

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

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ  
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАТРИЦЫ С УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИМИ И  
КЕРАМИЧЕСКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса

студента 2 курса 201 группы

по направлению 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»  
факультета нано- и биомедицинских технологий

Трошина Алексея Александровича

Научные руководители

профессор, д.ф.-.м.н.

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. звание

А.В. Скрипаль

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

доцент, к.ф.-.м.н.

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. звание

Д.В. Пономарев

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-.м.н.

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. звание

Д.А. Усанов

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

Саратов 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

### Введение

1. Компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик композитных материалов в СВЧ-диапазоне
2. Компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик фотонных кристаллов на основе композитных материалов в СВЧ-диапазоне
3. Экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик композитных материалов в СВЧ-диапазоне
4. Экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик фотонных кристаллов на основе композитных материалов в СВЧ-диапазоне

### Заключение

### Список использованных источников

## Введение

Для создания СВЧ фотонных кристаллов использовались прямоугольные и коаксиальные волноводы, микрополосковые, копланарные, щелевые и волноводно-щелевые линии.

При теоретическом описании свойств СВЧ фотонных кристаллов, нет необходимости учитывать свойства переходных слоев, квантовомеханические размерные эффекты, специфику технологических процессов. Это открывает возможность более точно рассматривать свойства фотонных кристаллов, связанные с периодичностью и, в частности, использовать результаты теоретического описания для создания полосовых фильтров, направленных ответвителей, перестраиваемых резонаторов, миниатюрных антенн, согласованных нагрузок.

Одним из перспективных направлений развития СВЧ-электроники является создание СВЧ- элементов на основе композитных материалов.

Сочетая различные разнородные вещества, можно получить широкий спектр материалов с требуемым набором свойств.

Композитные материалы сегодня широко используются при создании различных элементов СВЧ-техники, среди которых согласованные нагрузки, подложки микрополосковых линий передачи, печатные антенны.

Поэтому изучение композитных материалов является актуальной задачей.

**Целью работы** являлось исследование композитных материалов на основе диэлектрической матрицы с углеродосодержащими и керамическими включениями.

# 1. Компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик композитных материалов в СВЧ-диапазоне

Слои исследуемых фотонных кристаллов, содержащие большое число воздушных включений, можно рассматривать как композитные материалы, представляющие собой диэлектрические матрицы на основе пенопласта с наполнителем в виде графитосодержащих включений. Известно, что диэлектрические свойства композитных материалов могут быть охарактеризованы величиной эффективной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{ef}$ , определяемой величинами диэлектрических проницаемостей матрицы  $\epsilon_1$  и наполнителя  $\epsilon_2$ , и их объемными долями.

Фотонный кристалл представляется в виде чередующихся однородных слоев с эффективной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_{ef}$  и пенопласта, а его АЧХ может быть рассчитана с использованием матрицы передачи волны между областями с различными значениями постоянной распространения электромагнитной волны, определяемой эффективной диэлектрической проницаемостью графитосодержащих слоев и диэлектрической проницаемостью пенопласта.

Величина эффективной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{ef}$ , композитного материала, созданного на основе диэлектрической матрицы с наполнителем в виде углеродосодержащих включений, может быть определена с использованием ряда известных моделей «эффективной» среды, описываемых соотношениями:

Максвелла-Гарнетта

$$\frac{\epsilon_{ef} - \epsilon_2}{\epsilon_{ef} + 2\epsilon_2} = x_1 \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1 + 2\epsilon_2},$$

Бруггемана [20]

$$x_1 \frac{\epsilon_1 - \epsilon_{ef}}{2\epsilon_{ef} + \epsilon_1} + x_2 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_{ef}}{2\epsilon_{ef} + \epsilon_2} = 0,$$

Лихтенеккера

$$\log \epsilon_{ef} = (1 - x_1) \log \epsilon_2 + x_1 \log \epsilon_1.$$

## **2. Компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик фотонных кристаллов на основе композитных материалов в СВЧ-диапазоне**

Компьютерное моделирование параметров фотонного кристалла на основе композитных материалов выполнялось в программе HFSS.

Композитный материал был выполнен в виде матрицы из пенопласта с включениями в виде слоев, выполненных из столбчатых керамических структур.

Исследуемая структура представляла собой разновидность 11-и слойного фотонного кристалла без нарушений, нечетные слои которого были выполнены из композита. Данная структура характеризуется АЧХ, обладающей в диапазоне частот 8–12 ГГц двумя запрещенными и одной разрешенной зоной.

При введении в центральный слой фотонного кристалла нарушений в виде столбчатых керамических (поликоровых) структур, расположенных в шахматном порядке, в запрещенной зоне на АЧХ фотонного кристалла наблюдается появление пиков пропускания, что является характерной особенностью для фотонных кристаллов с нарушением периодичности.

## **3. Экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик композитных материалов в СВЧ-диапазоне**

Для исследования параметров композитного материала с углеродосодержащими включениями, были созданы образцы, центральный слой, которых, выполнен из пенопласта толщиной 20 мм, в котором созданы отверстия диаметром 2 мм для размещения включений в виде стержней. Композитный образец ограничен с двух сторон поликоровыми пластинами толщиной 1 мм. Вся структура размещалась в волноводе сечением 23\*10 мм.

Исследовались АЧХ структур в диапазоне частот от 8 до 12 ГГц с различными объемными долями включений.

При решении обратной задачи с использованием модели «эффективной диэлектрической проницаемости» (модель Бруггемана) были определены параметры композитного материала с углеродосодержащими включениями.

Было установлено, что с помощью данного метода, можно определить параметры материала включений, входящих в состав композита, но более адекватные результаты получаются при более полном заполнении матрицы композита стержневыми включениями.

#### **4. Экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик фотонных кристаллов на основе композитных материалов в СВЧ-диапазоне**

Исследовались АЧХ фотонного кристалла без нарушений на основе композитной структуры с включениями в виде 6-и слоев, выполненных из столбчатых керамических (поликоровых) структур. Каждый нечетный слой состоял из пяти столбцов поликора, расположенных на равном расстоянии друг от друга в плоскости слоя.

Данная структура характеризуется АЧХ, обладающей в диапазоне частот 8–12 ГГц запрещенными и разрешенными зонами.

При введении в центральный слой фотонного кристалла нарушений в виде столбчатых поликоровых структур, расположенных в шахматном порядке, в запрещенной зоне на АЧХ фотонного кристалла наблюдается появление пиков пропускания, что является характерной особенностью для фотонных кристаллов с нарушением периодичности.

## **Заключение**

Построена математическая модель слоистой структуры, содержащей слои композитного материала с углеродосодержащими и керамическими включениями.

Проведено компьютерное моделирование АЧХ слоистых структур, содержащих слои композитного материала с углеродосодержащими и керамическими включениями.

Экспериментально исследованы АЧХ слоистых структур, содержащих слои композитного материала с углеродосодержащими и керамическими включениями.

При решении обратной задачи с использованием модели «эффективной диэлектрической проницаемости» были определены параметры композитного материала с углеродосодержащими включениями, такие как диэлектрическая проницаемость и удельная электропроводность матрицы и углеродосодержащих включений.

Предложены и исследованы СВЧ фотонные кристаллы на основе композитных материалов, выполненных в виде матрицы с низкой диэлектрической проницаемостью и керамических включений.

## Список использованных источников

1. Kuriazidou C.A., Contopanagos H.F., Alexopoulos N.G. Monolithic waveguide filters using printed photonic-bandgap materials // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 2001. – Vol. 49, N 2. – P. 297–306.
2. Ozbay E., Temelkuran B., and Bayindir M. Microwave applications of photonic crystals// Progress In Electromagnetics Research, 2003. Vol. 41, pp. 185–209.
3. Gomez A., Vegas A., Solano M.A. & Lakhtakia A. On One- and Two-Dimensional Electromagnetic Band Gap Structures in Rectangular Waveguides at Microwave Frequencies// Electromagnetics. 2005. Vol. 25, issue 5. pp. 437–460.
4. Gerard W. Burns, I. G. Thayne, J. M. Arnold “Improvement of Planar Antenna Efficiency When Integrated With a Millimetre-Wave Photonic,” in Proc. of European Conference on Wireless Technology, Amsterdam, Netherlands, 11–12th October 2004, P. 229-232.
5. Беляев Б.А., Волошин А.С., Шабанов В.Ф. Исследование микрополосковых моделей полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах// Доклады Академии Наук. 2005. Т. 400, № 2. С. 181–185.
6. Schneider G. J., Hanna S., Davis J. L., Watson G. H. Defect modes in coaxial photonic crystals// Journal of Applied Physics, 2001. V. 90, N 6. September. P. 2642–2649
7. Wei T., Wu S., Huang J., Xiao H., Fan J. Coaxial Cable Bragg Gratings// Applied Physics Letters, 2011. V. 99, September. P. 113517-1–113517-3.
8. Морозов Г.А., Морозов О.Г., Насыбулин А.Р., Севастьянов А.А., Фархутдинов А.Р. Коаксиальные Брэгговские СВЧ-структуры в сенсорных системах// Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2014. Т. 17. № 3. С. 65–70.

9. Мухортов В.М., Масычев С.И., Маматов А.А., Мухортов Вас.М. Электрически перестраиваемый фотонный кристалл на основе копланарного волновода с наноразмерной сегнетоэлектрической пленкой// Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39, вып. 20, с. 70–76.
10. 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. 2010. Т. 80, вып. 8, с. 143–148
11. Никитин Ал.А., Никитин Ан.А., Устинов А.Б., Lähderanta E., Калиникос Б.А. Сверхвысокочастотный фотонный кристалл на щелевой линии передачи с сегнетоэлектрической пленкой// Журнал технической физики, 2016, том 86, вып. 6, стр.115–120
12. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Рязанов Д.С. Брэгговские сверхвысокочастотные структуры на волноводно-щелевых линиях// Радиотехника и электроника. 2016, том. 61. № 4. С. 321–326.
13. Д.А.Усанов, А.В.Скрипаль, А.В.Романов Электрофизические свойства композитов с включениями в виде углеродных нанотрубок, частиц мелкодисперсного графита и ферритовых микрочастиц// Известия вузов. Электроника №5(85) 2010
14. The effects of temperature and frequency on the dielectric properties, electromagnetic interference shielding and microwave-absorption of short carbon fiber/silica composites / *Mao-Sheng Cao, Wei-Li Song, Zhi-Ling Hou et al.* // Carbon. – 2010. – Vol. 48. – P. 788–796.
15. Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.В. Романов Механизмы транспортаносителей зарядов в композите с включениями в виде углеродных нанотрубок// Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА № 3(107) 2014
16. Д.А.Усанов, А.В.Скрипаль, А.В.Романов Температурная зависимость комплексной диэлектрической проницаемости композитов на основе

- диэлектрических матриц и входящих в их состав углеродных нанотрубок// Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА № 2(88) 2011
17. Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.А. Романов Характеристики дефектной моды одномерного СВЧ волноводного фотонного кристалла с металлическим включением в элементе, нарушающем его периодичность// Журнал технической физики, 2017, том 87, вып. 6 с. 884-887
  18. Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, М.К. Мерданов, С.Г. Евтеев Волноводные фотонные структуры на резонансных диафрагмах// Радиотехника №10 2015 С. 108-114
  19. Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.В. Романов Влияние отжига на СВЧ-характеристики углеродных нанотрубок и нанокомпозитных материалов, созданных на их основе// Журнал технической физики, 2014, том 84, вып. 6 С. 86-91
  20. Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, М.К. Мерданов, В.О. Горлицкий Волноводный фотонный кристалл, выполненный в виде диэлектрических матриц с воздушными включениями// Журнал технической физики, 2016, том 86, вып. 2 С.65-70
  21. Д. А. Усанов, С. А. Никитов, А. В. Скрипаль, Д. С. Рязанов Брэгговские сверхвысокочастотные структуры на волноводно\_щелевых линиях// Радиотехника и электроника, 2016, том 61, № 4, с. 321–326
  22. Д. А. Усанов, С. А. Никитов, А. В. Скрипаль, Д. В. Пономарев Резонансные особенности в разрешенных и запрещенных зонах сверхвысокочастотного фотонного кристалла с нарушением периодичности// Радиотехника и электроника, 2013, том 58, № 11, с. 1071–1076
  23. *Yablonovitch E. // Phys. Rev. Lett. 1987. V. 58. № 20. P. 2059.*

24. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Романов А.В. Комплексная диэлектрическая проницаемость композитов на основе диэлектрических матриц и входящих в их состав углеродных нанотрубок // ЖТФ. – 2011. – № 1. – С. 106–110.