

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра физики твёрдого тела

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ**

студента 4 курса 4051 группы

направления 11.03.04 «ЭЛЕКТРОНИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА»,  
профиль «МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА, ДИАГНОСТИКА НАНО- И  
БИОМЕДИЦИНСКИХ СИСТЕМ»

код и наименование направления

института физики

наименование факультета, института

Александрова Артёма Алексеевича

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель  
д.ф.-м.н., профессор  
должность, уч. степень, уч. звание

  
подпись, дата

A.B. Скрипаль  
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой:  
д.ф.-м.н., профессор  
должность, уч. степень, уч. звание

  
подпись, дата

A.B. Скрипаль  
инициалы, фамилия

Саратов 2023 г.

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одной из наиболее интенсивно развивающихся областей науки является направление по созданию и исследованию свойств фотонных кристаллов – искусственных периодических структур с периодом, сравнимым с длиной волны распространяющегося в них электромагнитного излучения. Фотонные кристаллы и обычные, привычные нам, кристаллы, такие как кристаллический кремний имеют некоторое сходство - наличие разрешенных и запрещенных зон для распространения электромагнитного излучения. Заинтересованность в этих структурах заключается в возможности создания уникальных свойств, добавляя в качестве нарушения периодичности слои композитных материалов.

Дальнейшее развитие фотонных кристаллов имеет прямое отношение к будущему новейшей электроники. В настоящее время проводится изучение их свойств, а также создание устройств на основе фотонных кристаллов. Теоретические предсказания эффектов в фотонных кристаллах уже практически реализуются. Фотонные кристаллы могут быть использованы в различных областях, таких как лазеры, в которых можно получить малосигнальную лазерную генерацию, волноводы, которые являются компактными и обладают малыми оптическими потерями, а также для создания сред с отрицательными показателями преломления, что позволит фокусировать свет в точку размером меньше длины волны.

Для создания фотонного кристалла можно использовать композитные материалы в качестве слоев. Свойства таких композитов могут значительно влиять на параметры нарушений и можно управлять положением "окон прозрачности" путем изменения объемной доли включений. "Окно прозрачности" - это диапазон длин волн оптического излучения, в котором происходит меньшее затухание излучения в среде по сравнению с другими диапазонами.

Каждый материал и среда обладают свойствами взаимодействия с электромагнитным излучением, такими как отражение, пропускание или поглощение излучения. Эти свойства, как правило, содержат комплексные величины,

где одно из них преобладает.

Фотонные кристаллы обладают особыми свойствами благодаря резонансному взаимодействию электромагнитных волн и периодической структуры. Это позволяет использовать их для создания новых устройств с управляемыми параметрами и для разработки высокочувствительных методов измерения различных параметров материалов. Благодаря сверхвысокочастотным методам измерения можно определить многие параметры, такие как проводимость, проницаемость, время жизни, подвижность, масса носителей заряда и другие. Это позволяет проводить множество неразрушающих измерений на одном образце, используя только одну установку.

Интерес к исследованию электрофизических свойств композитных материалов в сверхвысокочастотном диапазоне связан с потребностью создания новых материалов с уникальными свойствами, которые не достижимы для традиционных однородных материалов и необходимостью решения насущных вопросов радиофизики, твердотельной, микро - и наноэлектроники.

Целью бакалаврской работы являлось исследование особенностей амплитудно-частотных характеристик СВЧ фотонных кристаллов, содержащих эластомер с ферромагнитными включениями.

Для реализации данной цели, были поставлены следующие задачи:

1. Провести критический анализ способов применения фотонных кристаллов для измерения параметров материалов и рассмотреть теоретическую модель взаимодействия СВЧ-излучения с композитными материалами
2. Провести компьютерное моделирование АЧХ фотонных кристаллов в СВЧ диапазоне при разных структурах нарушения периодичности;
3. Экспериментально исследовать АЧХ фотонных кристаллов, содержащих эластомер с различной долей воздушного включения для разных параметров нарушения.

**Результаты сравнения компьютерного моделирования и экспериментальных данных исследования СВЧ фотонных кристаллов с нарушением периодичности с ферромагнитными эластомерами, имеющий разные степени воздушного включения, находящемся в слое нарушения на разных расстояниях от 9-ого слоя кристалла.**

Матрица передачи слоистой структуры, состоящей из N слоёв (рисунок 1):

$$T_N = \begin{pmatrix} T_N[1,1] & T_N[1,2] \\ T_N[2,1] & T_N[2,2] \end{pmatrix} = \prod_{j=N}^0 T(z_{N,N+1}) * T(z_{N-1,N}) \dots T(z_{1,2}) * T(z_{0,1}) \quad (1)$$

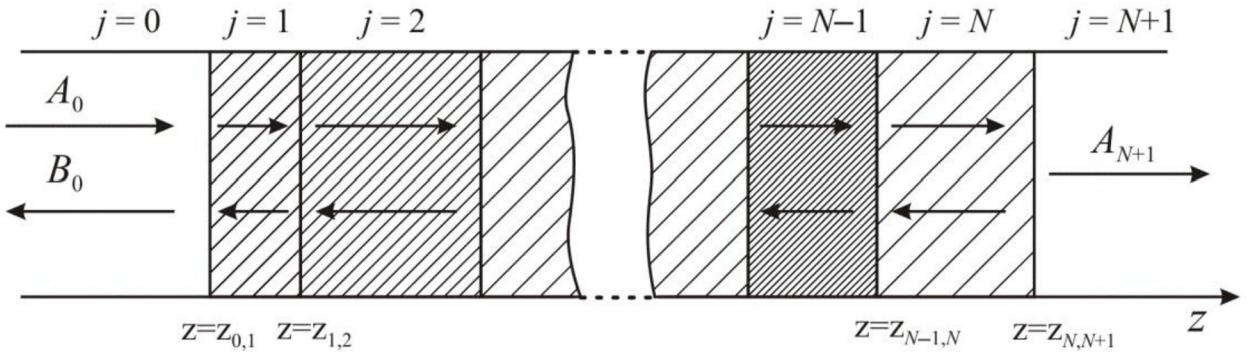


Рисунок 1 – Структура, состоящая из N слоев

Коэффициенты отражения  $R = \frac{B_0}{D_0}$  и прохождения  $D = \frac{A_{N+1}}{A_0}$  электромагнитной волны, взаимодействующей со слоистой структурой могут быть найдены из выражения (1) следующим образом:

$$R = -\frac{T_N[2,1]}{T_N[2,2]} \quad (2)$$

$$D = \frac{T_N[1,1]*T_N[2,2]-T_N[1,2]*T_N[2,1]}{T_N[2,2]} \quad (3)$$

Диалектические свойства композитных материалов могут быть охарактеризованы величиной эффективной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{ef}$ , определяемой величинами диэлектрических проницаемостей матрицы  $\epsilon_1$  (в нашем случае – поликор) и наполнителя  $\epsilon_2$  (в нашем случае – фторопласт), и объёмной долей включений. По соотношению Максвелла–Гарнетта  $\epsilon_{ef}$  вычисляется следующим образом:

$$\epsilon_{ef} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 (2x_1 + 1) + 2\epsilon_2^2 (1-x_1)}{\epsilon_1 + 2\epsilon_2 - x_1(\epsilon_1 - \epsilon_2)} \quad (4)$$

Для построения зависимости найдём величины постоянных распространения волны в пустом волноводе  $-\gamma_0$  и в заполненном  $-\gamma$ .

Будем считать, что в волноводе распространяется только волна основного типа  $H_{10}$ .

Для постоянной распространения волны в прямоугольном металлическом волноводе справедливо соотношение:

$$\gamma_{mn}^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - \omega^2 * \epsilon_{ef} * \epsilon_0 * \mu' * \mu_0, \quad (5)$$

где  $\omega = 2 * \pi * f$

Постоянная распространения волны в пустом волноводе:

$$\gamma_0^2 = \left(\frac{\pi}{a}\right)^2 - \omega^2 * \epsilon_0 * \mu_0 \quad (6)$$

Компьютерное моделирование проводилось в программном пакете Mathcad при следующих параметрах:

- 11-ти слойный кристалл с нарушением в центральном слое, в который помещается исследуемый образец. Длина нарушенного слоя 14.5 мм;
- Диэлектрическая проницаемость сплошного эластомера и эластомера с воздушными включениями соответственно равны 20.66 и 15.217. Толщина образца – 0.6 мм. Расстояния от 9-ого слоя кристалла, на которых исследовался образец: плотную, 3.13 мм, 7.25 мм, 11,25 мм, 14,5 мм;
- Диэлектрическая проницаемость поликора – 9.6, фторопласта – 2.

На рисунках 2 и 3 представлены фото эластомера без отверстий и с 15-ю отверстиями диаметром 2 мм.



Рисунок 2 – Фото исследуемого сплошного ферромагнитного эластомера

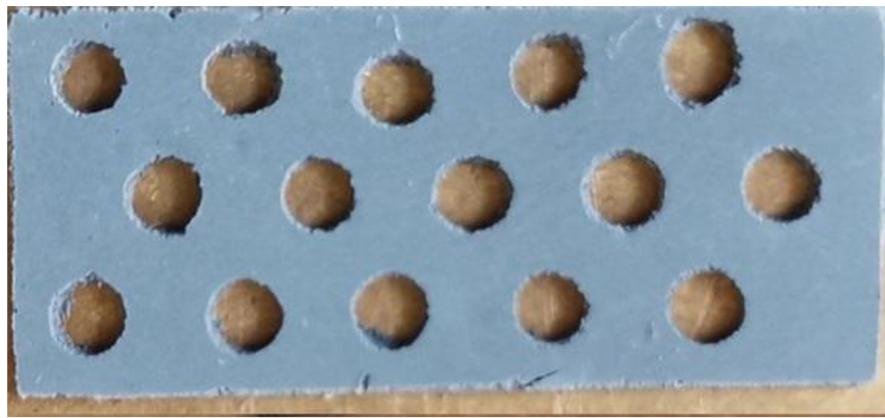


Рисунок 3 – Фото образца ферромагнитного эластомера с 15-тью отверстиями диаметром 2мм

На рисунках 4-6 представлены результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований коэффициентов отражения и прохождения электромагнитной волны СВЧ фотонного со сплошным эластомером и с эластомером, содержащим воздушные включения на разных расстояниях от 9-ого слоя.

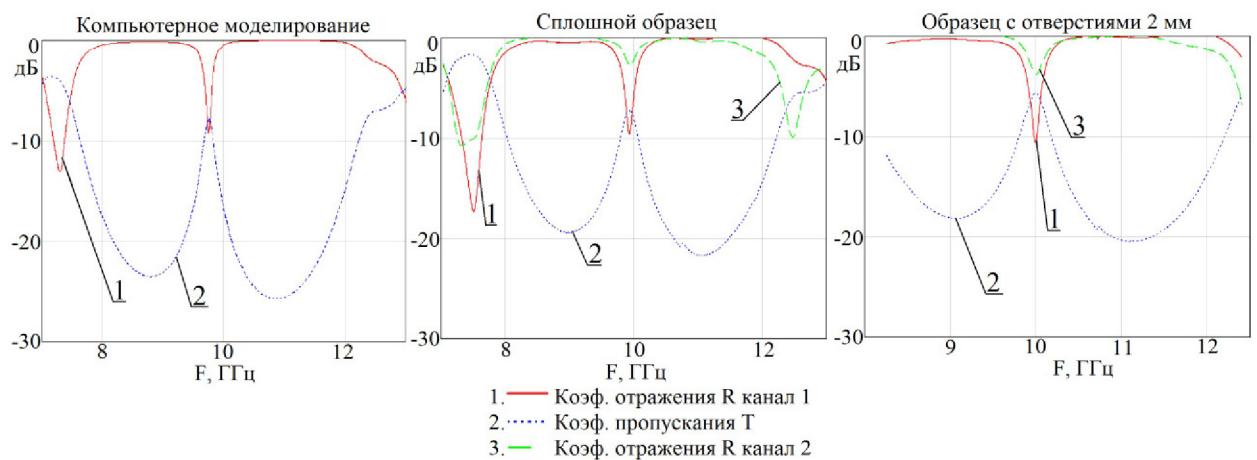


Рисунок 4– Сравнение модели с экспериментальными АЧХ фотонного кристалла с эластомером, находящимся вплотную к 9-ому слою

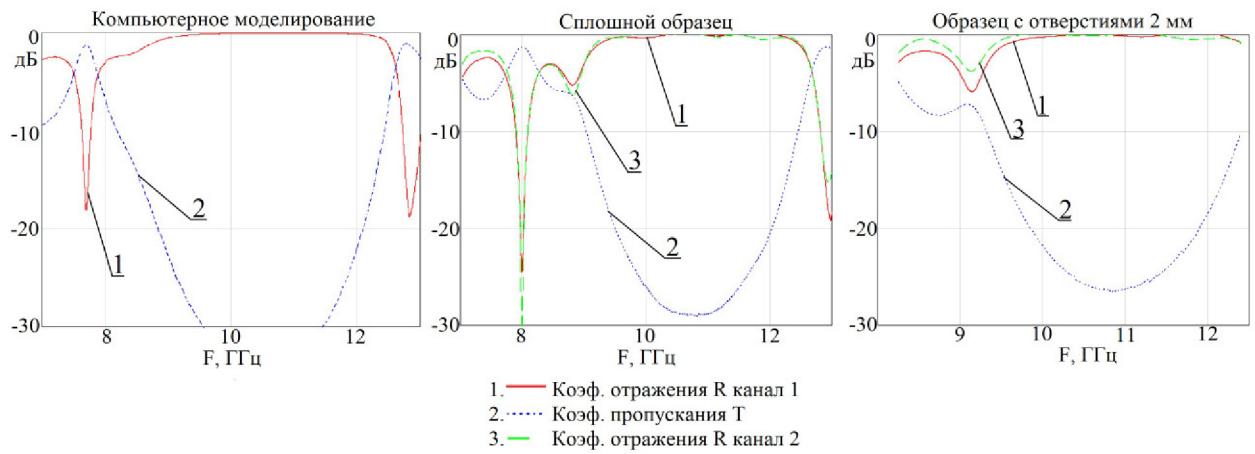


Рисунок 5 – Сравнение модели с экспериментальными АЧХ фотонного кристалла с эластомером, находящемся посередине слоя нарушени

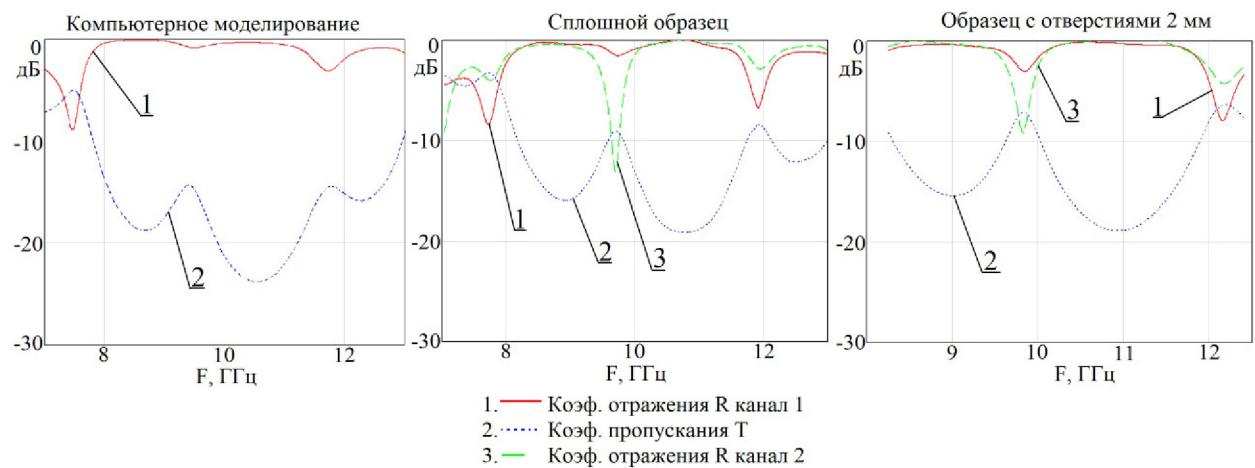


Рисунок 6 – Сравнение модели с экспериментальными АЧХ фотонного кристалла с эластомером, находящимся на расстоянии 3.13 мм от 9-ого слоя

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения бакалаврской работы были получены следующие результаты:

Был проведён критический анализ литературы с описанием различных методов исследований параметров материалов при помощи фотонных кристаллов с нарушением периодичности структуры. В данной работе использовался комплексный метод измерения параметров материала: волноводный и резонаторный. Волноводный метод прост в реализации, не требует особых условий и материалов, однако имеет маленькую чувствительность к измерению параметров новых материалов. Введение резонаторной структуры в волновод обеспечивает увеличение чувствительности к измерению параметров материалов. Рассмотрена модель взаимодействия композитных материалов с

СВЧ излучением, применяемая в компьютерном моделировании для предсказания поведения коэффициентов прохождения и отражения внутри объёма фотонного кристалла с нарушением периодичности, в область слоя нарушения которого помещался ферромагнитный эластомер разных конфигураций: сплошной и с воздушными включениями при разных положениях внутри слоя нарушения.

Было проведено компьютерное моделирование структуры фотонного кристалла с нарушением в центральном слое, в который был помещён поглотитель. Из полученных мною данных следует, что введение эластомера в структуру фотонного кристалла с нарушением периодичности приводит к изменению частотного положения дефектной моды и её амплитуды. При этом величины этих изменений определяются как составом эластомера, так его положением в слое нарушения.

Минимальное влияние эластомера на характеристики дефектной моды наблюдается при его расположении на границе нарушения. При расположении образца эластомера в центре нарушения наблюдается почти полное исчезновение дефектной моды. Эта закономерность объясняется особенностями распределения поля внутри структуры фотонного кристалла. Это обусловлено так называемыми синфазными послойными отражениями (брэгговские отражения).

На основе этих наблюдений можно создать теоретическую модель для решения обратной задачи и создать методику нахождения значения тангенса диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости поглотителя, помещённого в слой нарушения фотонного кристалла. Данная модель будет призвана упростить работу по созданию и исследованию свойств новых композитных материалов. Это значительно снизит временные затраты на их разработку и тестирование.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Горлицкий В.О. Волноводный фотонный кристалл, выполненный в виде диэлектрических матриц с воздушными включениями// Журнал технической физики, 2016, том 86, вып. 2. С.65-70
2. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В./Лабораторные работы «Фотонные кристаллы СВЧ-диапазона и их использование для измерения параметров материалов» (учебное пособие) – Саратов: Электронное издание Сарат. ун-та, 2014. – 32 с.
3. Saib A., Huynen I. // Electromagnetics. 2006. V. 26.№ 3–4. P. 261.
4. Yablonovitch E., Gmitter T.J., Meade R.D. // Phys. Rev.Lett. 1991. V. 67. № 24. P. 3380.
5. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Феклистов В.Б., Вениг С.Б./ Измерение параметров полупроводников, микро- и наноструктур на СВЧ (учебное пособие) – Саратов: Электронное издание Сарат. ун-та, 2012. – 55 с.
6. Названов В.Ф. Фотонные кристаллы в примерах и задачах. - Саратов: изд-во ООО «Новый ветер», 2015.-144с.
7. Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Пономарев Д. В./ СВЧ фотонные кристаллы–новая разновидность периодических структур в радиоэлектронике (учебное пособие) - Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2016. — 84 с.
8. Беляев Б.А., Ходенков С.А., Шабанов В.Ф. Исследование частотно-селективных устройств, построенных на основе микрополоскового двумерного фотонного кристалла // Докл. АН. 2016. Т. 467, № 4. С. 400–404.
9. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В.Фотонные кристаллы СВЧ-диапазона и их использование для измерения параметров материалов: Учеб. Пособие для студентов факультетаnano- и биомедицинских технологий, обучающихся по магистерской программе «Электроника и наноэлектроника» –Саратов, 2014. –32 с.: ил.Электронное издание.

- 10.Усанов Д.А., Скрипаль А.В., М.Ю.Куликов, Пономарев Д.В. Микрополосковые фотонные кристаллы и их использование для измерения электрофизических свойств жидких диэлектриков: Учеб. Пособие для студентов факультетаnano- и биомедицинских технологий, обучающихся по магистерской программе «Электроника и наноэлектроника» – Саратов, 2014. –35 с.: ил. Электронное издание.
- 11.Maxwell-Garnett J. C. Colours in metal glasses and in metallic films// Philos. Transactionsofthe Royal Society. London. Ser. A, 1904, vol. 203, pp.385–420.
- 12.Braggeman D. A. G. Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen// Annalen der Physik. (Leipzig) 1935, F. 5, B. 24, H. 8, 636–679.
- 13.Lichtenecker K. Die dielectrizitätkonstante natürlicher und Künstlicher Mischkörper// Physikalische Zeitschrift, 1926, B. 27, H.4, 115–158.
- 14.Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Куликов М.Ю. // Изв. вузов. Электроника. 2008. № 5. С. 25–32.
- 15.Usanov D.A., Skripal A.V., Abramov A.V., Bogolubov A.S., Kulikov M.Y. // Proc. 38th Europ. MicrowaveConf. Amsterdam, Netherlands, 2008. P. 785–788.
- 16.Малорацкий Л.Г., ЯвичЛ.Р. Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях. М.: Сов. радио, 1972. 232 с.
- 17.Esaki L., Tsu R. Superlattice and negative conductivity in semiconductors // IBM J. Res. Develop. 1970. Vol. 14. P. 61–65.

