

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по науке и инновациям

НИТУ «МИСиС»



Филонов М.Р.

04 \_\_\_\_\_ 2021 г.

## **ОТЗЫВ**

ведущей организации

на диссертационную работу Политико Алексея Алексеевича

**«Экспериментальные исследования электрофизических свойств гетерогенных поглощающих структур и покрытий в СВЧ диапазоне»**, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки

### **Общая характеристика работы**

Диссертация А.А. Политико посвящена экспериментальным исследованиям электрофизических свойств гетерогенных материалов и покрытий в СВЧ диапазоне. Предметом проведенных автором исследований являлись, во-первых, фундаментальные параметры, характеризующие взаимодействие электромагнитной волны с материалом, такие как диэлектрическая и магнитная проницаемости, а во-вторых, коэффициенты отражения и прохождения СВЧ излучения – свойства, присущие самому веществу, и характерные для конкретного образца. Взаимодействие электромагнитного излучения с гетерогенными структурами, в том числе композитами, является одной из

важных проблем современной физики. При этом в последнее время композиционные материалы и структуры широко применяются в СВЧ технике в качестве поглощающих материалов, обеспечивающих требуемые характеристики радиотехнических устройств, к примеру, для создания защитных укрытий антенн и радиоэлектронной аппаратуры от воздействия мощного электромагнитного излучения; для повышения радиотехнических характеристик антенных систем; для маскировки объектов и др. Экспериментальное исследование процессов взаимодействия электромагнитного излучения с композиционными материалами и структурно неоднородными средами предполагает разработку методов измерений, а также специальных измерительных комплексов, реализующих эти методы. В этой связи разработка методов экспериментального исследования композиционных материалов и структурно неоднородных сред представляет собой важную и актуальную проблему. Проведенные автором диссертации исследования позволили разработать как новые методы измерений электрофизических параметров материалов, так и выполнить экспериментальные исследования электрофизических свойств материалов, направленные на разработку новых радиопрозрачных и радиопоглощающих материалов и покрытий, которые обладают требуемыми СВЧ характеристиками.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, трех приложений, а также списков сокращений и условных обозначений, литературы, рисунков и таблиц. Полный текст диссертации изложен на 168 страницах, список цитируемой литературы содержит 110 наименований.

Во введении дано краткое обоснование направлений исследований, формулируются цели и задачи исследований, основные положения, выносимые на защиту, с учетом актуальности работы, ее научной новизны и практической ценности, а также представлен список основных публикаций автора по теме диссертации и отмечен его личный вклад.

В первой главе выполнен обзор основных современных экспериментальных методов измерений электрофизических параметров материалов и покрытий в СВЧ диапазоне.

Вторая глава посвящена методу измерений электрофизических параметров образцов материалов в свободном пространстве в ближней зоне линзовых рупорных антенн. Значительное внимание уделено измерительному комплексу (стенду), реализованному на базе этого метода. Представлен математический алгоритм коррекции результатов измерений S-параметров, который применяется при определении комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей малоразмерных образцов композитных материалов. Предложен метод измерения температурных зависимостей коэффициента отражения образцов радиопоглощающих покрытий, расположенных на металлической подложке.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований электрофизических свойств радиопрозрачных и радиопоглощающих гетерогенных структур, представляющих собой композиционные материалы. Исследованы частотные зависимости диэлектрической и магнитной проницаемостей композитов на основе карбонильного железа, которое в настоящее время является одним из наиболее эффективно применяемых магнитных наполнителей при создании поглощающих покрытий в СВЧ диапазоне. Также в данной главе рассмотрены некоторые аспекты, связанные с экспериментальными исследованиями радиопрозрачных материалов и радиопоглощающих покрытий, подверженных различного рода внешним воздействиям, в том числе экстремально высоким температурам.

Четвертая глава посвящена практическому использованию результатов измерений электрофизических параметров материалов для разработки радиопоглощающих материалов. Разработан новый радиопоглощающий материал для применения в металлическом радиозащитном колпаке, используемом для диагностики антенной системы, с целью снижения влияния

колпака на радиотехнические характеристики антенны. Разработан новый радиопоглощающий материал для изготовления волноводных согласованных нагрузок, обладающих высоким радиотехническим качеством.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы и выводы.

В приложениях содержится дополнительная поясняющая информация о реализации результатов диссертационной работы, а также приведены данные о патенте на полезную модель «Экранирующий кожух для устройства проверки работоспособности радиостанции с штыревой антенной», полученном диссертантом с соавторами.

**Актуальность темы диссертации.** Тема диссертации является актуальной для исследований электрофизических свойств гетерогенных структур и покрытий ввиду широкого развития технологий производства и применения новых композиционных материалов во многих наукоемких сферах. Так для разработчиков радиотехнических устройств важно иметь возможность использовать в их конструкции материалы с точно заданными электрофизическими свойствами. Кроме этого, при производстве таких устройств часто необходимо контролировать электрофизические свойства материалов. В диссертационной работе рассматриваются новые и совершенствуются уже известные методы измерений электрофизических параметров материалов, что делает работу А.А. Политико актуальной. Кроме разработки методов измерений в работе исследуются электрофизические свойства различных, в том числе новых, радиопоглощающих и радиопрозрачных композиционных материалов, которые могут быть использованы или уже используются в радиотехнике, авиастроении, ракетно-космической промышленности.

**Научная новизна работы.** Отметим некоторые из представленных в диссертации результатов, которые имеют научную новизну и являются теоретически и практически значимыми.

Значительный интерес представляет разработанный автором алгоритм коррекции результатов измерений S-параметров образцов материалов, размеры которых составляют менее одной длины электромагнитной волны, при измерении их в свободном пространстве. Указанный способ позволяет существенно снизить погрешности измерений диэлектрической и магнитной проницаемостей образцов материалов в низкочастотном диапазоне, что имеет большое значение при разработке радиопоглощающих покрытий.

Важным в плане развития методов исследований СВЧ свойств поглощающих материалов и покрытий при различных температурах является разработанный автором метод измерения температурных зависимостей коэффициента отражения. Этот метод в отличие от уже существующих позволяет проводить исследования при воздействии не только положительных, но и отрицательных температур.

Следует отметить полученные автором экспериментальные данные по диэлектрической и магнитной проницаемости композитов на основе различных типов карбонильного железа в широком частотном диапазоне от 0,2 до 40 ГГц. Подчеркнем, что в научной литературе ранее представлены результаты исследований электрофизических параметров композитов в более узком диапазоне с верхним пределом по частоте 18 ГГц.

**Практическая значимость работы.** Отличительной особенностью диссертационной работы является то, что практически все полученные результаты нашли конкретные практические приложения. Так результаты экспериментальных исследований электрофизических свойств радиопрозрачных теплозащитных материалов при воздействии экстремально температур позволили разработать конструкцию радиопрозрачного обтекателя для

высокоскоростного летательного аппарата. Разработанный автором метод измерения температурных зависимостей коэффициента отражения радиопоглощающих покрытий применяется при проведении испытаний покрытий на стойкость к воздействию климатических факторов. Разработанные радиопоглощающие материалы применяются улучшения радиотехнических характеристик антенных систем и обеспечения электромагнитной совместимости. Результаты работы могут использоваться для организаций радиоэлектронной, приборостроительной, авиационной, ракетно-космической промышленности, в частности, АО «ЦКБА», АО «ВНИИ «Градиент», АО «ГРПЗ», АО «НИИ «Вектор», АО «НПП «Исток», ОКБ Сухого, ПАО «Туполев», ПАО «Ил», ОКБ им. Ляульки, АО «ИРЗ», АО «Композит», АО «Корпорация «МИТ» и др.

**Апробация работы.** Материалы диссертации довольно полно представлены на ведущих российских и международных конференциях. Соответствующий список конференций, представленный в автореферате диссертации, содержит 18 наименований.

**Публикации.** По теме диссертационной работы автор имеет 9 статей в рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях, рекомендованных ВАК.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

#### **Замечания и пожелания.**

1. Вывод 2 о новизне метода измерений температурных зависимостей КО образцов РПП сформулирован довольно странно. С точки зрения физических процессов в целом разделение температур на плюсовые и отрицательные не имеет оснований. С точки зрения аппаратных разработок, необходимо интегрировать нагревательный и

- охлаждающий элементы. Представляется, что решение этой технической задачи составляет новизну метода, но это слабо отражено.
2. Положения, выносимые на защиту, вообще говоря, не сформулированы в форме «положений». Например, Положение 2 не дает никакой информации о новом методе измерений, а только о частотном и температурном интервалах его применимости.
  3. Для демонстрации точности измерений в главе 2 проводилось сравнение частотных зависимостей КП и КО для образца кварцевого стекла, который характеризуется только одним параметром- реальной частью диэлектрической проницаемости. Поведение для образцов с поглощением и магнитными свойствами может быть значительно более сложным.
  4. Довольно странно звучит утверждение, что «в научной литературе практически нет информации, касающейся исследований СВЧ свойств РПМ и РПП, подверженных воздействию не только повышенных, но и пониженных (отрицательных) температур». Композиционный материал состоит из различных наполнителей и матрицы, температурные зависимости диэлектрических и магнитных параметров которых безусловно исследованы. Например, в случае наполнителя с Fe магнитная проницаемость не должна сильно меняться при изменении температуры от -70 до +180, так как температура Кюри значительно выше. Если имеется ввиду изменение механических свойств материалов (сжатие/растяжение за счет разницы тепловых коэффициентов), то это нужно четко обозначать и обсуждать. Представляется, что смещение пиков на Рисунках 2.15 и 2.16 как раз связаны с изменением геометрии.
  5. В главе 2 излишне подробно описывается итерационная процедура, используемая при корректировке. С другой стороны, это по сути

является методом простых итераций решения нелинейных уравнений, который, как известно, не всегда сходится. И как тогда проводить коррекцию?

6. Утверждается, что «Влияние скинирования приводит к тому, что максимум магнитных потерь располагается не на частоте ФМР, а на частотах, где минимальный размер включений (для сферических частиц в нашем случае – это диаметр частицы) равен толщине скин-слоя». Следует заметить, что для поликристаллических частиц с доменной структурой частота ФМР также размыта, поскольку зависит от формы кристаллитов и доменных стенок (из-за размагничивающего фактора).
7. При обсуждении возможного обменного резонанса у частиц карбанильного железа необходимо учитывать, что максимальные частоты ферромагнитного резонанса за счет размагничивающего фактора могут достигать  $f_{res} = 2\gamma M_s \sim 40 \text{ GHz}$ !

#### Технические замечания

- Стр. 44. Смысл следующей фразы неясен

«При проведении измерений исследуемые образцы на диафрагму, расположенную в ближней зоне рупорных антенн».

- В главе 1, которая посвящена методикам измерения, S параметры вводятся обычным образом для двухпортовых измерений. То есть это матрица 2x2 ( $S_{11}, S_{12}, S_{22}, S_{21}$ ). Между тем в главе 2 сразу, без всяких пояснений, появляются параметры  $S_{33}$  и  $S_{43}$  для четырехпортовых измерений. В Главе 1 следовало бы обсудить особенности калибровок и измерений в четырехпортовой схеме. В формулах (2.2)-(2.5) снова используются только  $S_{11}, S_{21}$ . Следовало бы или



пояснить особенности четырехпортовых измерений, или перейти к ним, когда это действительно необходимо.

- В главе 2 исследовались образцы тонких пленок композитов на основе полимерных связующих, наполненных мелкодисперсными магнитомягкими порошками КЖ с различной степенью наполнения. Между тем, в таблице 2.3 дается перечень образцов с указанием их толщин, а не наполнения. Но толщина не влияет на материальные параметры! Поэтому непонятно, как отличались образцы с точки зрения материальных параметров.

- В диссертации нет четкого деления на подразделы. То есть они имеются, но у них нет номера.

- Очень много аббревиатуры, при этом понять, какие материалы использовались - затруднительно. Обсуждается температурная зависимость, а материалы определены как «композитные покрытия резонансного типа РАН-6 и РАН-53, нанесенные на плоские металлические пластины размерами 200×200 мм». В разделе используемых сокращений их нет. Ну и как обсуждать выводы диссертанта?

- Формула 3.1 относится только к поликристаллическим ферритам в высокочастотной области.


Отмеченные выше недостатки не снижают общей высокой оценки работы. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор Политико Алексей Алексеевич заслуживает присвоения ему ученой степени

кандидата технических наук по специальности 01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки.

Диссертационная работа представлена и обсуждена на заседании кафедры Технологии материалов электроники ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», 12.03.2021, протокол №6.

Отзыв составили:

Панина Лариса Владимировна,  
+7 495 638-44-51, [drlpanina@gmail.com](mailto:drlpanina@gmail.com),  
доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры Технологии материалов электроники



ФГАОУ ВО Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСиС»  
119049, Российская Федерация, г. Москва,  
Ленинский пр-кт, 4.  
Телефон: +7 (495) 955-00-32.  
e-mail: [kancela@misis.ru](mailto:kancela@misis.ru)