

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

**КОМПЛЕКСНАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ
КОМПОЗИТОВ С ПОЛЯРНЫМИ ДИЭЛЕКТРИКАМИ**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса

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

Темирбулатовой Алии Руслановны

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 2017

Введение. В настоящее время разработано большое число методов для определения электрофизических параметров веществ в сверхвысокочастотном диапазоне. Данные методы важны для производства современных приборов, реализации новейших технологий создания электронных систем и компонентов и получения новых веществ с уникальными свойствами.

С помощью СВЧ-методов измерения могут быть определены удельная проводимость и диэлектрическая проницаемость материала, время жизни, подвижность, эффективная масса носителей заряда, скорость поверхностной рекомбинации и другие параметры.

СВЧ-методы измерения параметров относятся к бесконтактным методам, и поэтому с их помощью можно проводить измерения, не разрушая при этом материал и не изменяя его свойств в процессе измерений [1].

В данной работе будут исследованы параметры структур на основе композитов с полярными диэлектриками. Для определения электрофизических параметров диэлектрических материалов и композитов на их основе можно использовать результаты измерений спектров отражения и пропускания взаимодействующего с ними сверхвысокочастотного излучения при условии, что известно их теоретическое описание.

Целью бакалаврской работы являлось исследование амплитудно-частотных характеристик структур на основе композитов с полярными диэлектриками в СВЧ-диапазоне и определение комплексной диэлектрической проницаемости композитов с полярными диэлектриками.

Для достижения этой цели:

- с использованием метода матриц передачи, выполнено компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик композитов с полярными диэлектриками в СВЧ-диапазоне;
- проведено экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик слоистой структуры на основе

композитных материалов с полярными диэлектриками.

Дипломная работа занимает 31 страницу и имеет 16 рисунков.

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

Композиты – объемное монолитное искусственное сочетание разнородных по форме и свойствам двух и более материалов, с четкой границей раздела, использующее преимущества каждого из компонентов и проявляющее новые свойства. Если один из компонентов композита

непрерывен во всем объеме, а другой является прерывистым, разьединенным, то первый компонент называют матрицей, а второй - арматурой.

В настоящее время для модели гетерогенной системы, как совокупности неоднородностей с некоторой диэлектрической проницаемостью (ε_1) и общей объемной концентрацией (c_1), вкрапленных в среду с другой диэлектрической проницаемостью (ε_0) предложено большое количество формул, наиболее удачными из которых считаются формула Максвелла-Гарнетта [13]

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

и формула Бруггемана [14]

$$(1 - c_1) \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon}{\varepsilon_0 + 2\varepsilon} + c_1 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon} = 0 \quad (3)$$

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

Свойства композитных структур могут значительно отличаться как от свойств матрицы, так и от свойств частиц, входящих в состав композита. Если любые макроскопические части такой структуры, размеры которых намного превышают характерные размеры ее компонентов и расстояния между этими компонентами, проявляют одинаковые свойства, то для описания ее свойств оказывается возможным использовать так называемую модель эффективной среды. В рамках этой модели гетеросистема рассматривается как однородная среда, обладающая собственными макроскопическими характеристиками. Наиболее часто для определения эффективной диэлектрической проницаемости гетерогенных сред используются модели Максвелла - Гарнетта и Бруггемана.

Для расчета частотной зависимости коэффициентов отражения R и пропускания T электромагнитной волны при её нормальном падении на

многослойную структуру, полностью заполняющую волновод по поперечному сечению и имеющую плоскости слоев, перпендикулярные направлению распространения излучения, можно использовать матрицу передачи волны [2]. Получаем соотношения для нахождения значений коэффициентов отражения и пропускания при взаимодействии электромагнитной волны с многослойными структурами

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

$$D = \frac{\mathbf{T}_N[1,1] \cdot \mathbf{T}_N[2,2] - \mathbf{T}_N[1,2] \cdot \mathbf{T}_N[2,1]}{\mathbf{T}_N[2,2]}. \quad (5)$$

где

$$\mathbf{T}_N = \begin{pmatrix} \mathbf{T}_N[1,1] & \mathbf{T}_N[1,2] \\ \mathbf{T}_N[2,1] & \mathbf{T}_N[2,2] \end{pmatrix} = \prod_{j=N}^0 \mathbf{T}_{j,(j+1)} = \mathbf{T}(z_{N,N+1}) \cdot \mathbf{T}(z_{N-1,N}) \dots \mathbf{T}(z_{1,2}) \cdot \mathbf{T}(z_{0,1}) \quad (6)$$

матрица передачи слоистой структуры, состоящей из N слоев.

Результаты компьютерного моделирования амплитудно-частотных характеристик слоистой структуры на основе композитных материалов с полярными диэлектриками

При помощи программного обеспечения Mathcad с использованием метода матриц передачи было проведено компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик исследуемой слоистой структуры (Первый и последний слои выполнены из поликора, центральный слой представляет собой «матрицу» из пористого материала).

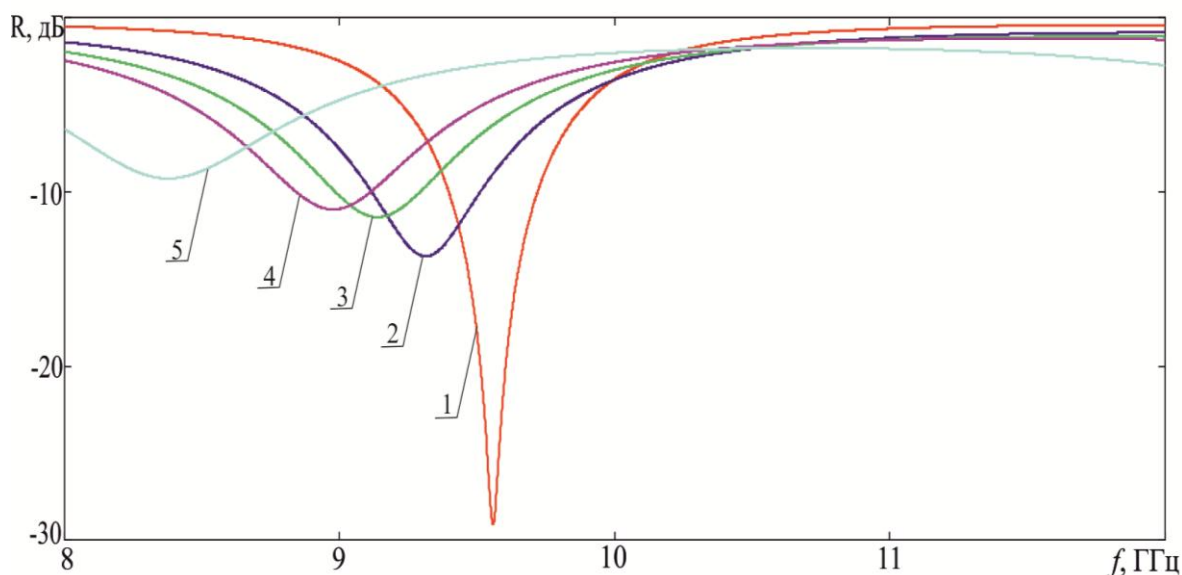


Рисунок 1 Теоретически рассчитанные амплитудно-частотные зависимости для коэффициента отражения исследуемой структуры при фиксированных значениях объемной доли «наполнителя» C : 1- 0; 2- 0,007; 3- 0,009; 4-0,014; 5- 0,026

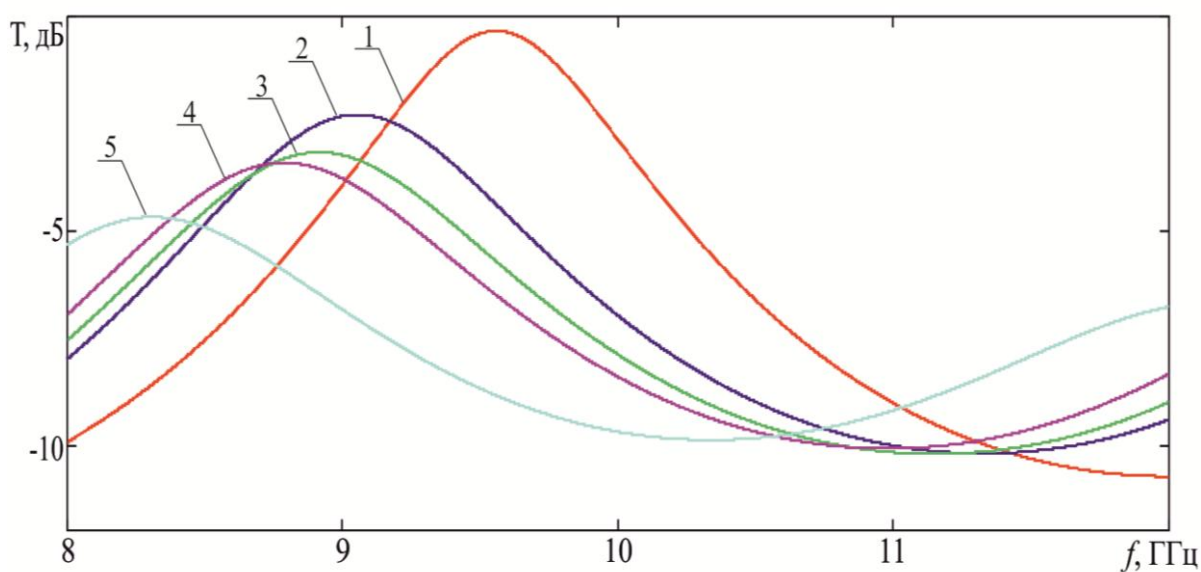


Рисунок 2 Теоретически рассчитанные амплитудно-частотные зависимости для коэффициента пропускания исследуемой структуры при фиксированных значениях объемной доли «наполнителя» C : 1- 0; 2- 0,007; 3- 0,009; 4-0,014; 5- 0,026

По полученным зависимостям можно сделать вывод о том, что с увеличением объемной доли полярной жидкости минимум коэффициента отражения (максимум коэффициента пропускания) смещается в сторону низких частот. Величина частотного сдвига составила 1,18 ГГц. Изменения

значений коэффициентов отражения/пропускания в минимуме/максимуме резонансной кривой составили 19,83 дБ и 4,34 дБ соответственно.

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

Для проведения экспериментальных исследований была изготовлена структура на основе композитного материала. Данная структура представляла собой поликоровые пластины, разделенные между собой композитным материалом. Измерения частотных зависимостей коэффициентов отражения и пропускания проводились с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA-L Network Analyzer N5230A.

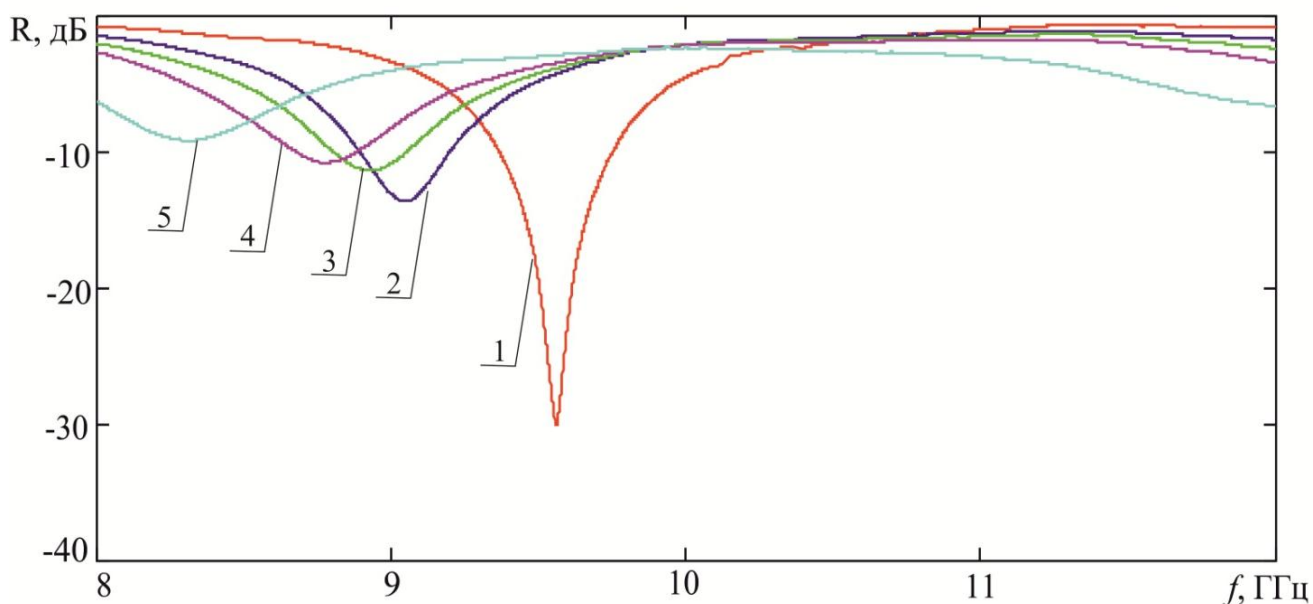


Рисунок 3 Экспериментально полученные амплитудно-частотные зависимости для коэффициента отражения исследуемой структуры при фиксированных значениях объемной доли «наполнителя» C : 1- 0; 2- 0,007; 3- 0,009; 4-0,014; 5- 0,026

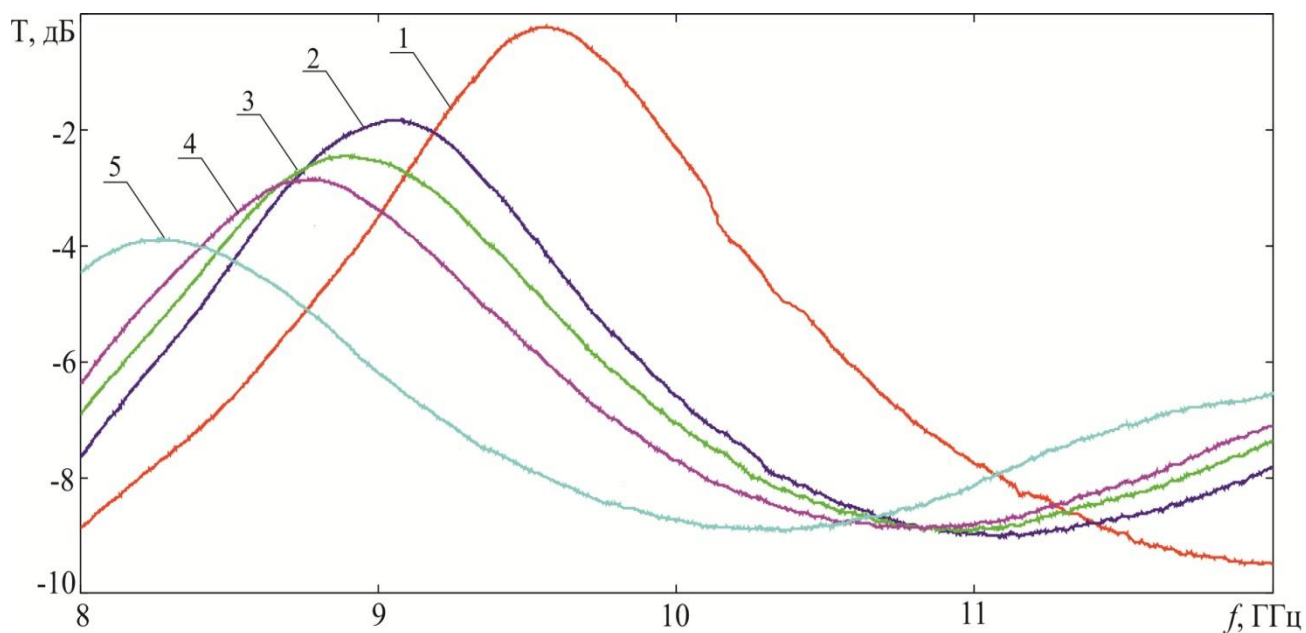


Рисунок 4 Экспериментально полученные амплитудно-частотные зависимости для коэффициента пропускания исследуемой структуры при фиксированных значениях объемной доли «наполнителя» C : 1- 0; 2- 0,007; 3- 0,009; 4-0,014; 5- 0,026

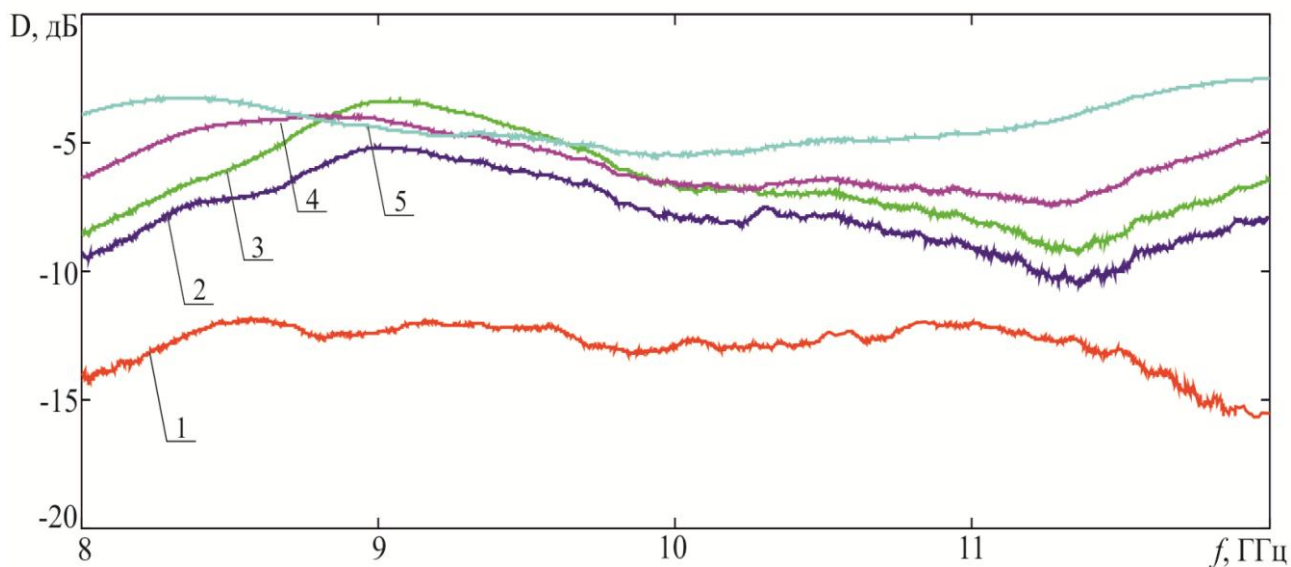


Рисунок 5 Экспериментально полученные амплитудно-частотные зависимости для коэффициента поглощения исследуемой структуры при фиксированных значениях объемной доли «наполнителя» C : 1- 0; 2- 0,007; 3- 0,009; 4-0,014; 5- 0,026

По полученным зависимостям можно сделать вывод о том, что с увеличением объемной доли полярной жидкости минимум коэффициента отражения (максимум коэффициента пропускания) смещается в сторону

низких частот, что подтверждает теоретические расчеты. Величина частотного сдвига составила 1,25 ГГц. Изменения значений коэффициентов отражения/пропускания в минимуме/максимуме резонансной кривой составили 20,85 дБ и 3,67 дБ соответственно. Значение коэффициента поглощения увеличивается с увеличением объемной доли полярной жидкости и слабо зависит от частоты, что видно из рисунка 5.

По спектрам пропускания и отражения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона определена эффективная комплексная диэлектрическая проницаемость композитов с матрицей на основе поролона с различной степенью заполнения жидким полярным диэлектриком (рисунок 6).

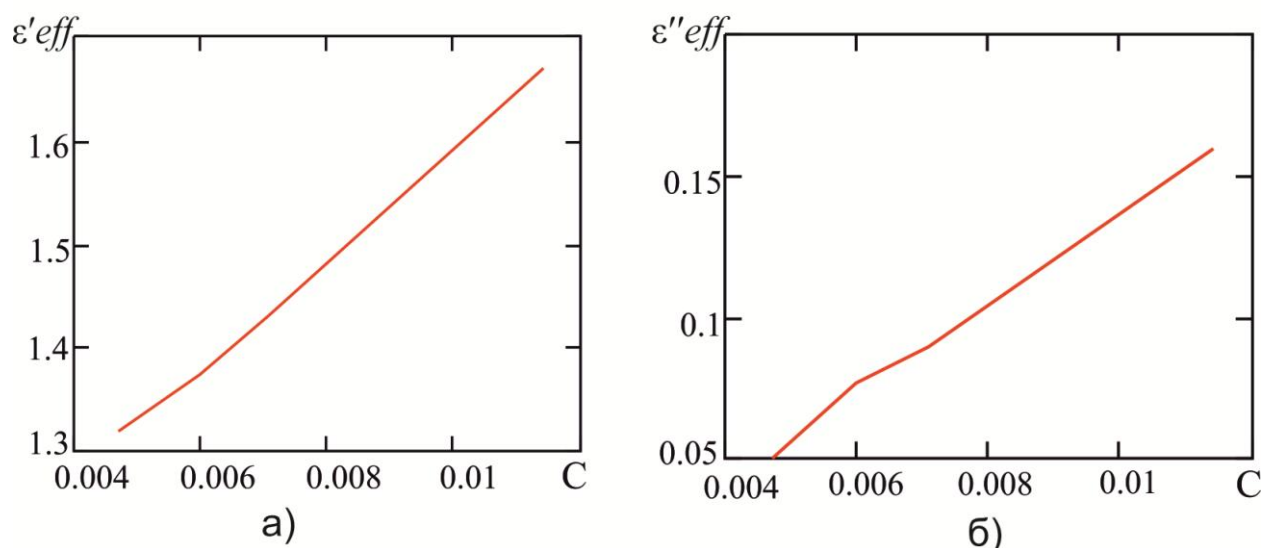


Рисунок 6 Зависимости действительной (а) и мнимой (б) части эффективной диэлектрической проницаемости от объемной доли полярной жидкости, содержащейся в композите.

По полученным зависимостям можно сделать вывод о том, что с увеличением объемной доли полярной жидкости наблюдается рост как действительной части эффективной диэлектрической проницаемости, так и мнимой.

Заключение. Таким образом, в ходе выполнения бакалаврской работы были получены следующие результаты:

- проведен анализ современного состояния исследований в СВЧ-

- диапазоне композитных материалов с полярными диэлектриками;
- с использованием метода матриц передачи выполнено компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик композитов с полярными диэлектриками в СВЧ-диапазоне;
 - определено влияние объемной доли наполнителя в виде полярного диэлектрика на частотные зависимости коэффициентов отражения, пропускания и поглощения трехслойной структуры с композитным материалом;
 - проведено экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик слоистой структуры на основе композитных материалов с полярными диэлектриками;
 - отработана методика определения комплексной диэлектрической проницаемости композита и процентного содержания включений в виде полярных диэлектриков по частотным зависимостям коэффициентов отражения.

Список использованных источников

1. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Феклистов В.Б., Вениг С.Б. Лабораторный практикум «Измерение параметров полупроводников, микро- и наноструктур на СВЧ» (учебное пособие) //Саратов: Электронное издание Сарат. Ун-та, 2012. – 91 с.
2. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Куликов М.Ю., Пономарев Д.В. Микрополосковые фотонные кристаллы и их использование для измерения параметров жидкостей //Журнал технической физики. Т. 80, №8, 2010.
3. Усанов Д.А. СВЧ-методы измерения параметров полупроводников, Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1985.

4. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Пономарев Д. В. Фотонные кристаллы СВЧ-диапазона и их использование для измерения параметров материалов. Саратов, 2014.
5. Орешкин П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков. Учеб. Пособие для специальности «Полупроводники и диэлектрики» вузов. //М.: «Высш. Школа», 1977. – 448 с.
6. Харвей А.Ф. Техника сверхвысоких частот: в 2-х т, М, Изд-во Советское радио, 1965,Т.1.
7. Усанов Д.А., Никитов С.А. Скрипаль А.В., Куликов М.Ю., Пономарев Д.В. Измерение параметров твердых и жидких диэлектриков на сверхвысоких частотах с использованием микрополосковых фотонных структур // Радиотехника и электроника. Т.57, №2, 2012.
8. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 3. Электричество. М.:Наука, 1983. – 703 с.
9. Ахадов Я.Ю. Диэлектрические свойства чистых жидкостей. М.: Изд-во стандартов, 1972.– 412 с.
- 10.Каджар Ч.О., Касимов Р.М., Касимова С.Р. Измерения диэлектрических коэффициентов слабопоглощающих жидкостей в диапазоне сверхвысоких частот // Радиотехнические измерения, 2002, Вып 5.
11. Каджар Ч.О., Касимов Э.Р., Насибов Г.Н. Методика измерения диэлектрических коэффициентов сильнопоглощающих полярных жидкостей в диапазоне сверхвысоких частот //Радиотехнические измерения, 2002, Вып 7.
12. Кербер М.Л. Композиционные материалы. // Соросовский Образовательный Журнал. №5, 1999.
13. Garnett J. C. Maxwell. Colours in metal glasses and in metallic films // Phyllos. Trans. R. Soc. London. Ser. A. – 1904. – V. 203. – P. 385— 420.
14. Bruggeman D.A.G. BerechnungverschiedenerphysikalischerKonstanten von eterogenenSubstanzen, I. Dielektrizit ätskonstanten und 235 Leitfähigkeiten

- der MischkörperausotropenSubstanzen // Ann. Phys. – 1935. – Lpz. 24. – P. 636—679.
15. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С. Измерения толщины нанометровых слоев металла и электропроводности полупроводника в структурах металл–полупроводник по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения // ЖТФ. 2006. Т. 76, вып. 5. С. 112–117.
 16. Пат. РФ. № 2349904 МПК G01N 22/00 (2006.01). Способ измерения электрофизических параметров структуры «нанометровая металлическая пленка – полупроводниковая или диэлектрическая подложка.
 17. Занин В. И., Усанов Д. А., Феклистов В. Б. Определение электрофизических параметров полупроводника волноводным резонансным методом // Межвузовский сборник научных статей "Электродинамика слоисто-неоднородных структур СВЧ". Самара: Изд-во Самар. ун-та, 1995.
 18. Губкин А.Н. Физика диэлектриков. // М.:Высшая школа, 1971. – 272 с.
 19. Фрелих Г. Теория диэлектриков. Диэлектрическая проницаемость и диэлектрические потери. //М.: Изд-во иностранной литературы, 1960. - 252 с.
 20. Беляев Б.А., Дрокин Н.А., Шабанов В.Ф., Шепов В.Н. Исследование СВЧ диэлектрической проницаемости жидких кристаллов в электрических и магнитных полях. //Журнал технической физики. 1998, Т. 68, № 1.
 21. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ: в 2-х т. М.:Высш. шк., 1970. Т.1.