На правах рукописи

Малкин Александр Иванович

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДЫХ И СЫПУЧИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В X-ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

Специальность 1.3.13 – Электрофизика, электрофизические установки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург

2023

Работа выполнена в Уральском федеральном университете имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

Научный руководитель:	**Князев Сергей Тихонович** доктор технических наук, доцент, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
Официальные оппоненты:	**Муравьев Вячеслав Михайлович** доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук (ИФТТ РАН), ведущий научный сотрудник **Комнатнов Максим Евгеньевич** кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», доцент кафедры телевидения и управления
Ведущая организация:	Федеральное государственное автономное научное учреждение Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова Российской академии наук

Защита диссертации состоится «26» марта 2024 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.160.01 на базе ИЭФ УрО РАН по адресу 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена 106

С диссертацией можно ознакомится в библиотеке ИЭФ УрО РАН и на сайте http://www.iep.uran.ru/diss/publ/

Автореферат разослан «___»_____20___г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук Медведев Медведев М.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Разработка устройств, использующих в процессе работы энергию электромагнитных волн, требует наличия специализированных материалов, специфический набор электрофизических характеристик которых позволяет воздействовать на распространяющуюся электромагнитную волну заданным образом. Современные тенденции к миниатюризации устройств накладывают еще более жесткие требования к используемым в их основе материалам, в связи с чем возможность точно определять электрофизические характеристики используемых материалов в широком диапазоне частот приобретает все большую важность.

К электрофизическим характеристикам материала следует отнести в первую очередь такие параметры, как комплексные диэлектрическая и магнитная проницаемость. Все остальные характеристики материалов на физическом уровне находятся в прямой зависимости от обозначенных параметров и могут быть легко найдены расчётным путем.

Знание частотных зависимостей комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей позволяют с высокой точностью провести моделирование частотных характеристик как синтезируемых материалов [1], [2], так и разрабатываемых изделий и конструктивных элементов на основе диэлектриков [3]–[6]. Одним из основных недостатков существующих подходов к измерению значений диэлектрической и магнитной проницаемостей, применяемых для моделирования и верификации полученных результатов, является использование низкочастотных методов измерения, рабочий диапазон которых не охватывает предполагаемый частотный диапазон синтезируемого материала или разрабатываемого изделия [7] либо использование только определенных частотных точек без наличия информации о характере частотной зависимости проницаемостей [8], [9].

В большом количестве научных работ рассматриваются разнообразные вариации применения метода линии передачи для исследования электрофизических характеристик материала с использованием волноводной оснастки [10]–[15]. Основным недостатком используемой в этих работах методики измерения электрофизических характеристик является отсутствие комплексного подхода к решению вопроса вычисления комплексных значений диэлектрической и магнитной проницаемостей, что не дает возможности всесторонне оценить полученный результат и сделать вывод о возможно использования измеренных значений проницаемостей.

На основании вышеизложенного была сформулирована **цель диссертационного исследования**: исследовать возможность применения методов определения электрофизических параметров твердых и сыпучих материалов в диапазоне частот 8 – 12 ГГц (X-диапазон) при разработке новых экранирующих материалов, использующихся в разнообразных электрофизических установках для обеспечения требуемого уровня электромагнитной совместимости. Разработать программно-аппаратный комплекс экспериментального исследования электрофизических характеристик материалов, пригодный для использования в том числе и при организации выпуска новых материалов в промышленном масштабе. Продемонстрировать на практике важность исследования электрофизических характеристик как разрабатываемого композитного материала, так и всех входящих в его состав компонентов, что будет способствовать учету всех нюансов технологического процесса получения новых материалов и повышению стабильности эксплуатационных характеристик новых материалов и изделий из них.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Проведен анализ существующих подходов и решений для исследования частотных зависимостей электрофизических характеристик твердых и

сыпучих материалов. Сформулированы предложения по модернизации и улучшению существующих методик для расширения их сферы применения при исследовании свойств перспективных материалов.

2. Проведена разработка программно-аппаратного комплекса для экспериментального исследования электрофизических параметров твердых и сыпучих материалов в диапазоне частот 8-12 ГГц (X-диапазон частот);

3. С использованием разработанного программно-аппаратного комплекса определения электрофизических характеристик материалов проведена отработка технологического процесса получения и изменения электрофизических свойств поглощающей СВЧ излучение керамики на основе BeO с добавлением микро и нанопорошков TiO_2;

4. С использованием разработанного программно-аппаратного комплекса определения электрофизических характеристик материалов проведено исследование влияния концентрации добавки Bi и температуры спекания на электрофизические характеристики керамики на основе $SrMoO_4$, которая может быть использована в частотно-зависимых структурах, предназначенных для обеспечения требований ЭМС;

5. С использованием разработанного программно-аппаратного комплекса получены требования к технологическому процессу, составу и параметрам наполнителей нового экранирующего материала на основе диэлектрической матрицы с добавлением углеродного волокна и магнетита.

Научная новизна:

1. Разработана оснастка для расширения возможностей существующих методов экспериментального определения электрофизических параметров сыпучих материалов, с целью минимизации временных и трудовых затрат на проведения измерений и повышения точности измерений за счет учета параметров пластин, фиксирующих исследуемый материал;

2. Показана зависимость электрофизических характеристик и экранирующей способности керамики на основе BeO с добавлением микропорошка TiO_2 от температуры спекания, концентрации нанопорошка

TiO_2. Исследованы факторы, влияющие на стабильность электрофизических характеристик экранирующего материала на основе BeO в X-диапазоне частот;

3. Показана взаимосвязь между резонансной характеристикой относительной диэлектрической проницаемости исследуемой низкотемпературной керамики на основе $SrMoO_4$ и концентрацией добавки Bi. Исследовано влияние температуры спекания низкотемпературной керамики на основе $SrMoO_4$ с добавлением Bi на частотную характеристику относительной диэлектрической проницаемости;

4. Впервые получены экспериментально данные по электрофизическим свойствам нового композиционного материала на основе диэлектрической матрицы с добавлением извлеченного углеродного волокна и магнетита.

Теоретическая и практическая значимость:

1. Выдвигаемая работа способствует обобщению имеющихся наработок в области измерения электрофизических параметров твердых и сыпучих материалов в X диапазоне частот, что позволяет существенно сократить временные и трудовые затраты на разработку и производство новых композитных материалов, в том числе и с наноразмерными наполнителями;

2. Создана компьютерная программа на языке MATLAB для расчета комплексных относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей твердых и сыпучих материалов с возможностью последующей обработки полученных результатов с целью фильтрации паразитных составляющих и расчета необходимых значений;

3. На основе разработанного программно-аппаратного комплекса подготовлены методические рекомендации по выбору линий передачи и измерительной оснастки для построения соответствующих измерительных систем;

4. Выявлено влияние повышения температуры спекания поглощающей керамики на основе BeO с добавлением микро и нанопорошков TiO_2 на

стабильность электрофизических характеристик материала после воздействия повышенных температур;

5. Выявлено влияние температуры спекания на параметры резонансов на частотной характеристике электрофизических параметров низкотемпературной керамики на основе $SrMoO_4$ с добавлением Bi;

6. Исследованы закономерности изменения электрофизических свойств экранирующих композитов на основе диэлектрической матрицы с добавлением углеродного волокна и магнетита, позволяющие использовать значения электрофизических характеристик для формирования эффективных радиопоглощающих материалов.

Методология и методы исследования

Для экспериментального определения коэффициентов матрицы рассеяния исследуемых твердых и сыпучих материалов применялся векторный анализатор цепей Rohde&Schwarz ZVA50 с соответствующей измерительной оснасткой, состоящей из коаксиально-волноводных переходов и отрезков волноводной линии передачи. Для учета систематической погрешности используемого анализатора выполнялась процедура векторной коррекции систематической ошибки измерения (калибровка) с использованием TRL техники [40]. Для расчета комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей из измеренных коэффициентов матрицы рассеяния использовался математический аппарат Nicolson – Ross – Weir [41,42].

Автоматизация измерительного процесса и последующая обработка полученных данных выполнялась с применением пакета прикладных программ MATLAB.

Корректность теоретической оценки систематической погрешности измерительной системы подтверждается результатами проведенных измерений с использованием эталонного образца и периодическим измерением образцов с известными значениями комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Реализован программно-аппаратный комплекс для экспериментального исследования электрофизических параметров твердых и сыпучих материалов в X – диапазоне частот, являющийся составной частью технологического процесса получения радиотехнических материалов;

2. Выявлена зависимость электрофизических характеристик получаемых керамических соединений на основе BeO с добавлением микропорошка TiO_2 от изменения температуры спекания керамики и доли нанопорошка TiO_2 с применением реализованного программно-аппаратного комплекса;

3. Выявлены наличие резонансов на частотной характеристике электрофизических параметров керамики на основе $SrMO_4$ с добавлением Bi в X-диапазоне частот и факторы, позволяющие изменять частотные параметры резонансов и форму резонансной характеристики, что позволяет использовать такой материал для целей обеспечения электромагнитной совместимости электрофизических устройств;

4. Впервые получены экспериментально данные по электрофизическим свойствам нового композиционного материала на основе диэлектрической матрицы с добавлением извлеченного углеродного волокна и магнетита.

Достоверность защищаемых положений

Достоверность результатов обусловлена исследованием относительной погрешности измерения электрофизических характеристик материалов с использованием разработанного программно-аппаратного комплекса, положительными рецензиями при апробации и опубликования основных результатов работы. Точность экспериментальных результатов обеспечивается использованием поверенного измерительного оборудования и стандартных методов измерений. Дополнительно достоверность основных результатов работы аргументируется их апробацией на конференциях и публикациями в рецензируемых журналах..

Внедрение результатов работы

Использование разработанного программно-аппаратного комплекса в ходе выполнения проекта грант РНФ №21-79-10394 «Синтез новых магнитных нанокомпозитов и экспериментально-теоретическое исследование их взаимодействия с электромагнитным микроволновым излучением», поддержанного Российским Научным Фондом, и работ в рамках проекта постановления Правительства РФ № 218, 2019-218-11-8415, Создание высокотехнологичного производства высокочастотного радара, предназначенного для использования в составе интеллектуальных систем помощи водителю, систем автоматического управления беспилотных транспортных средств и систем интеллектуального земледелия, 2019-2021.

Личный вклад

В диссертации представлены результаты работы, в которых автору принадлежит определяющая роль. Постановка задач исследований осуществлялась научным руководителем д.т.н., доцентом Князевым Сергеем Тихоновичем. Основная часть работ опубликована с научным руководителем. В совместных работах диссертант принимал участие в разработке математических моделей, выполнении расчётов и экспериментов, при обсуждении работы осуществлял объяснение и интерпретацию результатов исследований.

Апробация результатов и публикации

По теме диссертации опубликовано 25 работ, среди которых 8 статей в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК. Материалы 16 докладов проиндексированы международной базой цитирования SCOPUS, 7 из которых также представленны в Web of Science.

Основные результаты работы были представлены диссертантом на следующих конференциях: 2018 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, Метрология в радиоэлектронике. Материалы XI Всероссийской научно-технической

конференции 2018, 2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, 2021 29th Telecommunications Forum, TELFOR 2021.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы. Она изложена на 117 страницах, содержит 79 рисунков, список литературы из 130 названий.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, представлены результаты проведения поисковых научных исследований в области измерения электрофизических характеристик твердых и сыпучих диэлектрических материалов, в том числе композиционных материалов с различным наполнением. Сформулированы цель работы и решаемые задачи, отмечена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведены основные характеристики материалов, определяющие их поведение во внешнем переменном электромагнитном поле. Описаны существующие подходы к измерению электрофизических параметров материалов, а в первую очередь действительной части относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь. Рассмотрены теоретические основы построения измерительных систем для определения комплексной диэлектрической проницаемости в различных диапазонах частот воздействующей электромагнитной волны. Выбрана методика определения электрофизических характеристик материалов, реализация которой позволит разработать оригинальную отечественную методологию экспериментального исследования параметров твердых и сыпучих материалов.

Во второй главе приведено описание реализованной методики определения электрофизических характеристик твердых и сыпучих материалов.

Рассмотрен вопрос измерения электрофизических параметров сыпучих материалов, которые являются основой большинства современных композитных материалов, и контроль их параметров позволит повысить как стабильность электрофизических параметров изготавливаемых материалов, так и эффективность отработки технологического процесса. Разработана необходимая оснастка для реализации возможности измерения комплексной относительной диэлектрической проницаемости сыпучих материалов в рамках разработанной методологии.

В работе предложен новый метод фиксации измеряемого сыпучего материала в держателе образца, позволяющий исключить трудоемкую процедуру исключения цепей из измерительного процесса, что значительно снижает трудоемкость выполняемых измерений и позволяет уменьшить систематическую погрешность измерения электрофизических характеристик исследуемых материалов.

Результатом выполнения работ, описанных во второй главе является разработанный программно-аппаратный комплекс [А1], основанный на описанной в работе методике, позволяющей автоматизировать измерение таких электрофизических характеристик твердых и сыпучих материалов, как комплексные диэлектрическая и магнитная проницаемости.

Приведен анализ источников относительной погрешности разработанного программно-аппаратного комплекса для определения электрофизических параметров твердых и сыпучих материалов.

Приведен анализ составляющих погрешности измерения действительной и мнимой частей относительной диэлектрической проницаемости образцов методом линии передачи. На рис.1 представлен результат измерения электрофизических характеристик армированного фторопласта с указанием пределов относительной погрешности измерения

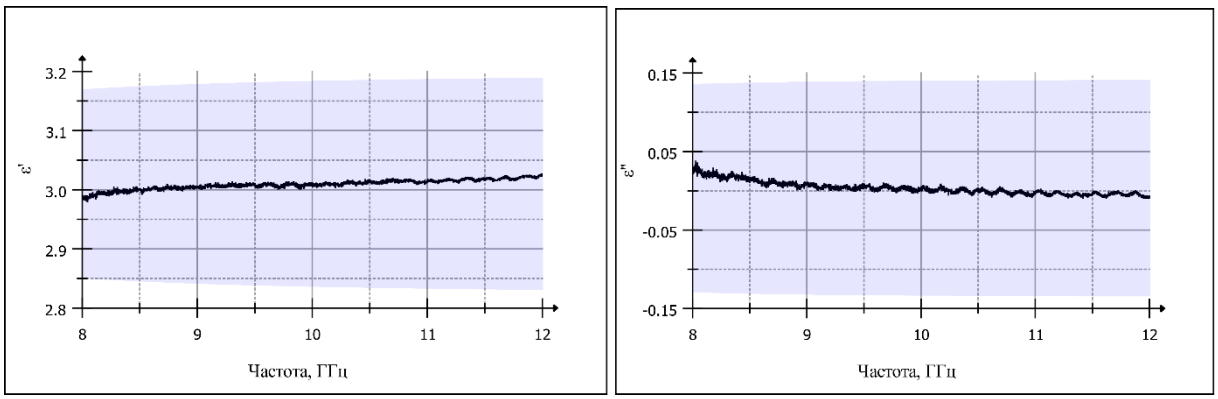

Рис.1 Частотная зависимость действительной и мнимой части относительной диэлектрической проницаемости армированного фторопласта с указанием пределов относительной погрешности измерения

В ходе выполнения работ, описанных во второй главе, для определения метрологических характеристик разработанного программно-аппаратного комплекса выполнено экспериментальное исследование относительной погрешности измерения относительной комплексной диэлектрической проницаемости путем сравнения полученных значений комплексной относительной диэлектрической проницаемости серии образцов из материала с точно известными значениями, полученными резонансным методом с использованием аттестованного оборудования [А2].

В третьей главе рассмотрено влияние изменений в технологическом процессе получения поглощающей керамики на основе оксида бериллия (BeO) и добавок микро и нанопорошка диоксида титана (TiO_2) на электрофизические характеристики образцов исследуемой керамики.

Добавки TiO2 в BeO-керамику после термообработки в восстановительной атмосфере сопровождаются значительным увеличением электропроводности и способности поглощать электромагнитное излучение в СВЧ-диапазоне спектра [А3, А4].

В данной работе сделан упор на исследование влияния изменения условий получения керамических образцов на основе керамики BeO с добавлением микро и нанопорошков TiO_2, таких как температура отжига и наличие восстановительной термообработки в среде водорода, на значения комплексной диэлектрической проницаемости в диапазоне частот от 8 до 12

ГГц. Результат измерения электрофизических характеристик керамики с различным содержанием микро и нанопорошка TiO_2 представлен на рис.2

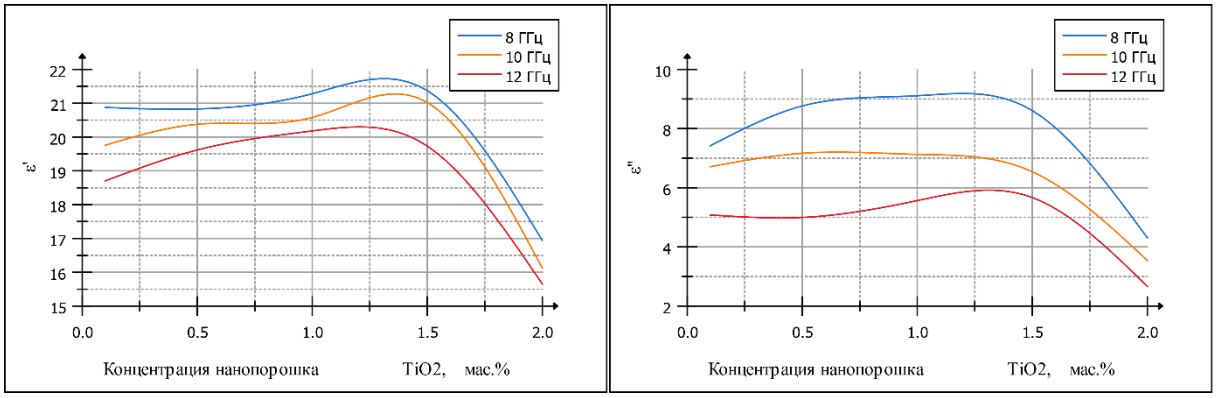

Рис.2 Диэлектрическая проницаемость и диэлектрические потери керамики на основе BeO с добавлением микро и нанопорошков TiO_2

Были исследованы электрофизические характеристики, а именно комплексные значений диэлектрической и магнитной проницаемостей микро и нанопорошков диоксида титана [А5], которые использовались в качестве добавок в исследуемые образцы керамики. Установлена зависимость электрофизических характеристик исследуемых порошков от дополнительной термообработки образцов при температуре 800 °С, что может быть связано с фазовыми переходами в порошках диоксида титана при воздействии указанных температур.

Результаты, полученные в ходе измерений образцов керамики с различным содержанием добавок микро- и наночастиц TiO_2, показывают, что добавление нано-частиц TiO_2 приводит к значительному снижению диэлектрической проницаемости керамики [А4], при сохранении возможности использовать такую керамику в качестве поглотителя в СВЧ. Частотная зависимость значений мнимой части диэлектрической проницаемости эквивалентно схожему изменению проводимости исследуемого образца керамики. Резкое уменьшение значения мнимой части диэлектрической проницаемости при добавлении нанопорошка TiO_2 может свидетельствовать о том, что такая добавка препятствует образованию проводящих областей в

объеме керамики, тем самым снижая значение проводимости исследуемого образца, что косвенно подтверждается микрофотографией сколов керамики.

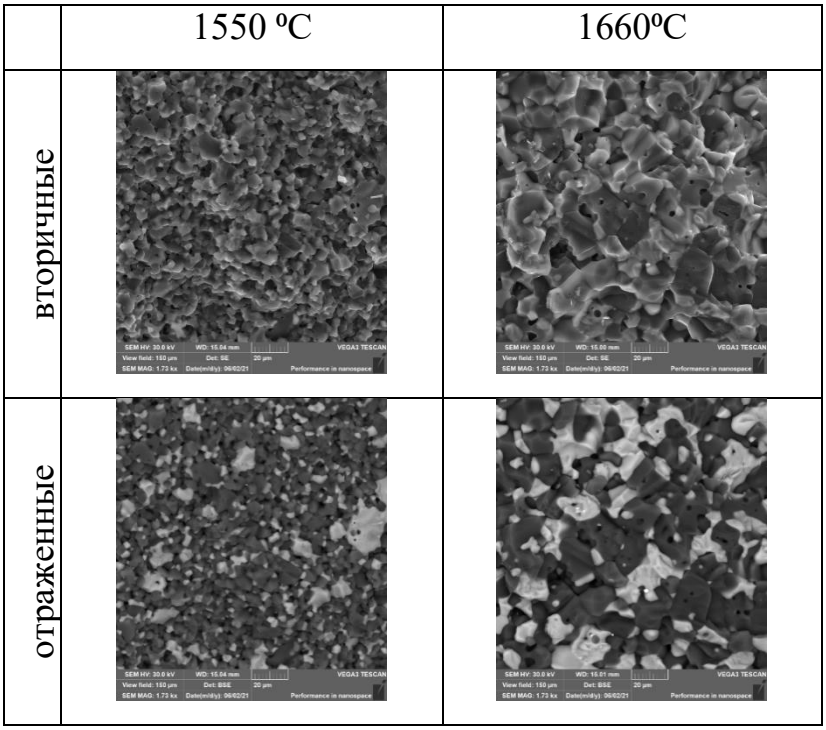

Рис.3 Микрофотографии сколов керамики BeO с добавлением 29.5 % микропорошка TiO2 и 0.5% нанопорошка TiO2, спеченных при температурах 1550 ºС и 1660 ºС, полученные в режимах вторичных и отраженных электронов.

Было установлено, что повышение температуры спекания образцов до 1660 ºС приводит к изменению объемной структуры образца, которое минимизирует влияние на электрофизические характеристики керамики добавки нанопорошка TiO_2 [А6].

В ходе выполнения исследований взаимодействия керамики на основе BeO с добавление микро и нанопрошков TiO_2 с электромагнитной волной, при использовании разработанной методологии, было выявлено значительное влияние температуры спекания керамики на электрофизические характеристики, что показывается важность подбора оптимальной температуры спекания, для достижения заданных характеристик при использовании получаемой керамики для поглощения электромагнитного излучения.

В четвертой главе представлены результаты исследования электрофизических характеристик керамики на основе шеелит подобных структур ABO_4.

В качестве исходного материала для исследования электрофизических характеристик керамики со структурой шеелита был выбран $SrMoO_4$, так как он обладает хорошими исходными электрофизическими характеристиками. Диэлектрические характеристики образца $SrMoO_4$ приведены на рис.4.

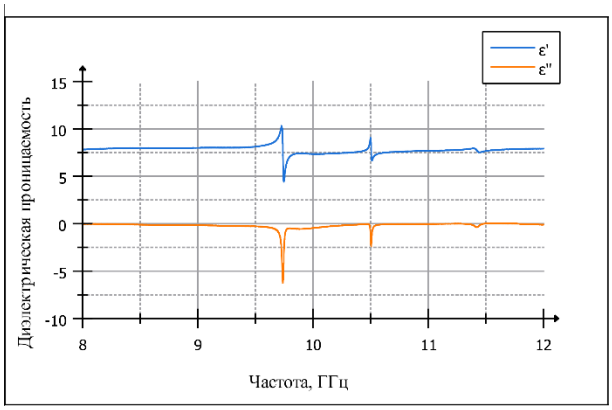

Рис.4 Частотная зависимость диэлектрической проницаемости образца керамики на основе SrMoO4

Для модификации свойств исходного материала на основе $SrMoO_4$ для замещения использовались ионы Bi.

Первым этапом выполнения работы по исследованию электрофизических характеристик соединений типа $Sr_{1-1.5x}Bi_{x-0.5x}MoO_4$ стало измерения электрофизических свойств порошка исходной смеси составляющих компонент, из которой в дальнейшем получали керамические образцы путем прессования в брикеты и отжига в корундовых тиглях. На зависимости диэлектрической проницаемости от доли Bi в смеси исходных компонент наблюдается максимум, соответствующий $Bi_{0.2}$ (рис.5)

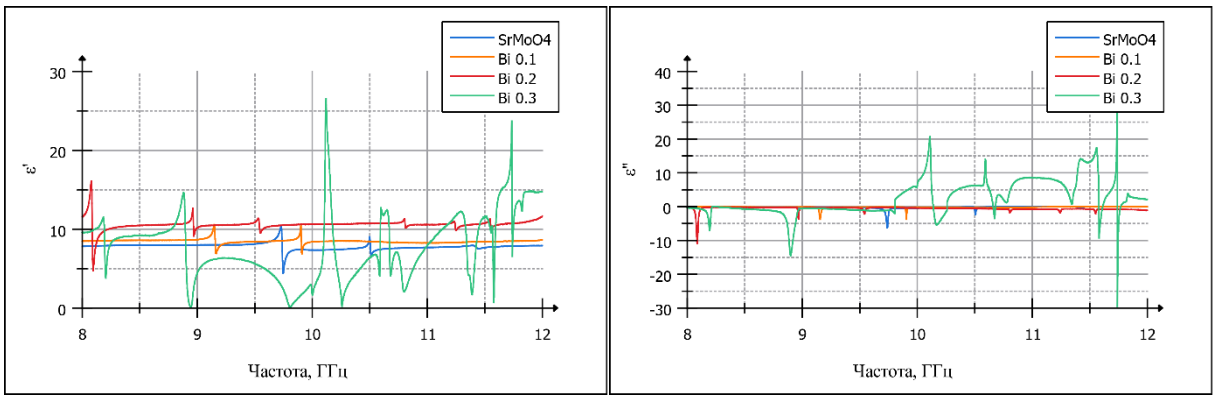

Рис.5 Частотная зависимость действительной и мнимой частей относительной диэлектрической проницаемости образца керамики на основе SrMoO4 с разным содержанием Bi

Из полученных порошков исходных компонент были спрессованы брикеты с добавлением этилового спирта в качестве гомогенизатора с последующим отжигом при температуре 800 °C в корундовых тиглях с прослойкой из исходного порошка. Синтез образцов серии $Sr_{1-1.5x}Bi_{x-0.5x}MoO_4$ привел к формированию тетрагональной фазы, изоструктурной $Sr_{0.88}Bi_{0.08}MoO_4$ в области концентраций $0.05 \leq x \leq 0.2$. При увеличении коцентрации Bi $x > 0.2$ на дифрактограмме в области малых углов появляются рефлексы, относящиеся к сверхструктурному упорядочению.

Полученные данные при исследовании образцов керамики, спеченных при разных температурах, позволяют сделать вывод, что появление эффекта сверхструктурного упорядочения образца возможно не только при доли висмута в соединении, превышающей значения 0.3, но и при повышения температуры спекания образцов с содержанием висмута менее 0.3, при этом понижение температуры спекания образца $Sr_{0.475}Bi_{0.35}MoO_4$ привело к смешению резонансной характеристики в более высокочастотную область, что свидетельствует о том, что регулируя температуру спекания образцов керамики типа $Sr_{1-1.5x}Bi_{x-0.5x}MoO_4$ можно изменять частотную характеристику изготавливаемых образцов в широком диапазоне частот (рис.6) [А7, А8].

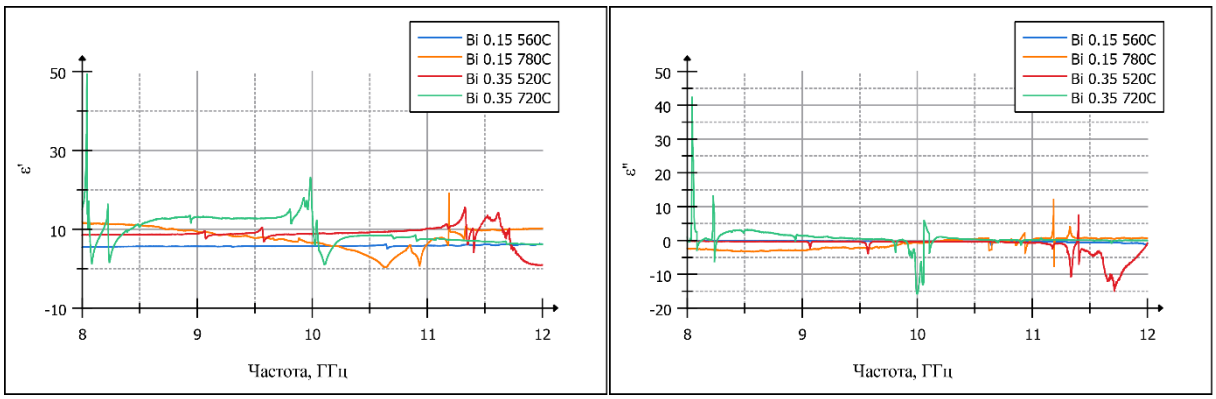

Рис.6 Частотная зависимость действительной и мнимой частей относительной диэлектрической проницаемости образца керамики на основе SrMoO4 с разным содержанием Bi в зависимости от температуры спекания

Результаты, полученные в ходе выполнения исследований приведенных в пятой главе, позволяют сделать вывод, что использование разработанной методологии экспериментального исследования электрофизических параметров материалов, позволяет оценивать не только влияние технологических процессов получения керамики на ее электрофизические характеристик, но и исследовать структурные изменения в образце по изменению формы частотной характеристики комплексной относительной диэлектрической проницаемости материала в зависимости от условий его получения и химического состава.

В пятой главе представлены результаты разработки экранирующего материала на основе диэлектрической матрицы с добавлением углеродного волокна и магнетита.

В ходе оценки влияния различных концентраций и смесей наполнителя было установлено, что добавление магнетита с матрицу из АБС пластика в количестве 3% практически не повлияло на электрофизические характеристики образца и они близки к значениям, полученным для чистого образца из АБС пластика. Добавление углеродного волокна в пластик привело, как и ожидалось, к резкому увеличению как действительной, так и мнимой частей относительной комплексной диэлектрической проницаемости, что уже позволяет использовать полученный материал в качестве экранирующего

слоя, который будет отражать электромагнитные волны за счет большого значения действительной части диэлектрической проницаемости.

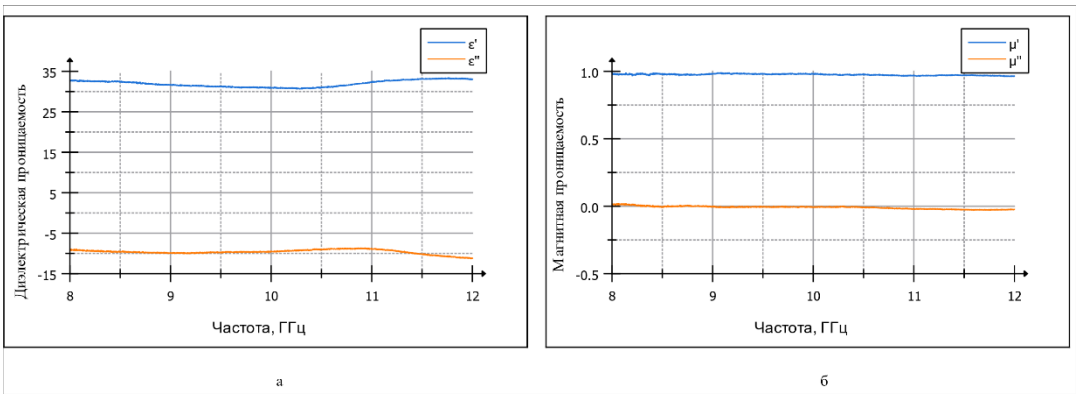

Рис.7 Частотная зависимость комплексных относительных диэлектрической (а) и магнитной (б) проницаемостей для образца композитного материала на основе АБС пластика с добавлением 3% углеродного волокна.

Было выявлено, что в зависимости от взаимной ориентации углеродных волокон действительная часть будет отличаться более чем в 1.5 раза, что является существенным значением, при использовании подобного материала в качестве экранирующего покрытия.

Совместное добавление углеродного волокна и Fe_3O_4 способствовало значительному уменьшению влияния взаимной ориентации углеродного волокна на электрофизические характеристики композита, что позволяет использовать подобный состав композитного материала для промышленного получения экранирующих покрытий.

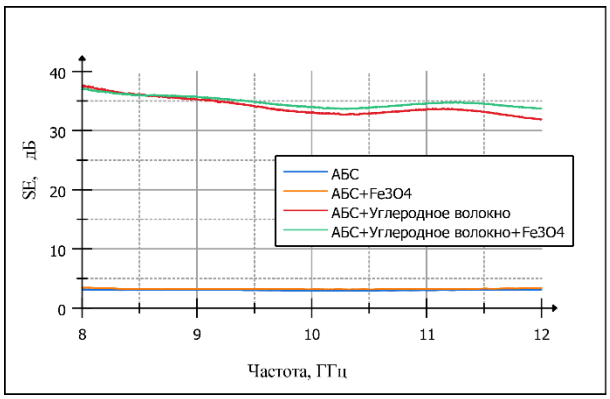

Рис.8 Частотная зависимость эффективности экранирования для образцов композитного материала на основе АБС пластика с добавлением углеродного волокна и Fe_3O_4

Использование разработанной методики измерения электрофизических характеристик образцов позволило выявить зависимости характеристик разрабатываемого композитного материала в зависимости от типа наполнителя и особенностей его размещения в диэлектрической матрице, в диапазоне частот. Подробный анализ существующих взаимосвязей позволил добиться стабильных электрофизических характеристик разработанного экранирующего материала, что позволяет использовать его в промышленных целях для обеспечения электромагнитной совместимости различных электрофизических установок.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Реализован программно-аппаратный комплекс для анализа электрофизических параметров твердых и сыпучих материалов в диапазоне частот от 8 до 12 ГГц с использованием существующего математического аппарата и стандартных линий передачи.

Применение существующих и стандартно применяющихся на производстве линий передачи, таких как волноводная линия, а также доступного математического аппарата делает возможным реализацию измерений по предложенной методике непосредственно на предприятиях потребителях или производителях диэлектрических материалов. Использование такого комплекса в процессе разработки новых материалов позволяет установить физические взаимосвязи между химическим составом и типом используемых наполнителей и получившимися электрофизическими параметрами изготовленного на их основе композитного материала.

2.Выполнены экспериментальные исследования электрофизических характеристик керамики на основе оксида бериллия. Измерены электрофизические параметры микро и наноразмерного порошка диоксида титана в полосе частот от 8 до 12 ГГц. Исследовано влияние дополнительной теромообработки нанопорошка диоксида титана на его комплексные диэлектрическую и магнитную проницаемости. Установлена взаимосвязь

между концентрацией микро и наноразмерного порошка диоксида титана на электрофизические параметры исследуемой керамики в диапазоне частот 8 ГГц – 12 ГГц.

С использованием разработанной установки отработана методика спекания керамики BeO с добавлением микро и нанопорошков TiO_2 в плане выбора оптимальной температуры спекания и необходимости последующего восстановления спеченных образцов керамики в атмосфере водорода.

Исследовано влияние дополнительной термообработки исследуемых образцов керамики на их электрофизические характеристики.

3. Исследованы электрофизические характеристики образцов LTCC керамики типа $Sr_{1-1.5x}Bi_{x-0.5x}MoO_4$. Установлена взаимосвязь между долей висмута в спеченной керамике и наличием резонансов на частотной характеристики электрофизических параметров исследуемого материала. Исследовано влияние температуры спекания на характеристики керамики типа $Sr_{1-1.5x}Bi_{x-0.5x}MoO_4$.

4. Разработан новый экранирующий материал на основе диэлектрической матрицы с добавлением углеродного волокна и магнетита. Отработан технологический процесс получения композита и определен оптимальный состав и массовая доля используемых наполнителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] T. Imai, M. Takeuchi, Y. Hoshina, H. Kojima, и N. Hayakawa, «Comparison of permittivity gradient in resin injected and simulated cone-shaped spacers», *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, т. 26, вып. 5, сс. 1678–1685, окт. 2019, doi: 10.1109/TDEI.2019.008240.

[2] M. G. Silveirinha и C. A. Fernandes, «Effective permittivity of a medium with stratified dielectric host and metallic inclusions», в *IEEE Antennas and Propagation Society Symposium, 2004.*, Monterey, CA, USA: IEEE, 2004, сс. 3777-3780 Vol.4. doi: 10.1109/APS.2004.1330169.

[3] К. М. Басков, «Численное исследование радиопрозрачных укрытий с ребром», *Журнал Радиоэлектроники*, вып. 12, 2015, Просмотрено: 18 апрель 2022 г. [Онлайн]. Доступно на: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25305029

[4] T. Ellam, «An update on the design and synthesis of compact absorber for EMC chamber applications», *Proc. IEEE Symp. Electromagn. Compat.*, 1994, doi: 10.1109/ISEMC.1994.385623.
[5] L. de C. Folgueras, M. A. Alves, и M. C. Rezende, «Development, characterization and optimization of dielectric radar absorbent materials as flexible sheets for use at X-band», в *2007 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference*, окт. 2007, сс. 488–491. doi: 10.1109/IMOC.2007.4404311.
[6] H. Q. Zheng, Q. Xu, и M. S. Tong, «A New Design for Two-layer Thin Wideband Radar Absorber», в *2019 Photonics Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - Fall)*, дек. 2019, сс. 1129–1132. doi: 10.1109/PIERS-Fall48861.2019.9021435.
[7] M. Wang, W. Yang, S. Yu, R. Sun, и W.-H. Liao, «Low loss CCTO@Fe3O4/epoxy composites with matched permeability and permittivity for high frequency applications», в *2015 16th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, авг. 2015, сс. 1203–1206. doi: 10.1109/ICEPT.2015.7236795.
[8] G. Jianzhang, H. Zhou, F. He, X. Chen, J. Chen, и L. Fang, «Structural evolution, low-firing characteristic and microwave dielectric properties of magnesium and sodium vanadate ceramic», 2015, doi: 10.1016/J.CERAMINT.2015.05.060.
[9] P. Yao, Y. Deng, и B. Li, «Effect of Vanadium Content on the Microwave Dielectric Properties of Sr2VxO7 ($1.80 \leq x \leq 2.05$) Ceramics», *J. Electron. Mater.*, 2020, doi: 10.1007/s11664-020-08360-y.
[10] K. J. Bois, L. F. Handjojo, A. D. Benally, K. Mubarak, и R. Zoughi, «Dielectric plug-loaded two-port transmission line measurement technique for dielectric property characterization of granular and liquid materials», *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, т. 48, вып. 6, сс. 1141–1148, дек. 1999, doi: 10.1109/19.816128.
[11] H. Ebara, T. Inoue, и O. Hashimoto, «Measurement method of complex permittivity and permeability for a powdered material using a waveguide in microwave band», 2006, doi: 10.1016/j.stam.2005.11.019.
[12] S. M. S. Hasan, M. Sundaram, Y. Kang, и M. K. Howlader, «Measurement of Dielectric Properties of Materials using Transmis sion/Reflection Method with Material filled Transmission Line», в *2005 IEEE Instrumentationand Measurement Technology Conference Proceedings*, май 2005, сс. 72–77. doi: 10.1109/IMTC.2005.1604071.
[13] M. S. B. A. Karim, Y. Konishi, K. Harafuji, и T. Kitazawa, «Determination of Complex Permittivities of Layered Materials Using Waveguide Measurements», *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2014, doi: 10.1109/TMTT.2014.2334554.
[14] M. Parkhomenko, D. Kalenov, I. Eremin, N. A. Fedoseev, V. M. Kolesnikova, и Y. L. Barinov, «Waveguide method for measuring electromagnetic

parameters of materials in the microwave range and estimating the measurement error.», *J. Radio Electron.*, 2018, doi: 10.30898/1684-1719.2018.9.6.

[15] C. Wu, Y. Liu, S. Lu, S. Gruszczynski, и Y. Yashchyshyn, «Convenient Waveguide Technique for Determining Permittivity and Permeability of Materials», *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2020, doi: 10.1109/TMTT.2020.3009995.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

[A1] Malkin A.I. и Knyazev N.S., «Dielectric permittivity and permeability measurement system», в *CEUR Workshop Proceedings*, CEUR Workshop Proceedings, 2017, сс. 45–51.

[A2] A. Malkin, V. Chechetkin, A. Korotkov, и N. Knyazev, «Estimation of Uncertainty of Permittivity Measurement with Transmission Line Method in the Wide Frequency Range», в *2021 29th Telecommunications Forum (TELFOR)*, Belgrade, Serbia: IEEE, ноя. 2021, сс. 1–3. doi: 10.1109/TELFOR52709.2021.9653335

[A5] A. Malkin, A. Korotkov, N. Knyazev, V. Kijko, и A. Pavlov, «Approbation of the Measurement Method to Determining the Permittivity of Micro- and Nanopowders of Titanium Dioxide», в *2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*, окт. 2019, сс. 0217–0220. doi: 10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958025.

[A7] Z. A. Mikhaylovskaya, E. S. Buyanova, A. I. Malkin, A. N. Korotkov, N. S. Knyazev, и S. A. Petrova, «Morphological and microwave dielectric properties of Bi:SrMoO4 ceramic», *J. Solid State Chem.*, т. 316, с. 123555, дек. 2022, doi: 10.1016/j.jssc.2022.123555.

[A9] Kornilitsina E.V. et al. Enhanced electrodynamic properties acrylonitrile butadiene styrene composites containing short-chopped recycled carbon fibers and magnetite // Diamond and Related Materials. 2023. Vol. 135. P. 109814.

СТАТЬИ В ЖУРНАЛАХ, ВХОДЯЩИХ В ПЕРЕЧЕНЬ ВАК

[A3] N. A. Drokin, V. S. Kiiko, A. V. Pavlov, и A. I. Malkin, «BT-30 Ceramic Electrophysical Properties», *Refract. Ind. Ceram.*, т. 61, вып. 3, сс. 341–348, сен. 2020, doi: 10.1007/s11148-020-00484-2.

[A4] A. Lepeshev, A. Pavlov, N. A. Drokin, A. Malkin, V. Kiiko, и N. Knyazev, «Features of the Preparation and Study of Electrophysical Characteristics (BeO+TiO2)-Ceramics by Impedance Spectroscopy», Refract. Ind. Ceram., 2019, doi: 10.1007/s11148-019-00359-1.

[A6] Н. А. Дрокин, В. С. Кийко, А. И. Малкин, и А. В. Павлов, «Электрофизические свойства спеченной при повышенных температурах керамики BeO + 30 мас.% TiO2», *Новые огнеупоры*, т. 6, сс. 21–27, 2022

[A8] Mikhaylovskaya Z.A., Buyanova E.S., Petrova S.A., Pankrushina E.A., Malkin A.I., Korotkov A.N., Knyazev N.S., «Structure and microwave dielectric properties of Bi- and Ge-doped calcium molybdate», Chimica Techno Acta. 2022. Т. 9. № 4. С. 20229411.09