

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твердого тела

**СВЧ-ФИЛЬТРЫ ПРОПУСКАНИЯ НА ОСНОВЕ  
ВОЛНОВОДНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ**

**АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ**

Студента 2 курса 2251 группы

направления (специальности) 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»

Института физики

Александрова Данила Вадимовича

Научные руководители:

д. ф.- м. н., профессор

Ал. В. Скрипаль

должность, уч. степени, уч задание

подпись, дата

инициалы, фамилия

доцент, к.ф.-м.н.

А. П. Фролов

должность, уч. степени, уч задание

подпись, дата

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой физики твердого тела

д. ф.- м. н., профессор

Ал. В. Скрипаль

должность, уч. степени, уч задание

подпись, дата

инициалы, фамилия

Саратов 2021

**Введение.** В настоящее время одной из наиболее интенсивно развивающихся областей науки и техники является разработка, создание и исследование метаматериалов. Метаматериалы -это искусственно созданные гетерогенные среды, в которых геометрические размеры, а также электрофизические параметры составляющих элементов периодически изменяются вдоль одного или нескольких пространственных направлений. Интенсивно создаются новые типы структур и устройств с управляемыми параметрами на основе метаматериалов с уникальными свойствами, которые обусловлены резонансным взаимодействием электромагнитной волны с периодической структурой. Одним из типов метаматериалов являются фотонные кристаллы. К ним проявляется огромный интерес, в связи с тем, что при их создании можно добиться уникальных свойств, используя в качестве одного или нескольких слоёв композитные материалы.

Фотонные кристаллы могут применяться в качестве структурных и управляющих элементов различного рода фильтров, усилителей, антенн и резонаторов. Изменяя параметры периодичности и создаваемых нарушений фотонных кристаллов, можно управлять шириной и глубиной фотонной запрещенной зоны, частотным положением ее границ, появлением, а также частотными положениями «окон прозрачности» частотной области с минимальным значением коэффициента отражения электромагнитной волны. В качестве одного или нескольких слоёв фотонного кристалла можно использовать композитные материалы. Характеристики композитов могут существенно влиять на параметры нарушений, например, увеличивая объемную долю включений, можно управлять положением «окна прозрачности»

Учитывая вышесказанное исследование свч-фильтров пропускания на основе волноводных СВЧ фотонных кристаллов, является актуальной темой.

Целью магистерской работы являлось создание и исследование свойств полосно-пропускающих СВЧ-фильтров на основе волноводных одномерных

СВЧ фотонных кристаллов в сантиметровом и миллиметровом диапазонах частот.

Магистерская работа содержит 3 главы:

**ГЛАВА 1. Анализ современного состояния исследования в области создания СВЧ-волноводных фильтров**

**1.1. Фотонные кристаллы СВЧ-диапазона**

**1.2. Создание фильтров с управляемыми характеристиками**

**ГЛАВА 2. Компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик полосно-пропускающих фильтров на основе волноводных одномерных СВЧ фотонных кристаллов**

**2.1. Математическая модель**

**2.2 Результаты компьютерного моделирования амплитудно-частотных характеристик**

**2.2.1 Результаты расчета амплитудно-частотных характеристик в сантиметровом диапазоне длин волн**

**2.2.2 Результаты расчета амплитудно-частотных характеристик в миллиметровом диапазоне длин волн**

**2.3 Расчёт характеристик полосно-пропускающего фильтра сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн**

**ГЛАВА 3. Экспериментальное исследование характеристик полосно-пропускающего фильтра**

**3.1 Результаты экспериментального исследования полосно-пропускающего фильтра сантиметрового диапазона длин волн**

**3.2 Результаты экспериментального исследования полосно-пропускающего фильтра миллиметрового диапазона длин волн**

**3.3 Расчёт характеристик полосно-пропускающего фильтра на основе СВЧ волноводных кристаллов**

**1. Анализ современного состояния исследования в области создания СВЧ-волноводных фильтров.** Фотонные кристаллы являются разновидностью метаматериаллов и представляют собой полученные искусственным путем периодические структуры с периодом, сравнимым с длиной распространяющегося в них электромагнитного излучения. В данных структурах создается периодичное изменение электрофизических параметров слоев и их геометрических размеров. В фотонных кристаллах наблюдается чередование запрещенных и разрешенных для распространения электромагнитного излучения частотных диапазонов, в спектрах отражения и пропускания электромагнитного излучения, взаимодействующего с подобными структурами, как и в реальных кристаллах, частотная область, где запрещено распространение электромагнитной волны, называется фотонной запрещенной зоной. Когда появляется нарушение периодичности в структуре ФК, которое создается путем изменения геометрических размеров и/или электрофизических параметров слоев, в запрещенной зоне фотонного кристалла появляется узкое «окно прозрачности»-частотная область с минимальным значением коэффициента отражения электромагнитной волны. Форма, а также положение «окна прозрачности» определяется размерами и электрофизическими параметрами создаваемого нарушения периодичности.

**1.2. Создание фильтров с управляемыми характеристиками.** Анализ работ, в которых идут интенсивные исследования фотонных кристаллов СВЧ-диапазона, а также их электродинамических свойств, показывает активный процесс исследований в данной области, который направлен на разработку новых устройств с управляемыми параметрами и улучшение характеристик уже существующих устройств. Наибольший практический интерес для создания фильтров представляют волноводные фотонные кристаллы.

**ГЛАВА 2. Компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик полосно-пропускающих фильтров на основе волноводных одномерных СВЧ фотонных кристаллов.** Для теоретического исследования взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с одномерными волноводными фотонными кристаллами могут применяться матричные методы.

**2.1 Математическая модель взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с одномерными волноводными фотонными кристаллами на основе матрицы передачи.** Для расчета коэффициентов отражения и прохождения электромагнитной волны при её нормальном падении на многослойную структуру с плоскостями слоёв, перпендикулярными направлению распространения излучения, полностью заполняющими волновод по поперечному сечению, воспользуемся матрицей передачи волны между областями с различными значениями постоянной распространения электромагнитной волны  $\gamma_j$  и  $\gamma_{j+1}$ .

Для расчета постоянных распространения  $\gamma_0$ ,  $\gamma_d$ ,  $\gamma_m$ ,  $\gamma_n$  электромагнитной волны соответственно в пустом волноводе, волноводе, заполненном диэлектриком и полупроводником, использовались следующие выражения:

$$\gamma_0 = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \epsilon_0 \mu_0}, \quad \gamma_n = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \epsilon_n^* \epsilon_0 \mu_n \mu_0}, \quad \gamma_d = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \epsilon_d \epsilon_0 \mu_0}, \quad (1)$$

где  $\epsilon_n^* = \epsilon_n' - j\epsilon_n''$  - комплексная диэлектрическая проницаемость полупроводникового слоя,  $\epsilon_n' = \epsilon_n \frac{\sigma_n^2 m_n^*}{\epsilon_0 e^2 n_n}$ ,  $\epsilon_n'' = \frac{\sigma_n}{\epsilon_0 \omega}$  - действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости полупроводникового слоя,  $\mu_0$  и  $\epsilon_0$  - диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума,  $\mu_n$  и  $\epsilon_n$  относительная диэлектрическая и магнитная проницаемости полупроводникового слоя,  $\sigma_n$  - электропроводность полупроводникового слоя,  $m_n^*$ ,  $n_n$  - эффективная масса и концентрация

электронов в полупроводниковом слое,  $\epsilon_d$  – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрического слоя.

Матрица передачи волны между областями, в которых значения распространения электромагнитной волны равны  $\gamma_j$  и  $\gamma_{j+1}$  (формула 2), используется для расчета коэффициента отражения электромагнитной волны при ее падении на структуру.

$$T_{(Z_{j,j+1})} = \begin{pmatrix} \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{(\gamma_{j+1} - \gamma_j)Z_{j,j+1}} & \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{(\gamma_{j+1} + \gamma_j)Z_{j,j+1}} \\ \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{-(\gamma_{j+1} + \gamma_j)Z_{j,j+1}} & \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{-(\gamma_{j+1} - \gamma_j)Z_{j,j+1}} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Которая связывает коэффициенты  $A_j$ ,  $B_j$  и  $A_{j+1}$ ,  $B_{j+1}$ , определяющие амплитуды падающих и отраженных волн по обе стороны от границы  $Z_{j,j+1}$ , соотношением:

$$\begin{pmatrix} A_{j+1} \\ B_{j+1} \end{pmatrix} = T_{(Z_{j,j+1})} \cdot \begin{pmatrix} A_j \\ B_j \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Коэффициенты  $A_{N+1}$  и  $B_0$ , определяющие амплитуды волны, прошедшей через многослойную структуру (рисунок 1), и волны, отраженной от нее, связаны с коэффициентом  $A_0$ , определяющим амплитуду падающей волны, следующим соотношением:

$$\begin{pmatrix} A_{N+1} \\ B_0 \end{pmatrix} = T_N \cdot \begin{pmatrix} A_0 \\ B_0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где

$$T_N = \begin{pmatrix} T_N[1,1] & T_N[1,2] \\ T_N[2,1] & T_N[2,2] \end{pmatrix} = \prod_{j=N}^0 T_{j,(j+1)} = T_{(Z_{N,N+1})} \cdot T_{(Z_{N-1,N})} \dots T_{(Z_{1,2})} \cdot T_{(Z_{0,1})}. \quad (5)$$

## 2.2 Результаты компьютерного моделирования амплитудно-частотных характеристик

2.2.1 Расчет амплитудно-частотных характеристик в сантиметровом диапазоне длин волн. Для математического моделирования

спектров отражения и прохождения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, которое взаимодействовало с одномерным волноводным фотонным кристаллом, и оптимизации геометрических и электрофизических параметров его слоев использовалась программа обеспечения Mathcad.

В данном разделе исследовалась 11-слойная и 15-слойная структура, представляющая собой чередующиеся нечетные слои поликора ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) толщиной 1 мм с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 9,6$  и четные слои фторопласта толщиной 7 мм, 9 мм, 14 мм, 18 мм и 21 мм, с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 2$  в диапазоне частот от 6,6 до 13 ГГц.

Приведены графики частотных зависимостей коэффициентов прохождения  $T$  фотонного кристалла «поликор-фторопласт».

**2.2.2 Результаты расчета амплитудно-частотных характеристик в миллиметровом диапазоне длин волн.** Исследовано несколько 11-слойных структур, представляющих собой чередующиеся нечетные слои поликора ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) толщиной 1 мм в первом случае и 2 мм во втором случае, с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 9,6$  и четные слои фторопласта толщиной 6 мм с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 2$ , с последующим внесением в центральный слой нарушения в виде слоя воздуха, толщиной 7 мм, в случае с конструкцией с толщиной поликора 1 мм также экспериментально внесено нарушение в виде нитрида бора ( $\text{BN}$ ), толщиной 2 мм, в центральный слой. Экспериментально рассчитана 11-слойная структура, представляющая собой чередующиеся нечетные слои поликора ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и четные слои нитрида бора ( $\text{BN}$ ). Расчеты произведены в диапазоне частот от от 25.5 до 40 ГГц.

Получены АЧХ коэффициентов отражения и прохождения. Исследовано поведение «окна прозрачности» при изменении толщины нарушенного слоя, поведение ширины запрещенной зоны.

**2.3 Расчёт характеристик полосно-пропускающего фильтра сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн.** Рассчитана добротность полосно-пропускающих фильтров, полученных в п. 2.2.1 и п. 2.2.2 частотных зависимостей коэффициентов отражения  $R$  и прохождения  $T$  фотонного кристалла. Проанализированы полученные результаты.

### **3 Экспериментальное исследование характеристик полосно-пропускающего фильтра.**

**3.1 Результаты экспериментального исследования полосно-пропускающего фильтра сантиметрового диапазона длин волн** Экспериментально исследовался одномерный волноводный фотонный кристалл на основе 11 слоев, созданный в соответствии с описанной моделью в пункте 2 и представляющий собой чередующиеся слои поликора и пенопласта. (Рис. 2) с внесением нарушения в центральный слой.

Экспериментально был исследован одномерный волноводный фотонный кристалл на основе 13-слоев. В ранее рассмотренную структуру была добавлена сложная неоднородность в виде двух слоев воздуха, которые были размещены в 6-м и 8-м слое. Измерение амплитудно-частотных характеристик коэффициентов отражения и пропускания исследуемого фотонного кристалла в трехсантиметровом диапазоне длин волн проводилось с помощью векторного анализатора цепей «Agilent PNA-X Network Analyzer N5242A». Получены АЧХ коэффициентов отражения и прохождения для данной структуры. Произведено сравнение полученных экспериментальных данных с результатами компьютерного моделирования, вычислена добротность на основе экспериментальных графиков.

**3.2 Результаты экспериментального исследования полосно-пропускающего фильтра миллиметрового диапазона длин волн.** Экспериментально был исследован 11-слойный одномерный волноводный фотонный кристалл. Структура рассмотренная в пункте 2.2.2 была

реализована в макете и подключена к векторному анализатору цепей «Agilent PNA-L Network Analyzer N5230A». Получены АЧХ коэффициентов отражения и прохождения для данной структуры. Произведено сравнение полученных экспериментальных данных с результатами компьютерного моделирования.

Произведено сравнение полученных экспериментальных данных с результатами компьютерного моделирования, вычислена добротность на основе экспериментальных графиков.

**3.3 Расчёт характеристик полосно-пропускающего фильтра на основе СВЧ волноводных кристаллов.** Произведен расчет добротности по ранее полученным графикам эксперимента, проанализированы результаты расчетов. Сделаны выводы по дипломной работе

## Список использованной литературы

1. Быков В.П. Спонтанное излучение в периодической структуре // ЖЭТФ. 1972. Т. 62. № 2. Р. 505-273.
2. Гуляев Ю.В., Лагарьков А.Н., Никитов С.А. Метаматериалы: фундаментальные исследования и перспективы применения// Вестник Российской Академии Наук. 2008. Т.78, № 5. С.438–457.2 В.Г.,
3. Кособукин В.А., Курдюков Д.А., Медведев А.В., Певцов А.Б. Фотонные кристаллы с перестраиваемой запрещенной зоной на основе заполненных и инвертированных композитов опал—кремний// ФТП. 2001. Т.35, вып.6. С.710–713.3
4. Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. *Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи*. Пер с англ. под ред. Л.В. Алексеева и Ф.В. Кушнера. Москва, Связь. 1971. Т.1. 440 с. Т.2. 496 с.
5. Радиоэлектроника. Устройства СВЧ [Электронный ресурс] / tarefer.ru [Электронный ресурс] – URL:<http://tarefer.ru/works/71/100209/index.html> (дата обращения: 19.05.2021). Загл. с экрана. Яз. рус., Яз. англ.
6. Усанов Д.А., 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. 65-70.6Мэтьюз
7. Шабанов В.Ф., Ветров С.Я., Шабанов А.В. Оптика реальных фотонных кристаллов. Жидкокристаллические дефекты, неоднородности, Новосибирск: Издательство СО РАН, 2005, 209 с.
8. Шаров Г.А. *Волноводные устройства сантиметровых и миллиметровых волн*. Москва, Горячая линия-Телеком. 2016. 640 с.
9. Cameron R.J., Kudsia C.M., Mansour R.R. *Microwave filters for communication systems*. NY, Wiley. 2007. 772 p.