 ТГц. Такие спектральные характеристики не соответствуют широкополосным поглотителям, особенно для терагерцовых тепловых детекторов [39]. Поглощение может быть усилено за счет увеличения толщины покрытия, однако вызовет замедление отклика детектора.

Для создания идеально поглощающих материалов необходимо выполнить два требования. Во-первых, импеданс поверхности материала должен быть идентичен импедансу свободного пространства (377 Ом), что обеспечит отсутствие переотражений на границах раздела фаз. Во-вторых, материал должен иметь высокий линейный коэффициент поглощения α во всем интересующем диапазоне частот.

В дополнение к трем основным процессам, существует также множество других взаимодействий между ТГц-волной и материалом, таких как преломление, рассеяние, дифракция и интерференция. Эти явления зависят не только от свойств материала (таких как состояние поверхности, толщина, оптические постоянные), но и от характеристик падающей ТГц-волны (угол падения, длина волны, поляризация). Показатель преломления материала n определяется как отношение

скорости света в свободном пространстве к его скорости в материале. Линейный коэффициент поглощения α определяет, как далеко ТГц-волна может проникнуть в материал, прежде чем она будет рассеяна. Единицей измерения α является см^{-1} . Показатель преломления n и линейный коэффициент поглощения α являются внутренними параметрами материала, известными как оптические постоянные, которые используются для количественной оценки взаимодействия ТГц-волны с материалом. Эти параметры сильно зависят от частоты падающего излучения.

Электромагнитные свойства любого материала или среды характеризуются магнитной и диэлектрической проницаемостями μ и ϵ . В общем случае эти характеристики являются комплексными значениями.

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'', \quad (4)$$

$$\mu = \mu' - j\mu'', \quad (5)$$

где мнимые части ϵ'' и μ'' характеризуют диэлектрические и магнитные потери в материале (плотность тока проводимости), а действительные ϵ' и μ' описывают интенсивность процесса поляризации; $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица.

Диэлектрические и магнитные характеристики нелинейных и анизотропных сред (например, ферромагнитных или сегнетоэлектрических) описываются с помощью тензоров абсолютной диэлектрической и магнитной проницаемостей. Соотношение между действительной и мнимой частями комплексной диэлектрической проницаемости часто описывается с помощью угла диэлектрических потерь, используя значение его тангенса:

$$\text{tg}\delta = \frac{\sigma}{\omega\epsilon\epsilon_0} = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}, \quad (6)$$

где ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды, $\epsilon_0 = 10^7/4\pi\text{с}^2 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная.

Чем больше угол диэлектрических потерь, тем большая доля электромагнитной энергии рассеивается в виде тепловой энергии при протекании

токов проводимости. Проводимость диэлектрика связана с рассеянием энергии, как из-за смещения носителей заряда, так и из-за дисперсии (например, переориентации диполей). Чтобы охарактеризовать однородное пространство относительно плоской волны, используют параметр волнового (характеристического) сопротивления, определяемый влиянием амплитуды составляющих электрического и магнитного полей:

$$Z = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu\mu_0}{\varepsilon\varepsilon_0}}, \quad (7)$$

где μ - относительная магнитная проницаемость среды и $\mu_0=4\pi*10^{-7}\text{Гн/м}$ - магнитная постоянная.

Из-за высокой электропроводности металла разница в характеристических сопротивлениях металла и воздуха очень высока; следовательно, такие экраны обладают высокой эффективностью экранирования, главным образом за счет большого значения коэффициента отражения. С увеличением частоты электромагнитного излучения в металлических экранах поверхностный эффект (скин эффект) становится все более заметным. Глубина проникновения волн в пластину зависит от частоты воздействующего поля, а также от типа материала.

На практике часто возникает потребность в материале с низким коэффициентом отражения электромагнитных волн. Так, сегнетоэлектрики, например, имеют диэлектрическую проницаемость около $\varepsilon=1000-10000$, а угол диэлектрических потерь $\text{tg}\delta=0,1-0,6$ в микроволновом диапазоне при небольшой толщине материала [40].

Падение электромагнитной волны на границу раздела двух сред под углом φ , независимо от ориентации векторов поля относительно плоскости падения, подчиняется следующим законам:

1. Угол падения равен углу отражения:

$$\varphi = \varphi' \quad (8)$$

2. Закон Снеллиуса

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \gamma} = \frac{\beta_2}{\beta_1} \quad (9)$$

где β – коэффициент фазы плоской волны, который определяется электродинамическими параметрами среды: $\beta = \omega \sqrt{\mu_a \varepsilon_a}$

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \gamma} = \frac{\omega \sqrt{\mu_{a2} \varepsilon_{a2}}}{\omega \sqrt{\mu_{a1} \varepsilon_{a1}}} = \frac{\sqrt{\mu_2 \varepsilon_2}}{\sqrt{\mu_1 \varepsilon_1}} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad (10)$$

где $n = \sqrt{\mu \varepsilon}$ показатель преломления среды, а n_{21} – относительный показатель преломления границы раздела сред.

Однако в случае поляризованных волн зависимости коэффициентов отражения от угла падения различны. При падении электромагнитного излучения на поверхность диэлектрика существует угол, при котором отраженная волна полностью поляризована. Следовательно, в соответствии с законом Брюстера, отраженная волна от поверхности диэлектрика отсутствует. Это свойство используется для подавления отражения электромагнитного излучения от поверхности поглощающего материала [41].

Механизм поглощения электромагнитной энергии спиновыми (нетоковыми) материалами отличается от механизма поглощения обычных резистивных сред. Поглощение в резистивных средах основано на работе, выполняемой силой Лоренца (так называемые джоулевы потери); этот процесс характеризуется некоторой инерционностью. Механизм поглощения сред с магнитными потерями из-за явления естественного ферромагнитного резонанса, напротив, “точечный” [42] в результате взаимодействия внешнего ЭМИ с суммарными магнитными моментами доменов. Гиротропные материалы обеспечивают высокое соответствие волнового сопротивления свободному пространству; однако из-за резонансной природы поглощения ЭМИ-экраны на их основе являются довольно узкополосными. Хиральные среды, содержащие многопроходные проводящие катушки с общей осью, значительно превышающей длину волны, также обладают особыми свойствами. Среда с киральными включениями проявляет себя как магнитодиэлектрик, несмотря на то, что она не содержит магнитных материалов [43]. В области кирального резонанса происходит интенсивное

поглощение энергии высокочастотного поля. При размещении внутри спирали ферритового стержня становится возможным управлять параметрами кирального ферромагнитного резонанса, возникающего в такой среде под воздействием внешнего магнитного поля. Поглощение электромагнитной энергии в большинстве материалов происходит за счет преобразования энергии ЭМИ в любой другой вид энергии (часто в тепло) из-за омической проводимости материала, возникновения вихревых токов, потерь, вызванных инерцией поляризации и намагниченностью материала под действием внешнего ЭМИ. В зависимости от природы вектора электрического поля, различные материалы обладают разной способностью поглощать ЭМИ. Идеальные диэлектрики не поглощают электромагнитное излучение, и их диэлектрическая и магнитная проницаемости в данном случае являются реальными значениями. Если мнимыми частями проницаемостей нельзя пренебречь, то среда или материал обладает свойством поглощать электромагнитное излучение. При взаимодействии материалов с СВЧ ЭМИ некоторые их свойства могут существенно изменяться. Проводимость металлов и их сплавов снижается в результате появления поверхностного эффекта, свойства диэлектриков изменяются из-за поляризации.

1.3 Терагерцовая спектроскопия в испытании эластомеров на производстве

Эластомеры имеют относительно низкие показатели поглощения и преломления по сравнению с большинством добавок. Следовательно, материал с более высоким содержанием добавок имеет более высокие показатели поглощения и преломления, чем материал с меньшим содержанием, как показано на рисунке 3. Число в конце названия обозначает твердость по Шору.

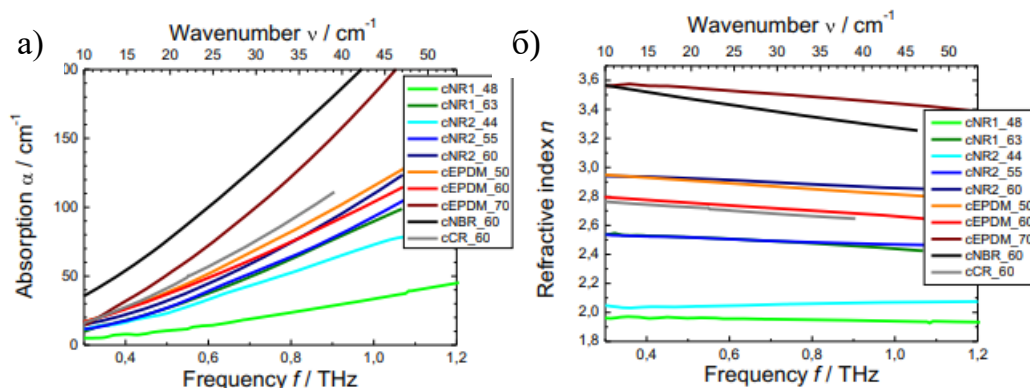


Рисунок 3 – а) Коэффициент поглощения и б) показатель преломления смесей эластомеров на основе нескольких сырьевых материалов [44]

Кроме того, разные добавки по-разному влияют на дисперсию показателя преломления материала. В то время как все основные добавки показывают определенный контраст в измерениях в ТГц диапазоне, технический углерод, как наиболее важная добавка, показывает наибольшее влияние на сигнал, а значит, и наибольшую чувствительность измерения.

В исследовании [44] представлены ТГц измерения образцов каучука. Можно наблюдать четкую корреляцию смесей на основе различного сырья, а также добавок с измерительным сигналом. Эта корреляция является стимулом для проведения встроенных измерений непосредственно в процессе экструзии. Был разработан встроенный ТГц датчик, который может определять изменения в смеси материалов. Он также способен обнаруживать ошибки в работе, такие как подача в экструдер некачественного основного материала. Специально для смесительных экструдеров THz TDS предлагает удобный метод проверки состава материала в режиме реального времени.

Смеси основаны на натуральном каучуке, нитрил-бутадиеновом каучуке, этилен-пропилен-диеновом каучуке и хлоропреновом каучуке. Технический углерод используется в качестве армирующего наполнителя для повышения твердости резиновой смеси. На основании этих результатов были выполнены встроенные измерения в процессе экструзии. Головка экструдера была сконструирована таким образом, чтобы выполнять измерения в процессе экструдирования.

Для генерации и регистрации терагерцового излучения выбрана спектроскопия терагерцового диапазона на основе фотопроводящих антенн, возбуждаемых ультракороткими оптическими импульсами фемтосекундного лазера [45]. В то время как эти лазеры раньше были громоздкими и чувствительными к внешним помехам, недавние разработки привели к созданию терагерцовых систем с оптоволоконной связью, которые обеспечивают гибкое использование, работу в суровых условиях и компактную установку [46–48]. Непрерывная запись терагерцовых импульсов позволяет оперативно обнаруживать изменения в смеси.

Вставка образца в терагерцовый спектрометр влияет на сигнал двумя способами. Часть сигнала поглощается и отражается образцом, поэтому амплитуда сигнала уменьшается. Во-вторых, импульс задерживается из-за более высокого показателя преломления образца, что приводит к большей оптической толщине, как схематично показано на рисунке 4.

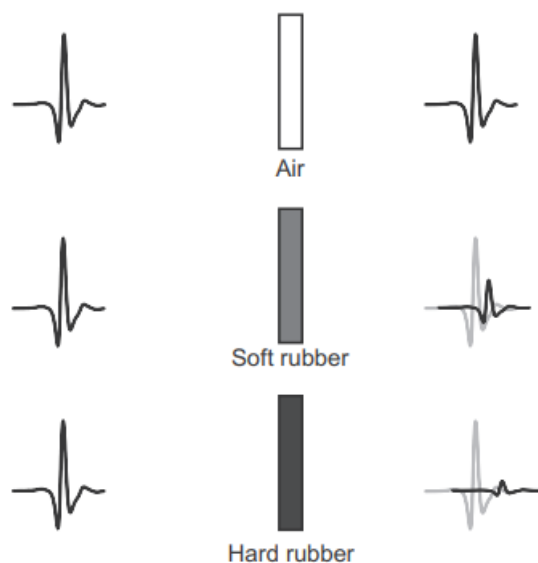
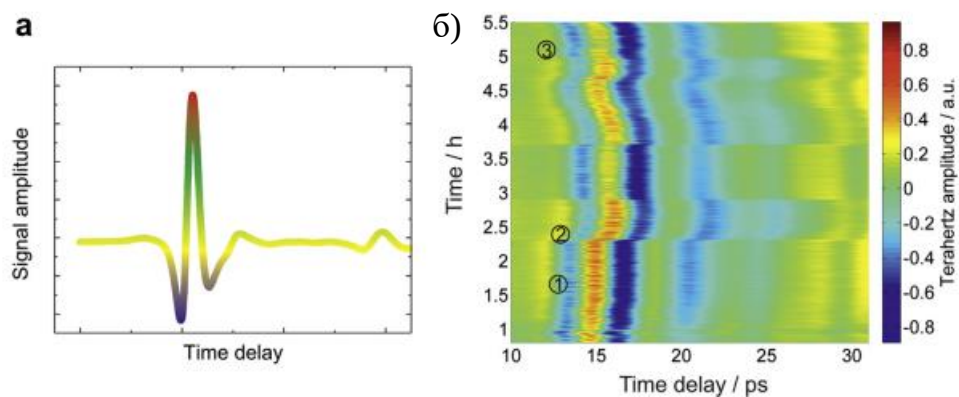


Рисунок 4 – Изменение формы терагерцового импульса при прохождении через плоскопараллельный слой материала [11].

На рисунке 5а показан типичный терагерцовый импульс.



а) одиночный импульс; б) импульсы во времени с амплитудой сигнала в виде цвета

Рисунок 5 – Встроенные данные об импульсе терагерцового диапазона [44]

Амплитуда сигнала отмечена цветовой картой. Изменение измеряемого материала отражается на амплитуде сигнала и временном положении максимума сигнала. Меньшая амплитуда сигнала и большая задержка сигнала указывают на более сильный поглощающий материал с более высоким показателем преломления. Это изменение может быть вызвано более твердым материалом с более высоким содержанием добавки.

На верхних графиках рисунка 6 показаны профили состава материала, присутствующего во время измерения. Как видно, содержание добавки изменялось с шагом в 2% в начале измерения и с меньшими шагами позже. Нижний график на рисунке 6 показывает задержку импульса (вверху, серый) и амплитуду сигнала (внизу, черный) сигнала. Изменения смеси, подаваемой в экструдер, проявляются примерно через 5 мин в конце экструзионной линии, хотя это время сильно зависит от типа используемой смеси. В то время как более мягкая смесь смешивается с более твердой, что показывает плавный переход между материалами (точка 1 на рисунке 6), более твердая смесь выталкивает более мягкую из экструдера с относительно резким срезом (точка 2). В то время как резкое изменение происходит примерно через 5 минут, для завершения перехода к более мягкому материалу требуется до 20 минут. Этот отклик в терагерцовом сигнале показывает, что изменение смеси можно контролировать с точки зрения качества (от мягкого к жесткому или от жесткого к мягкому) и количества (состав материала). Следовательно, время простоя экструдеров и количество отходов материала

при смене материала можно свести к минимуму, если точно знать, какой материал находится в конце линии экструдера.

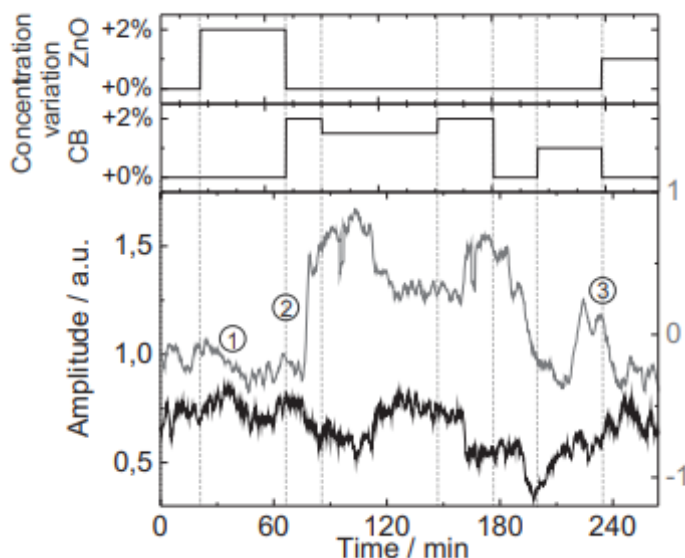


Рисунок 6 – Изменение концентрации ZnO и хлоропренового каучука (CR) при постоянном уровне всех других компонентов во время процесса экструзии эластомера [44]

В конце измерения в экструдер подавали смесь эталонного материала и материала с добавлением технического углерода. Поскольку экструдер не предназначен для смешивания материалов, состав смеси в конце линии экструдера сильно различается. Это хорошо видно при измерении (точка 3), что доказывает возможности встроенной терагерцовой спектроскопии для контроля процесса экструзии. После терагерцевых встроенных измерений были выполнены обычные лабораторные измерения состава материала серии контрольных образцов для проверки. Результаты подтверждают измерения, полученные встроенным терагерцевым измерением.

1.4 Терагерцовая спектроскопия полимеров во временной области

Терагерцовая спектроскопия во временной области (TDs) широко применяется для изучения диэлектрических свойств различных материалов [49 – 64]. Это когерентный и фазочувствительный метод, основанный на нелинейном оптическом или фотопроводящем преобразовании фемтосекундных лазерных импульсов в импульсы ТГц пикосекундной длительности, которые

обнаруживаются с помощью фотопроводящих или электрооптических методов дискретизации [49–50]. Когерентное обнаружение во временной области позволяет комплексным преобразованиям Фурье импульсов получать информацию об амплитуде, а также о фазе спектральных составляющих. При измерении “на прохождение” материал образца помещается на пути терагерцового луча в свободном пространстве. Далее сигнал записывается, в то время как эталонный сигнал получается при удалении образца из измерительного тракта. Преобразование Фурье этих сигналов используется для извлечения показателей преломления, коэффициентов поглощения и диэлектрической проницаемости [51]. Этот метод широко используется для качественных, а также количественных исследований электрофизических свойств различных материалов [52], пищевых продуктов [53, 54], взрывчатых веществ [55], полимеров [56–59]. Полимеры имеют широкий спектр применений в аэрокосмической, оборонной и полупроводниковой промышленности [60]. Они также используются в производстве ТГц оптики, такой как линзы [61], делители [62], волноводы [63,64], спектральные фильтры [61]. Кроме того, они используются в качестве связующего при подготовке образцов для ТГц исследований.

В настоящее время опубликовано значительное количество работ по исследованию полимеров в спектральном диапазоне 0,3–5,0 ТГц, например, акрилонитрилбутадиенстирола, поликарбоната, полиарамида, полиэтилена высокой плотности, полипропилена и политетрафторэтилена, полиэтилена низкой плотности, термопласта.

В работе [65] сообщается об экспериментальных измерениях частотной зависимости диэлектрических параметров, показателя преломления и коэффициента поглощения стирол-акрилонитрильной смолы (САН) и бакелита в спектральном диапазоне 0,1–2,0 ТГц. Были изучены восемь различных полимеров, а именно: полипропилен, полистирол, поликарбонат, полиэтилен высокой плотности, акрилонитрилбутадиенстирол, поливинилхлорид, стирол-акрилонитрильная смола и бакелит.

Форма терагерцового импульса, измеренная для опорного сигнала и образца, показана на рисунке 7а.

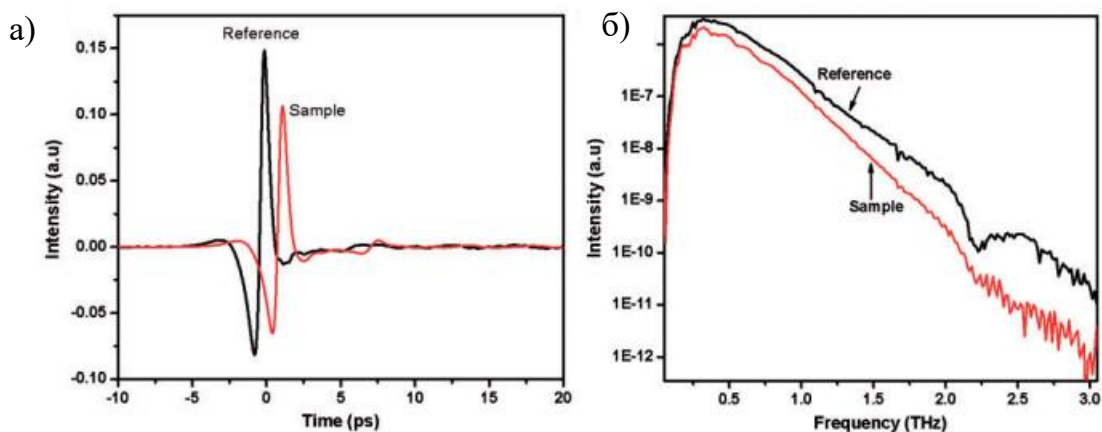


Рисунок 7 – а) Измеренная форма терагерцового импульса во временной области и б) рассчитанное преобразование Фурье соответствующих импульсов [65]

Временной сдвиг импульса при нахождении образца на пути следования излучения объясняется оптической толщиной образца. Для расчета показателей преломления и спектров поглощения данные для эталона и образца были преобразованы Фурье в частотную область с использованием команды дискретного преобразования Фурье в Matlab. Спектры эталона и спектры образца показаны на рисунке 7б. Шесть спектров эталона и образцов усреднялись, а полученные комплексные функции преобразования Фурье эталона ($S_r(\omega)$) и образца ($S_s(\omega)$) затем использовались для извлечения комплексного показателя преломления $\tilde{n}(\omega)$, определяемого формулой:

$$\tilde{n}(\omega) = n(\omega) + ik(\omega) \quad (11)$$

В уравнении 11 действительная часть ($n(\omega)$) комплексного показателя преломления характеризует дисперсию терагерцового импульса за счет материала, а мнимая часть $k(\omega)$ называется коэффициентом экстинкции и связана с коэффициентом поглощения $\alpha(\omega)$, как $\alpha(\omega) = 2\omega * k(\omega)/c$, где c определяет скорость света, а ω — угловая частота. Значения $\tilde{n}(\omega)$ и $a(\omega)$ извлекаются из функций $S_r(\omega)$ и $S_s(\omega)$ для случая прохождения плоской волны через образец толщиной d с низким поглощением для выполнения условия $k(\omega) \ll \tilde{n}(\omega)$ в приближении медленно сходящейся волны следующим образом:

$$n(\omega) = 1 + \frac{\Delta\Phi(\omega)c}{\omega d} \quad (12)$$

$$\alpha(\omega) = \frac{2}{d} \ln \frac{4n(\omega)}{\rho(\omega)(1+n(\omega))^2} \quad (13)$$

$\Delta\Phi(\omega) = \Phi_s(\omega) - \Phi_r(\omega)$ описывает спектральную разность фаз, а $\rho(\omega) = \left| \frac{S_s(\omega)}{S_r(\omega)} \right|$ определяет спектральную амплитуду, которая представляет собой комплексный модуль отношения образцового и эталонного спектров, и определяется следующим соотношением:

$$\frac{S_s(\omega)}{S_r(\omega)} = \left| \frac{S_s(\omega)}{S_r(\omega)} \right| e^{-i\Delta\Phi(\omega)} \quad (14)$$

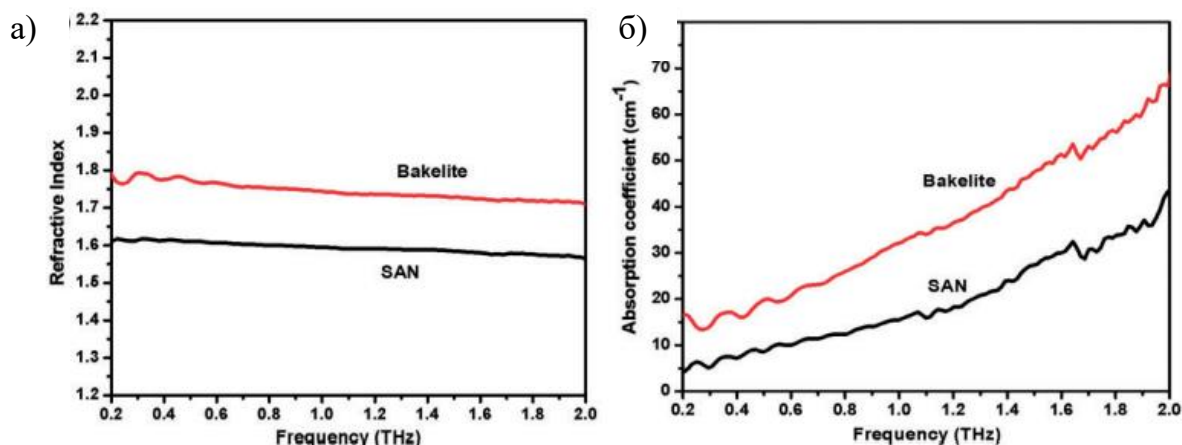
Диэлектрическая проницаемость рассчитывается из выражений 11 – 14:

$$\varepsilon(\omega) = (n(\omega))^2 - \left(\frac{c\alpha(\omega)}{2\omega} \right)^2 + \frac{icn(\omega)\alpha(\omega)}{\omega} \quad (15)$$

Потери электромагнитной энергии в диэлектрическом материале обычно характеризуются тангенсом угла потерь. Он определяется как отношение мнимой и действительной частей функции в уравнении 15. Таким образом, можно охарактеризовать диэлектрические свойства различных материалов.

Показатели коэффициентов преломления и поглощения САН и бакелита представлены на рисунке 8.

Показатель преломления стирол-акрилонитрильной смолы составляет 1,6, а у бакелита – 1,8. Коэффициент поглощения стирол-акрилонитрильной смолы и бакелита увеличивается с частотой и не имеет существенной характеристики поглощения в данном диапазоне. Коэффициент поглощения бакелита выше, чем у стирол-акрилонитрильной смолы.

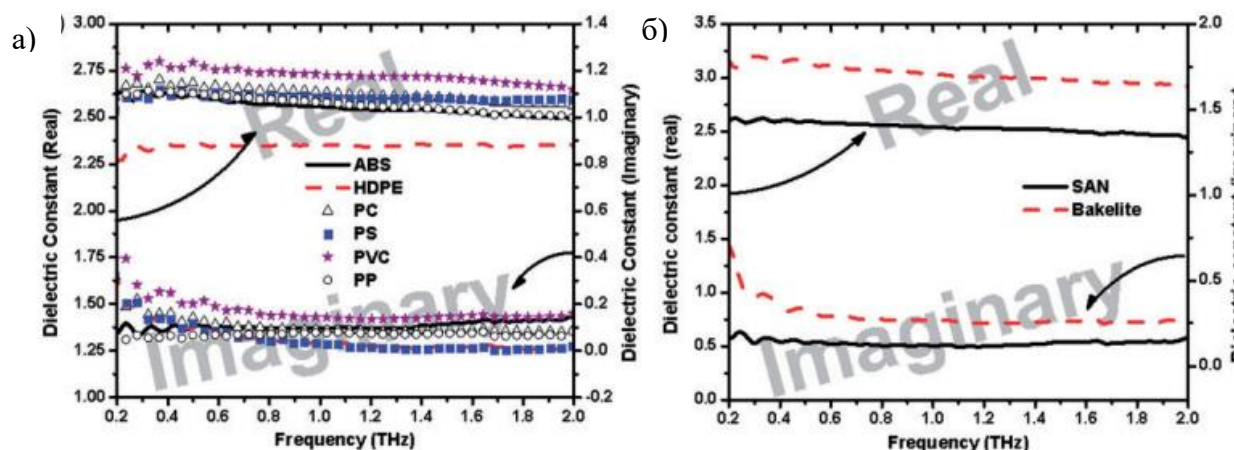


а) показатели преломления; б) коэффициенты поглощения

Рисунок 8 – Показатели преломления и коэффициенты поглощения стирол-акрилонитрильной смолы и бакелита [65]

Показатели преломления и коэффициенты поглощения демонстрируют колебательный характер на более низкой частоте, что связано с эффектом Фабри-Перо от поверхностей образцов. Особенности поглощения, проявляющиеся на частоте 1,6 ТГц, обусловлены разницей влажности в измерениях эталона и образца, которая становится доминирующей на более высокой частоте.

Действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости (рисунок 9) вычисляются согласно уравнению 15.



а) полимеры; б) стирол-акрилонитрильная смола и бакелит

Рисунок 9 – Действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости полимеров, стирол-акрилонитрильной смолы и бакелита [65]

Уравнение 15 показывает, что диэлектрическая проницаемость должна уменьшаться по мере увеличения поглощения. Из рисунка 9 видно, что у образцов, у которых поглощение мало, диэлектрическая проницаемость близка к квадрату показателя преломления.

Из спектров поглощения исследованных полимеров видно, что они имеют очень схожие черты. Они не имеют характерного пика поглощения в качестве идентификационной метки и, следовательно, их трудно отличить друг от друга. В связи с этим требуется оптическая техника для различения таких материалов. Для этой цели может использоваться инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье и ультрафиолетовая видимая спектроскопия, но каждый метод имеет свои достоинства и недостатки. Поскольку ТГц-TDS учитывает информацию о фазе, он способен обнаруживать небольшие изменения показателя преломления, и такие изменения нельзя изучить с помощью других оптических методов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы получены следующие результаты.

- а) Проведен анализ литературных источников по тематике исследования.
- б) Освоена методика изготовления материалов и работа с установкой терагерцового спектрометра T-SPEC 1000.
- в) Проведено измерение частотных зависимостей электромагнитного отклика композиционных эластомеров.
- г) Проведено экспериментальное исследование механической деформации серии образцов, определены их прочностные характеристики при растяжении.
- д) Проведен анализ полученных результатов и сделаны выводы о возможности использования образцов из материалов на основе полиэтиленовой матрицы с добавлением каучука, технического углерода и коллоидного графита, и материалов на основе матрицы из TPU и TPE с добавлением различного содержания гексагонального феррита $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ для электромагнитной герметизации экстремально высокочастотного и сверхвысокочастотного излучения.

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были сделаны следующие выводы.

- а) Анализ диаграммы деформирования показал, что полимерный эластомер TPE разрывается при деформации в 300% при подаче механического напряжения 8 МПа и эластомер TPU испытывает безвозвратный разрыв в 800 % при прикладывании механического напряжения 20 МПа, соответственно.
- б) Добавление 20 массовых % графита в полиэтиленовую матрицу приводит к росту действительной части диэлектрической проницаемости в 4,2 раза, мнимой части диэлектрической проницаемости в 16 – 24 раза, и увеличению линейного коэффициента поглощения в 4 раза в диапазоне 115 – 258 ГГц.
- в) При добавлении в эластомер на основе термопластичного полиуретана 50 массовых процентов гексагонального феррита $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ (менее 100 мкм) наблюдается избирательное поглощение электромагнитного излучения на частоте 49 ГГц, вызванное явлением естественного ферромагнитного резонанса.
- г) В изготовленных методом 3D печати образцах на основе подложек из TPU (400 мкм) и упорядоченной структуры из полос (400 мкм) на основе каучука (20

масс. %), технического углерода (20 масс. %) и коллоидного графита (20 масс. %) наблюдается резонансное уменьшение коэффициента прохождения на частоте 190 ГГц.

Результаты выполнения работы были представлены на:

1. 5-й конференции с международным участием «Терагерцовое и микроволновое излучение: генерация, детектирование и приложения» 27 февраля - 2 марта 2023 года, НИЯУ МИФИ, г. Москва в виде дистанционного доклада;
2. XX Всероссийской конференции студенческих научно-исследовательских инкубаторов, 2 – 5 мая 2023, НИ ТГУ, г. Томск, с очным докладом;
3. Международной научно-практической конференции «Новые полимерные композиционные материалы. Микитаевские чтения», 2 – 8 июля 2023, КБГУ, п. Эльбрус (заявка принята) с очным участием;
4. 33-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо-2023)», 10 – 16 сентября 2023, г. Севастополь (заявка принята) с очным участием.

Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда № 22.29.20248, <https://rscf.ru/project/22.29.20248/> и средств Администрации Томской области.

Измерения выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования «Центр радиоизмерений ТГУ».

Выражаю благодарность за помощь в проведении измерений младшему научному сотруднику К.В. Дорожкину.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Ligon S.C. Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing / S.C. Ligon, R. Liska, J. Stampfl, M. Gurr, R. Mülhaupt // Chemical Reviews. 2017. V. 117. P. 10212–10290.
- [2] Dizon J. R. C. Mechanical characterization of 3D-printed polymers / J. R. C. Dizon, A. H. Espera, Q. Chen, R. C. Advincula // Additive Manufacturing. 2018. V.20. P. 44–67.
- [3] Новаков И.А. Состояние и тенденции развития производства и применения водо- и нефтенабухающих эластомеров для пакерного оборудования / И.А. Новаков, М.А. Ваниев, С.С. Лопатина, Д.А. Нилидин, Н.В. Сычев, Я.Ю. Савченко, А.Д. Брук // Каучук и резина. 2019. Т. 78. №4. С. 228-239.
- [4] Черныш А. А. Экспериментальное исследование деформативности полиуретановых эластомеров, применяемых в судовых амортизаторах / А. А. Черныш, С. Н. Яковлев // Вестник государственного университета морского и речного флота им. Адмирала С.О. Макарова. 2019. Т. 11. №3. С. 534-542.
- [5] Кулезнев В.Н. Химия и физика полимеров. В.Н. Кулезнев // Москва, Высшая школа. 1977. – 248 С.
- [6] Аверко-Антонович Ю.О. Технология резиновых изделий / Ю.О. Аверко-Антонович // Л.: Химия. 2000. – 352 С.
- [7] Михайлова А. К. Эластомеры, их применение и переработка / А. К. Михайлова, М. В. Корчагина // Сборник научных статей 6-й Международной молодежной научной конференции Будущее науки. 2018. Т.4. С. 58-60.
- [8] Портер А. М. Увеличение ресурса двигателей, испытывающих ударные и фрикционные нагрузки, за счет применения эластомеров / А. М. Портер, Р. Е. Исаев // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2008. №127. С. 129-132.
- [9] Кириллова Е.В. Применение эластичных десневых протезов из отечественного силоксанового эластомера при выраженной рецессии десны / Е.В. Кириллова // Автореф. дис. канд. мед. наук : 14.00.21. – М. 2008.
- [10] He Q. Electrospun liquid crystal elastomer microfiber actuator / Q. He, Z. Wang, Y. Wang, Z. Wang, C. Li, R. Annapooranan, J. Zeng, R. Chen, S.Cai. // Science robotics. 2021. V.6. № 57.

[11] Jia S. Integrated dual-laser photonic chip for high-purity carrier generation enabling ultrafast terahertz wireless communications / S. Jia, MC. Lo, L. Zhang, O. Ozolins, A. Udalcovs, D. Kong, X. Pang, R. Guzman, X. Yu, S. Xiao, S. Popov, J. Chen, G. Carpintero, T. Morioka, H. Hu, LK. Oxenløwe // *Nature Communications*. 2022. V.13. №1388.

[12] Rodionov D. 120 GHz Band MMIC SiGe Receiver / D. Rodionov, A. Efimov, A. Khlybov, E. Kotlyarov, P. Timoshenkov // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). 2021. P. 2600-2603.

[13] Malhotra I. Terahertz antenna technology for imaging applications: a technical review / I. Malhotra, K. R. Jha, G. Singh // *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*. 2018. V.10. №3. P. 271 – 290.

[14] Sawada H. / H. Sawada, K. Ishizu, F. Kojima, K. Inagaki, H. Ogawa, K. Fujii, A. Kasamatsu, I. Hosako // 12th European Conf. Ant. and Prop (EuCAP 2018). 2018.

[15] Sheikh F. Scattering and Roughness Analysis of Indoor Materials at Frequencies from 750 GHz to 1.1 THz / F. Sheikh, Y. Zantah, I. B. Mabrouk, M. Alissa, J. Barowski, I. Rolfes, T. Kaiser // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. V. 69, № 11. P. 7820 - 7829

[16] Kürner T. Communications Paving the Way Towards Wireless Tbps / T. Kürner, D. M. Mittleman, T. Nagatsuma // *Springer Series in Optical Sciences*. V. 234. – 540 P.

[17] Chopra N. THz Time Domain Characterization of Human Skin Tissue for Nano-Electromagnetic Communication / N. Chopra, M. Phipott, A. Alomainy, Q. H. Abbasi, K. Qaraqe, R. M. Shubair // 16th Mediterranean Microwave Symposium (MMS 2016). 2016.

[18] Im K. H. Characterization of terahertz waves on foreign materials of composite materials / K. H. Im, S. K. Kim, C. P. Chiou, J. Jong-An // *AIP Conference Proceedings*. 2018. V. 1949. 230023.

[19] Vaks V. L. High resolution terahertz spectroscopy for analytical applications / V. L. Vaks, V. A. Anfertev, V. Y. Balakirev, S. A. Basov, E. G. Domracheva, A. V. Illyuk, P. V. Kupriyanov, S. I. Pripolzin, M. B. Chernyaeva // *Phys. Usp.* 2020. V.190. P. 763–776.

- [20] Ren A. State-of-the-art in terahertz sensing for food and water security – A comprehensive review / A. Ren, A. Zahid, D. Fan, X. Yang, M. A. Imrana, A. Alomainy, Q. H. Abbasia // Trends in Food Science & Technology. 2019. V.85. P. 241-251.
- [21] Wang K. Emerging non-destructive terahertz spectroscopic imaging technique: Principle and applications in the agri-food industry / K. Wang, D. W. Sun and H. Pu // Trends in Food Science & Technology. 2017. V. 67. P. 93-105.
- [22] Klug M. T. Metal composition influences optoelectronic quality in mixed-metal lead–tin triiodide perovskite solar absorbers / T. K. Matthew, L. M. Rebecca, J. B. Patel, T. Green, H. C. Sansom, M.D. Farrar, A J. Ramadan, S.Martani, Z. Wang,a B. Wenger, J. M. Ball, L. Langshaw, A. Petrozza, M. B. Johnston, L.M. Herz, H. J. Snaith // Energy & Environmental Science. 2020. V.13. P. 1776-1787.
- [23] Shi Z. Two-dimensional materials toward Terahertz optoelectronic device applications / Z. Shi, H. Zhang, K. Khan, R. Cao, Y. Zhang, C. Ma, A. K.Tareen, Y. Jiang, M. Jin, H. Zhang. // Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews. 2022. V. 51. 100473.
- [24] Naftaly M. Industrial Applications of Terahertz Sensing: State of Play / M. Naftaly, N. Vieweg, A. Deninger // Sensors. 2019. V. 19(19). 4203.
- [25] Clyne T.W. An introduction to composite materials. 3rd ed. / T.W. Clyne, D. Hull // Cambridge University Press. 2019. – 360 P.
- [26] Naslain R.R. Ceramic Matrix Composites: Matrices and Processing / R.R. Naslain // Encyclopedia of Materials: Science and Technology. 2001. P.1060-1066.
- [27] Dai D. Wood fibers as reinforcements in natural fiber composites: structure, properties, processing and applications / Dai D, Fan M. // Natural Fiber Composites. 2016. P. 3-65.
- [28] Ehrlich H. Nanostructural organization of naturally occurring composites-Part II: silica-chitin-based biocomposites / H. Ehrlich, D. Janussen, P. Simon, V. Bazhenov, N. P. Shapkin, C. Erler, M. Mertig, R. Born, S. Heinemann, T. Hanke, H. Worch, J. N. Vournakis // Journal of Nanomaterials. 2008. 670235.
- [29] Taylor D. Composites: Brittle fracture in Fiber composite materials / D. Taylor // The Theory of Critical Distances. 2007. P. 141–161.

[30] Ray B. C. Temperature effect during humid ageing on interfaces of glass and carbon fibers reinforced epoxy composites / B. C. Ray // Journal of Colloid and Interface Science. 2006. V. 298(1). P. 111–7.

[31] Xu Y. Thermally conducting aluminum nitride polymer-matrix composites / Y. Xu, D.D.L. Chung, C. Mroz // Composites Part A Applied Science and Manufacturing. 2001. V. 32(12) P. 1749–57.

[32] Zhang C. Understanding the wear and tribological properties of ceramic matrix composites / C. Zhang // Advances in Ceramic Matrix Composites. 2014. P. 312–39.

[33] Hunt W.H. Metal matrix composites / W.H. Hunt // Comprehensive Composite Materials. 2000. P. 57–66.

[34] Badin A.V. Ferromagnetic resonance in hexagonal ferrite BaFe₁₂O₁₉ at the EHF frequency range / A.V. Badin, K.V. Dorozhkin, G.E. Kuleshov, V.A. Zhuravlev, V.I. Suslyayev, G.E. Dunaevskii, K.V. Bilinskii // International conference on infrared, millimeter, and terahertz waves, IRMMW-THZ. 2018. P. 8510449.

[35] Liu Q. Electromagnetic wave absorption properties of porous carbon/Co nanocomposites / Q. Liu, D. Zhang, T. Fan // Applied Physics Letters. 2008. V. 93(1). P. 013110.

[36] Du J. Chaos patterned metasurface absorber with multi-peak and broadband J. Du, P. Zhang, L. Qiu, X. Gao, S. Huang, L. He, L. Deng // Journal of Applied Physics. 2021. V. 130(16). P. 165101.

[37] Sankaran S. Biomedical Applications of Electrospun Polymer Composite Nanofibres / K. Deshmukh, S. Sankaran, M. Ahamed, S. K. Pasha // Materials Science, Engineering. 2019. P. 118-122.

[38] Venkatachalam S. Carbon-based terahertz absorbers: Materials, applications, and perspectives / S. Venkatachalam, K. Zeranska-Chudek, M. Zdrojek, D. Hourlier // Nano Select. 2020. V. 1(5). P. 1-20.

[39] Steiger A. Novel pyroelectric detectors for accurate THz power measurements / A. Steiger, W. Bohmeyer, K. Lange, R. Müller // Technisches Messen. 2016. V. 83 (6). P. 386–389.

[40] Шапиро Д.Н. Основы теории электромагнитного экранирования / Шапиро Д.Н. // Энергия: Ленинград, Россия, 1975. С. 112.

- [41] Петров В. М. , Диэлектрические свойства сегнетоэлектриков в слабых и сильных полях сверхвысоких частот // Сегнетоэлектрические вещества. М.: Наука. 1982. С. 164.
- [42] Belous A. High Velocity Microparticles in Space / A. Belous, V. Saladukha, S. Shvedau // Springer Nature Switzerland. 2019. 320 P.
- [43] Kraftmaher A. Microwave properties of the 1-D chiral and chiral-ferrite environments / A. Kraftmaher // Radiotech. Electron. 2003. V. 48(2). P. 183–195.
- [44] Peters O. Terahertz spectroscopy for rubber production testing / O. Peters, M. Schwerdtfeger , S. Wietzke, S. Sostmann, R. Scheunemann, R. Wilk, R. Holzwarth, M. Koch, B. M. Fischer // Polymer Testing. 2013. V. 32 (5). P. 932-936.
- [45] Jepsen P.U. Terahertz spectroscopy and imaging –modern techniques and applications / P.U. Jepsen, D. Cooke, M. Koch // Laser Photonics Rev. 2011. V. 5 (1)
- [46] Wilk R. OSCAT: novel technique for time-resolved experiments without moveable optical delay lines / R. Wilk, T. Hochrein, M. Koch, M. Mei, R. Holzwarth // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2010. V. 32 (5)
- [47] Schumann S. Spectrum to space transformed fast terahertz imaging / S. Schumann, C. Jansen, M. Schwerdtfeger, S. Busch, O. Peters, M. Scheller, M. Koch // Opt Express. 2012. V. 20 (17). P. 19200-19205.
- [48] Sartorius B. All-fiber terahertz time-domain spectrometer operating at 1,5 mm telecom wavelengths / B. Sartorius, H. Roehle, H. Künzel, J. Böttcher, M. Schlak, D. Stanze, H. Venghaus, M. Schell // Opt Express. 2008. V. 16 (13).
- [49] Jepsen P.U. Terahertz Spectroscopy and Imaging: Modern Techniques and Applications / P.U. Jepsen, D.G. Cooke, M. Koch // Laser Photonics Rev. 2011. V. 5(1). P. 124–166.
- [50] Dexheimer S. L. Terahertz Spectroscopy: Principals and Applications / S.L. Dexheimer // Boca Raton: CRC. 2008. - 331 P.
- [51] Mickan S.P. T-Ray Sensing and Imaging / S.P. Mickan, X.-C. Zhang // Int. J. Hi. Spe. Ele. Syst. 2003. V. 13(2). P. 601–676.
- [52] Naftaly M. Terahertz Time-Domain Spectroscopy for Material Characterization / M. Naftaly, R.E. Miles. // Proc. IEEE. 2007. V. 95(8). P. 1658–1665.

[53] Qin J. Feasibility of Terahertz Time-Domain Spectroscopy to Detect Tetracycline Hydrochloride in Infant Milk Powder / J. Qin, L. Xie, Y. Ying. // *Analytical Chemistry*. 2014. V. 86(23). P. 11750–11757.

[54] Massaouti M. Detection of Harmful Residues in Honey Using Terahertz Time-Domain Spectroscopy / M. Massaouti, C. Daskalaki, A. Gorodetsky, A.D. Koulouklidis, S. Tzortzakis // *Appl. Spectrosc.* 2013. V. 67(11). P. 1264–1269.

[55] Zhang C. Identification of Explosives and Drugs and Inspection of Material Defects with Thz Radiation / C. Zhang, K. Mu, X. Jiang, Y. Jiao, L. Zhang, Q. Zhou, Y. Zhang, J. Shen, G. Zhao, X.-C. Zhan // *Terahertz Photonics. Proc. of SPIE*. 2008. V. 6840. P. 68400S.

[56] Scherger B. Terahertz Lenses made by Compression Molding of Micropowders / B. Scherger, M. Scheller, C. Jansen, M. Koch, K. Wiesauer. // *Appl. Opt.* 2011. V. 50(15). P. 2256–2262.

[57] Balakrishnan J. Sensing the Hygroscopicity of Polymer and Copolymer Materials Using Terahertz Time-Domain Spectroscopy / J. Balakrishnan, B.M. Fischer, D. Abbott // *Appl. Opt.* 2009. V. 48(12). P. 2262–2266.

[58] D'Angelo F. Ultra-Broadband Thz Time-Domain Spectroscopy of Common Polymers Using Thz Air Photonics / F. D'Angelo, Z. Mics, M. Bonn, D. Turchinovich. *Opt. Express*. 2014. 22(10). P. 12475–12485.

[59] Pastorelli G. Characterisation of Historic Plastics Using Terahertz TimeDomain Spectroscopy and Pulsed Imaging / G. Pastorelli, T. Trafela, P. Taday, A. Portieri, D. Lowe, K. Fukunaga, M. Strlic // *Anal. Bioanal. Chem.* 2012. V. 403(5). P. 1405–1414.

[60] Kurahatti R.V. Defence applications of polymer nanocomposites / R.V. Kurahatti, A.O. Surendranathan, S.A. Kori, N. Singh, A.V.R. Kumar, S. Srivastava // *Def. Sci. J.* 2010. V. 60(5). P. 13.

[61] Jansen C. Mechanically flexible polymeric compound one-dimensional photonic crystals for terahertz frequencies / C. Jansen, S. Wietzke, V. Astley, D.M. Mittleman, M. Koch // *Appl. Phys. Lett.* 2010. V. 96(11). P. 111108.

[62] Joördens C. Dielectric fibres for low-loss transmission of millimetre waves and its application in couplers and splitters / C. Joördens, K.L. Chee, I.A.I. Al-Naib, I.

Pupeza, S. Peik, G. Wenke, M. Koch // J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves. 2010. V. 31(2). P. 214–220.

[63] Argyros A. HollowCore microstructured polymer optical fiber / A. Argyros, M.A. Van Eijkelenborg, M.C. Large, I.M. Bassett // Opt. Lett. 2006. V. 31(2). P.172–174

[64] Chen D. A Novel Low-Loss Terahertz Waveguide: Polymer Tube / D. Chen, H. Chen // Opt. Express. 2010. V. 18(4) P. 3762–3767.

[65] Mumtaz M. Investigation of dielectric properties of polymers and their discrimination using terahertz time-domain spectroscopy with principal component analysis / M. Mumtaz, A. Mahmood, S. D. Khan, M. A. Zia, M. Ahmed, I. Ahmad // Applied Spectroscopy. 2016. V. 71 (3). P. 1–7.

[66] Гуревич А.Г. Ферриты на сверхвысоких частотах / А. Г. Гуревич // М.: Физматгиз, 1960. – 408 С.

[67] Lagarias J. C. Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex method in Low Dimensions / J. C. Lagarias, J. A. Reeds, M. H. Wright and P. E. Wright // SIAM J. Optim. 1998. V. 9. P. 112-147.

[68] Кремзер Р. А. Система горячего экструдирования тестовых филаментов для 3D-принтера / Р.А. Кремзер // Дипломная работа (проект) специалиста по направлению подготовки: 11.05.01 - Радиоэлектронные системы и комплексы - Томск: [б.и.]. 2020.

[69] Smygalina P. P. Influence of heterogeneity composite filament for additive technology on its electrophysical properties at THz range / P. P. Smygalina, A. V. Badin, D. A. Pidotova, E. A. Trofimov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V.732. 012017.

[70] Zainab R. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics / R. Zainab // Method. 2019. P. 1-17.

СПРАВКА

Томский Государственный Университет

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

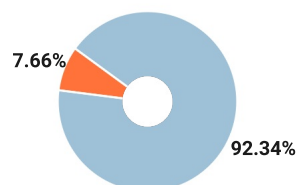
ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Пидотова Диана Андреевна
Самоцитирование
рассчитано для: Пидотова Диана Андреевна
Название работы: ВКР Пидотова Д.А
Тип работы: Магистерская диссертация
Подразделение:

РЕЗУЛЬТАТЫ

СОВПАДЕНИЯ		7.66%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ		92.34%
ЦИТИРОВАНИЯ		0%
САМОЦИТИРОВАНИЯ		0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 21.06.2023



Структура документа:

Проверенные разделы: основная часть с.1-3, 5-66

Модули поиска:

ИПС Адилет; Библиография; Сводная коллекция ЭБС; Интернет Плюс*; Сводная коллекция РГБ; Цитирование; Переводные заимствования (RuEn); Переводные заимствования по eLIBRARY.RU (EnRu); Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика; Переводные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Переводные заимствования по Интернету (EnRu); Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Переводные заимствования издательства Wiley; eLIBRARY.RU; СПС ГАРАНТ: аналитика; СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация; Медицина; Диссертации НББ; Коллекция НБУ; Перефразирования по eLIBRARY.RU; Перефразирования по СПС ГАРАНТ: аналитика; Перефразирования по Интернету; Перефразирования по Интернету (EN); Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Перефразирования по коллекции

Работу проверил: Лапутенко Андрей Владимирович

ФИО проверяющего

Дата подписи: 21-06-2023



Подпись проверяющего



Чтобы убедиться
в подлинности справки, используйте QR-код,
который содержит ссылку на отчет.

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование
корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего.
Предоставленная информация не подлежит использованию
в коммерческих целях.