

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твердого тела

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ПРОНИЦАЕМОСТИ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ МАТРИЦ
С ПОЛЯРНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ**

Автореферат бакалаврской работы

по направлению 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника»
факультета nano- и биомедицинских технологий

Крестининой Ирины Александровны

Научные руководители

профессор, д.ф.-.м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

доцент, к.ф.-.м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

А.П. Фролов

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-.м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

Д.А. Усанов

инициалы, фамилия

Саратов 2018

Введение. На сегодняшний день разработан ряд методов определения электрофизических параметров веществ в сверхвысокочастотном диапазоне. Эти методы важны для разработки современных устройств, создания новых технологий электронных систем и компонентов, а также для производства новых веществ с уникальными свойствами.

Преимуществом бесконтактных методов, к которым относятся СВЧ-методы, является возможность измерения образца без разрушения материала и изменения его свойств. Сверхвысокочастотные методы являются оптимальными при использовании материалов и структур в полупроводниковых приборах СВЧ-электроники, так как исследования с использованием зондовых методов могут дать недостаточную информацию для проектирования СВЧ-устройств с заданными характеристиками.

Благодаря сверхвысокочастотным методам измерения могут быть измерены: удельная проводимость и диэлектрическая проницаемость материала, время жизни, подвижность, эффективная масса носителей заряда, скорость поверхностной рекомбинации и другие параметры.

Таким образом, бесконтактные методы измерения электропроводности приобретают все большее значение в связи с прогрессом в технологии материалов и разработкой новых материалов, предназначенных для использования в электронной промышленности.

В представленной работе исследованы параметры структур композитов на основе матриц с наполнителями в виде полярных диэлектриков.

Для определения электрофизических параметров диэлектрических материалов и композитов на их основе используются результаты измерений спектров отражения и пропускания взаимодействующего с ними сверхвысокочастотного излучения.

Композиты на основе матриц с наполнителями в виде полярных диэлектриков находят широкое применение в СВЧ-технике в качестве элементов, используемых как для поглощения электромагнитного излучения,

так и в качестве структур, защищающих электронные компоненты от воздействия внешних электромагнитных полей.

Контроль параметров композитов, содержащих материалы с полярными диэлектриками, характеристики которых существенным образом зависят от диапазона частот, позволяет их использовать в заданных диапазонах частот с максимальной эффективностью.

Цель бакалаврской работы: определение комплексной диэлектрической проницаемости композитов на основе матриц с полярными наполнителями с использованием частотных зависимостей коэффициентов отражения и прохождения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона.

Дипломная работа занимает 32 страницы и имеет 21 рисунок.

Во введение рассматривается актуальность работы, устанавливается цель и выдвигаются задачи для достижения поставленной цели. Первый раздел представляет собой анализ современного состояния исследований в СВЧ-диапазоне композитных материалов с полярными диэлектриками. Он включает в себя такие подразделы, как диэлектрическая проницаемость полярных диэлектриков в СВЧ-диапазоне и диэлектрическая проницаемость композитов на СВЧ.

Во втором разделе работы представлено компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик композитов с полярными диэлектриками в СВЧ-диапазоне. Оно включает в себя такие подразделы, как математическая модель слоистых структур на основе композитных материалов с полярными диэлектриками в СВЧ-диапазоне (состоящая из математических моделей композитных материалов с полярными диэлектриками в СВЧ-диапазоне и математической модели слоистой структуры на основе композитных материалов с полярными диэлектриками) и результатов компьютерного моделирования амплитудно-частотных характеристик слоистой структуры на основе композитных материалов с полярными диэлектриками.

В третьем разделе работы представлено экспериментальное

исследование амплитудно-частотных характеристик слоистой структуры на основе композитных материалов с полярными диэлектриками.

Основное содержание работы.

Диэлектрическая проницаемость композитов на СВЧ

Композитный материал, также называемый композит, - твердый материал, который приводит к тому, что два или более веществ, каждый со своими характеристиками, объединяются, чтобы создать новое вещество, свойства которого превосходят свойства исходных компонентов в конкретном приложении. Термин «композит» более конкретно относится к структурному материалу, в который встроен волокнистый материал

Свойства композитов достигаются путем встраивания волокон одного вещества в матрицу хозяина другого. Большинство обычных композитов построены тонкими слоями, каждый из которых усилен длинными волокнами, уложенными в одном направлении.

Структурный компонент композита может состоять из волокон, изготовленных из стекла или углеродистого графита. Материал матрицы может быть эпоксидной смолой или другой высокотемпературной пластмассой, алюминием или некоторым другим металлом. Стеклопластик является самым известным композитом и нашел широкое применение как в бытовых, так и в промышленных изделиях. Композиты имеют наиболее широко применяются в аэрокосмической промышленности, где их жесткость, легкость и теплостойкость делают их материалами выбора в укреплении капотов двигателей, крыльев, дверей и закрылков самолетов. Композиционные материалы также используются в ракетках и другом спортивном оборудовании, в режущих инструментах и в некоторых частях автомобильных двигателей.

Изучение таких гетерогенных систем является актуальной задачей для многих областей науки. Одной из главных целей исследований, основным объектом которых становятся композиты, является восстановление функциональной зависимости эффективной диэлектрической проницаемости

системы от диэлектрических параметров, геометрических параметров и объемной концентрации отдельных компонентов.

В настоящее время предлагается большое количество формул для модели гетерогенных систем как совокупности неоднородностей с определённой диэлектрической проницаемостью (ε_1) и суммарной объемной концентрацией (c_1), вкрапленных в среду с другой диэлектрической проницаемостью (ε_0), наиболее удачными из которых считается формула Максвелла-Гарнетта (1) и формула Бруггемана (2):

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon + 2\varepsilon_0} = c_1 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_0}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_0} \quad (1)$$

$$(1 - c_1) \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon}{\varepsilon_0 + 2\varepsilon} + c_1 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon} = 0 \quad (2)$$

Математическая модель слоистых структур на основе композитных материалов с полярными диэлектриками в СВЧ-диапазоне

Свойства композитных структур могут существенно отличаться от свойств матрицы и от свойств частиц, составляющих композит. Если какие-либо макроскопические части этой структуры, размер которых превышает характерный размер ее компонентов и расстояние между ними, проявляют одинаковые свойства, то можно использовать эффективную модель среды для описания ее свойств. В рамках модели гетеросистема рассматривается как однородная среда с собственными макроскопическими характеристиками. Характеристики такой гетеросистемы часто обозначают эффективными, отмечая, что на микроскопическом уровне среду нельзя считать как однородную. Если характерные размеры компонентов гетеросистемы меньше, чем длина оптической волны, оптические свойства системы характеризуют эффективную диэлектрическую проницаемостью ε_{eff} . Физически наблюдаемые величины будут выражаться через данную эффективную характеристику.

В качестве примера основных модельных приближений в теории эффективной среды часто указываются два типа гетеросистем. Первый тип - матричные гетеросистемы (в них можно выделить элементы-включения, окруженные со всех сторон некой средой-матрицей). Второй тип - статистическая гетеросистема (в них нельзя выделить матрицу и включения, объемные доли всех компонентов близки и сами компоненты статистически равноправны). Модели Максвелла-Гарнетта и Бруггемана чаще всего используются для определения эффективной диэлектрической проницаемости гетерогенных сред

Для нахождения частотной зависимости коэффициентов отражения R и пропускания T электромагнитной волны при её нормальном падении на структуру, состоящую из нескольких слоёв, и заполняющую весь волновод по поперечному сечению, имеющую плоскости слоев, которые перпендикулярны направлению распространения излучения, использована матрица передачи волн между областями с различным значением постоянной распространения электромагнитной волны γ_j и γ_{j+1} .

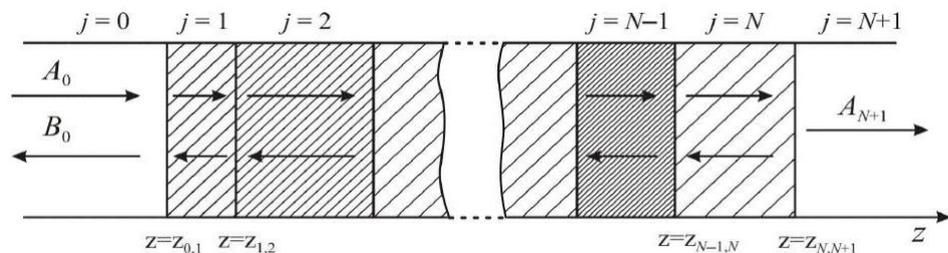


Рисунок 1 Слоистая структура, состоящая из N слоев

Записывая коэффициенты отражения $R=B_0/A_0$ и прохождения $D=A_{N+1}/A_0$ через элементы матрицы передачи \mathbf{T}_N , получим:

$$R = -\frac{\mathbf{T}_N[2,1]}{\mathbf{T}_N[2,2]}, \quad (3)$$

$$D = \frac{\mathbf{T}_N[1,1] \cdot \mathbf{T}_N[2,2] - \mathbf{T}_N[1,2] \cdot \mathbf{T}_N[2,1]}{\mathbf{T}_N[2,2]}. \quad (4)$$

Найденные соотношения могут использоваться для нахождения значений коэффициентов отражения и пропускания при взаимодействии электромагнитной волны с многослойными структурами.

Результаты компьютерного моделирования амплитудно-частотных характеристик слоистых структур на основе композитных материалов с полярными диэлектриками

При помощи программного обеспечения Mathcad было проведено компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик исследуемых слоистых структур. Количество слоёв: три и семь.

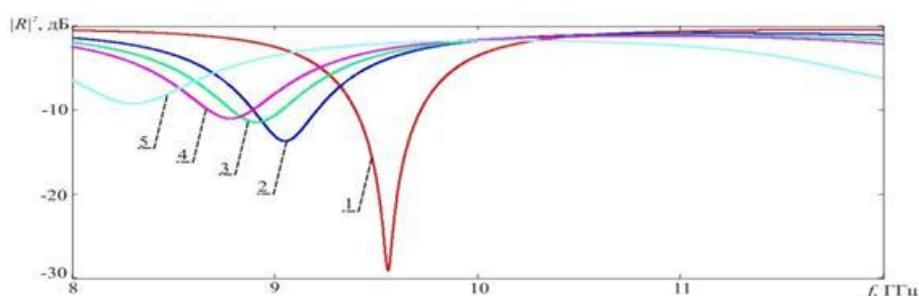


Рисунок 2 Рассчитанные амплитудно-частотные зависимости коэффициента отражения исследуемой трёхслойной структуры при определённом значении объемной доли воды, где 1- 0; 2- 3,2%; 3- 3,7%; 4-4,5%; 5- 4,7%

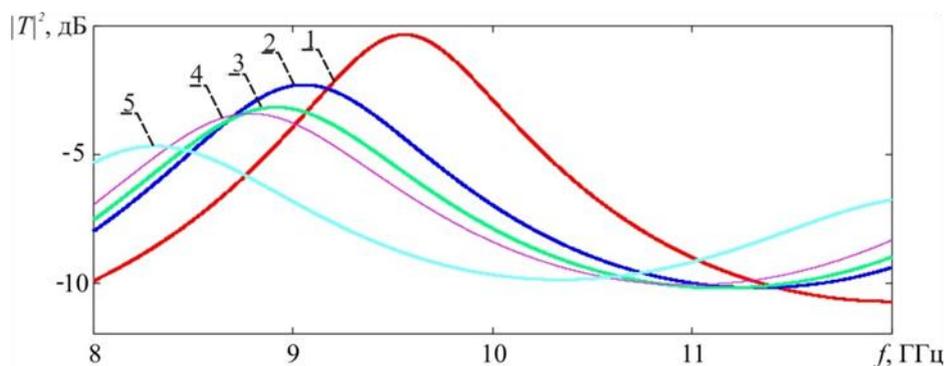


Рисунок 3. Рассчитанные амплитудно-частотные зависимости для коэффициента прохождения исследуемой трёхслойной структуры при определённом значении объемной доли воды, где 1- 0; 2- 3,2%; 3- 3,7%; 4- 4,5%; 5- 4,7%

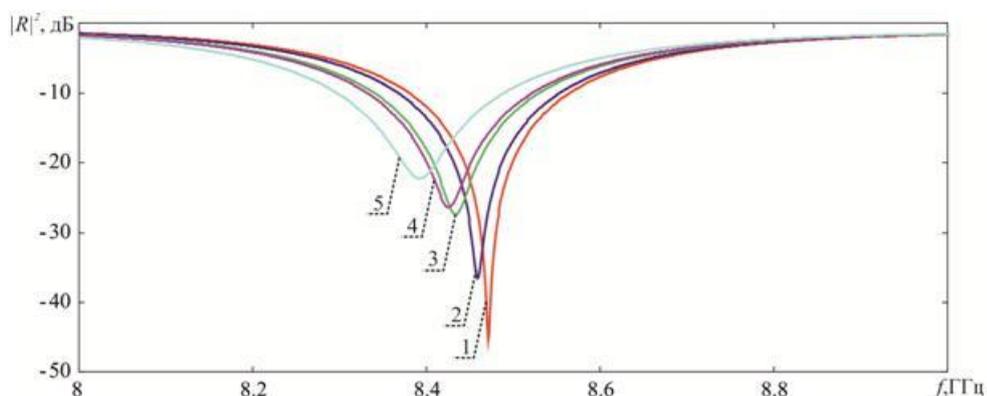


Рисунок 4 Рассчитанные амплитудно-частотные зависимости для коэффициента отражения исследуемой семислойной структуры при определённом значении объемной доли воды, где 1- 0; 2- 0,8%; 3- 0,9%; 4- 2,4%; 5- 2,8%

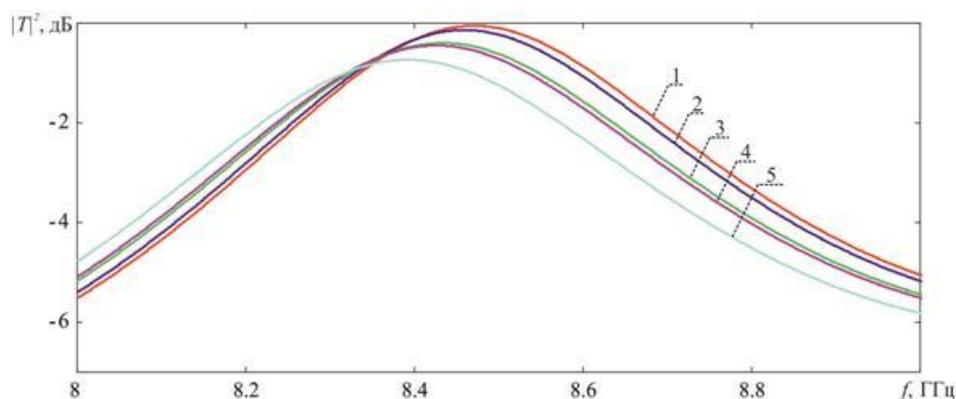


Рисунок 5 Рассчитанные амплитудно-частотные зависимости для коэффициента прохождения исследуемой семислойной структуры при определённом значении воды, где 1- 0; 2- 0,8%; 3- 0,9%; 4-2,4%; 5- 2,8%

По представленным зависимостям можно сделать вывод, что чем больше степень наполненности композита полярной жидкостью (водой), тем сильнее минимум коэффициента отражения (максимум коэффициента пропускания) смещается в сторону низких частот.

Экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик слоистой структуры на основе композитных материалов с полярными диэлектриками.

Измерения частотных зависимостей коэффициентов отражения и

пропускания проводились с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA-L Network Analyzer N5230A, соединённого с помощью коаксиальных кабелей с волноводом.

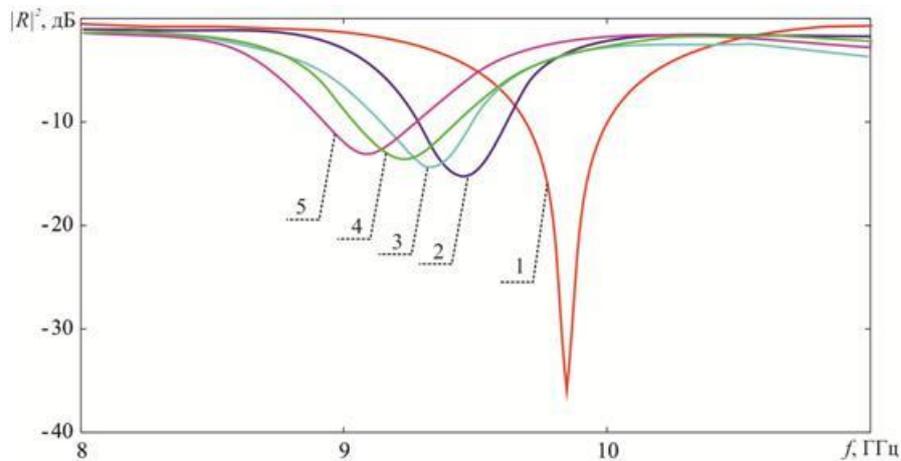


Рисунок 6 Экспериментальные зависимости амплитудно-частотных характеристик коэффициента отражения для трёхслойной структуры с разной степенью заполнения «матрицы» полярной жидкостью (водой), где **1** - 0; **2** - 3,2%; **3** - 3,7%, **4** -4,5%; **5** - 4,7%

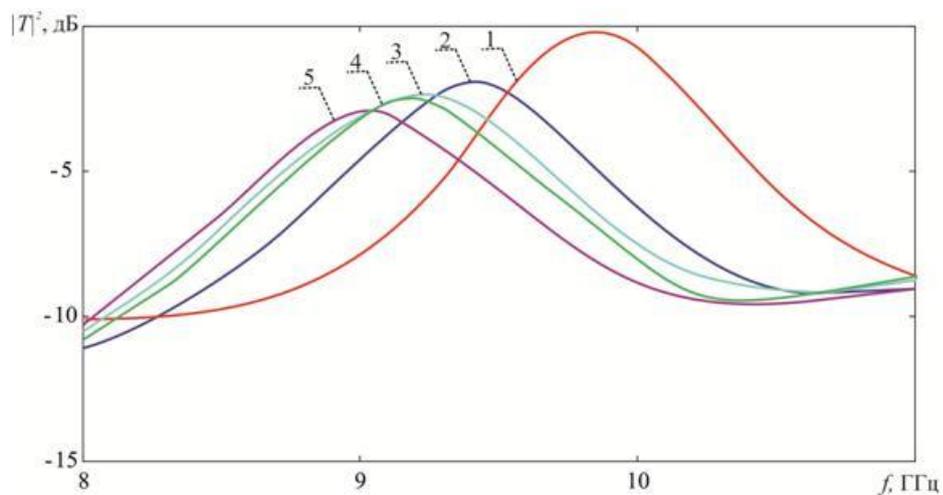


Рисунок 7 Экспериментальные зависимости амплитудно-частотных характеристик коэффициента прохождения трёхслойной структуры с разной степенью заполнения «матрицы» полярной жидкостью (водой), где: **1** - 0; **2** - 3,2%; **3** - 3,7%, **4** -4,5%; **5** - 4,7%

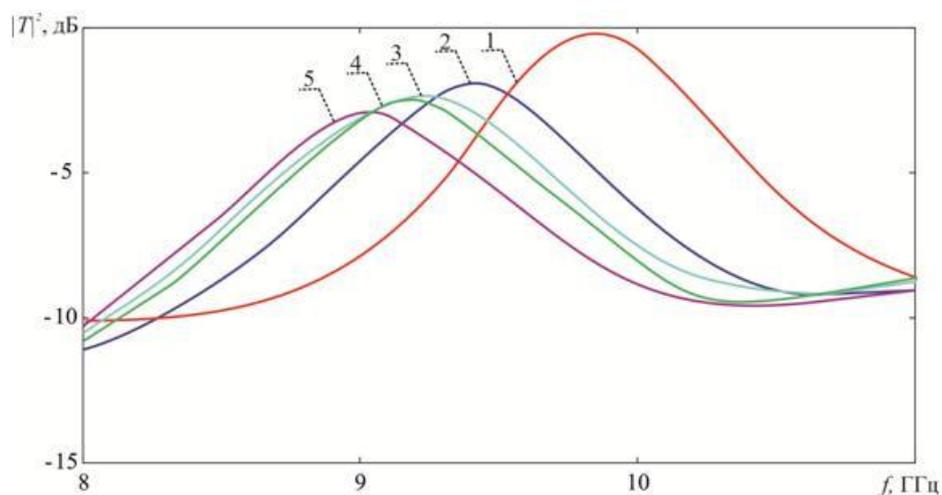


Рисунок 8 Экспериментальные зависимости амплитудно-частотных характеристик коэффициента отражения семислойной структуры для разной степени заполнения «матрицы» полярной жидкостью (водой), **1**- 0; **2** - 0,8%; **3** - 0,9%; **4** - 2,4%; **5** - 2,8%

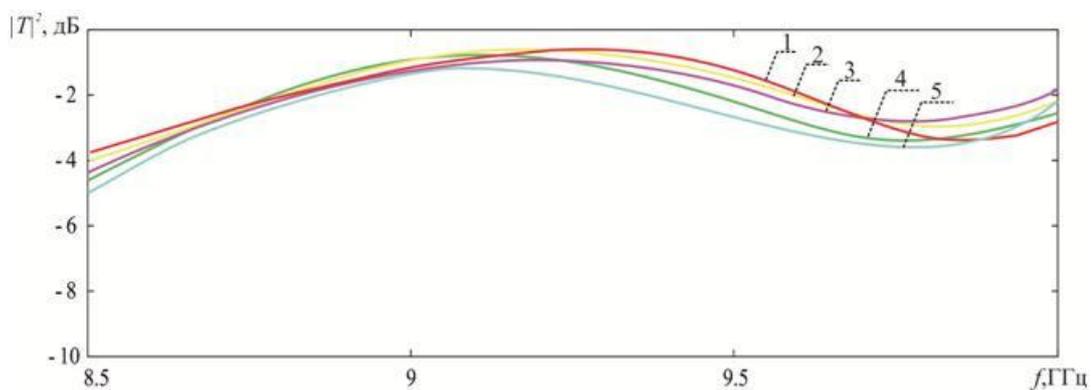


Рисунок 9 Экспериментальные зависимости амплитудно-частотных характеристик коэффициента прохождения семислойной структуры для разной степени заполнения «матрицы» полярной жидкостью (водой), где **1**- 0; **2** - 0,8%; **3** - 0,9%; **4** - 2,4%; **5** - 2,8%

Из измерений следует, что чем больше степень заполнения композита полярной жидкостью (водой), тем сильнее минимум коэффициента отражения (максимум коэффициента пропускания) смещается в сторону низких частот, что и подтверждают теоретические расчёты.

Экспериментальные и расчетные АЧХ семислойной структуры для разных значений эффективной диэлектрической проницаемости композита, соответствующих разному значению объёмной доли наполнителя для трёхслойной и семислойной структур приведены на рисунках 18 и 19.

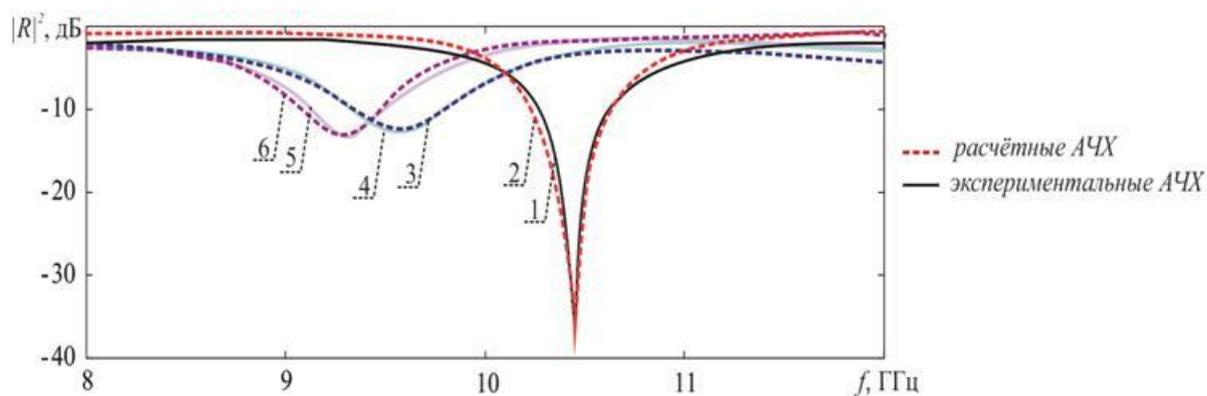


Рисунок 10 Экспериментальные и расчетные АЧХ трёхслойной структуры для разных значений эффективной диэлектрической проницаемости композита, соответствующих разному значению объёмной доли наполнителя, где **1-2** – без наполнителя (воды), **3-6** – с постепенным увеличением объёмной доли наполнителя

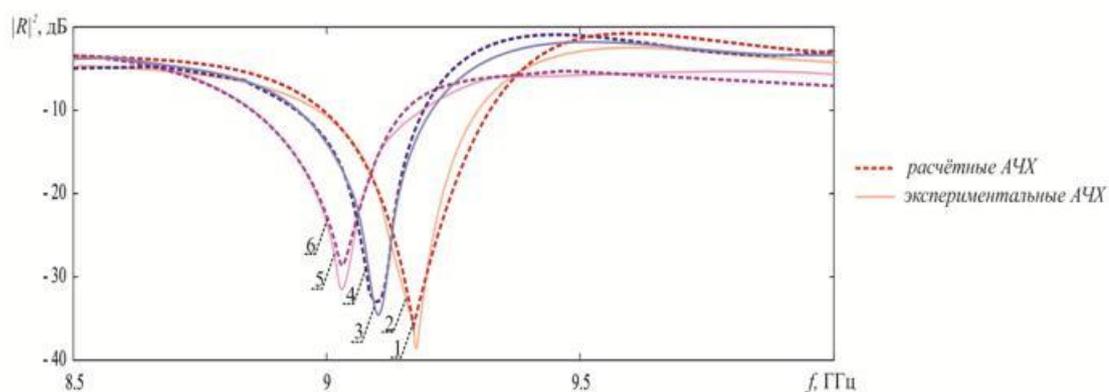


Рисунок 11 Экспериментальные и расчетные АЧХ семислойной структуры для разных значений эффективной диэлектрической проницаемости композита, соответствующих разному значению объёмной доли наполнителя, где **1-2** – без наполнителя (воды), **3-6** – с постепенным увеличением объёмной доли наполнителя

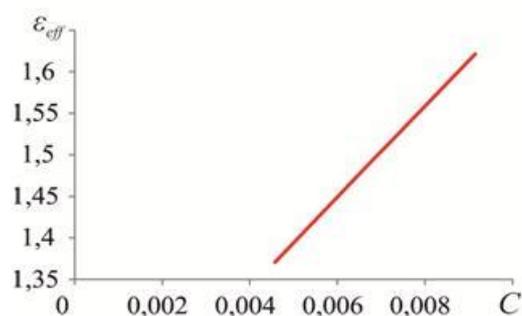


Рисунок 12 Зависимость действительной части эффективной диэлектрической проницаемости от объемной доли C наполнителя для трёхслойной структуры

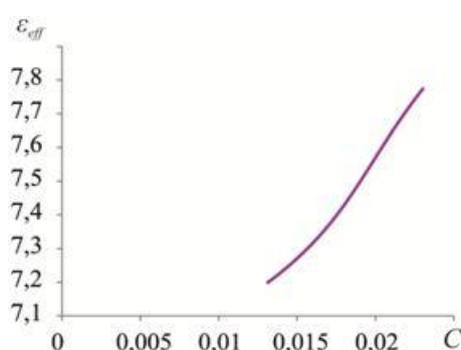


Рисунок 13 Зависимость действительной части эффективной диэлектрической проницаемости от объемной доли C наполнителя для семислойной структуры

По полученным результатам можно сделать вывод о том, что при увеличении объемной доли полярной жидкости наблюдается увеличение действительной и мнимой частей эффективной диэлектрической проницаемости.

Заключение

В ходе выполнения бакалаврской работы получены следующие результаты:

- выполнен анализ современного состояния исследований в сверхвысокочастотном диапазоне композитных материалов с наполнителями в виде полярных диэлектриков;
- с помощью метода матриц передачи выполнено компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик

композитов с наполнителями в виде полярных диэлектриков в сверхвысокочастотном диапазоне;

- показано влияние объемной доли наполнителя в виде полярного диэлектрика на амплитудно-частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения трехслойной и семислойной структур, выполненных на основе композитного материала;
- выполнено экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик трёхслойной и семислойных структур, выполненных на основе композитного материала;
- отработана методика определения комплексной диэлектрической проницаемости композита и процентного содержания включений в виде полярных диэлектриков по частотным зависимостям коэффициентов отражения.