

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

Кафедра твёрдого тела

Моделирование спектров отражения одномерных фотонных кристаллов с  
дефектом слоем и гетерогенных сред

название темы выпускной квалификационной работы полужирным шрифтом

---

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРОВСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 411 группы

направления (специальности) 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника» код и  
наименование направления (специальности)

факультет нано- и биомедицинских технологий

наименование факультета, института, колледжа

Латанов Роман Алексеевич

---

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

Профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

И.о. Заведующий кафедрой

профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

В. Ф. Названов

инициалы, фамилия

А.В.Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2019 год

**Актуальность темы.** На сегодняшний день одной из более напряженно развивающихся областей науки

считается направленность согласно творению и изучению фотонных кристаллов – искусственного происхождения периодических структур с периодом, сопоставимым с длиной волны распространяющегося в них электромагнитного излучения. По аналогии с реальными кристаллами в фотонных кристаллах существуют разрешенные и запрещенные для распространения электромагнитного излучения частотные области, называемые фотонными запрещёнными зонами.

Неповторимые характеристики фотонных кристаллов, обусловленные резонансным взаимодействием электромагнитной волны с периодической структурой, разрешают делать на их основе новые типы структур и устройств с управляемыми параметрами, а ещё воплотить новые высокочувствительные методы измерения параметров материалов.

Большой интерес предполагает так называемые композитные среды с наночастицами металлов при создании наноструктурных металл-диэлектрических фотонных кристаллов и новых способов управления светом на их основе. Спектральные свойства 1D ФК с включением в качестве структурного элемента резонансного слоя нанокompозита металл-диэлектрик, взвешенных в прозрачной матрице, изучались в работе .

**Цель работы.** Целью настоящей работы является компьютерное моделирование спектров отражения 1D- диэлектрических фотонных кристаллов с дефектным слоем из гетерогенной среды металл- диэлектрик.

Для достижения этой цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Изучить особенности фотонных кристаллов.
2. Изучить основные методы расчета 1D- фотонных кристаллов.
3. Изучить оптические свойства пассивных и активных гетерогенных сред металл- диэлектрика.
4. Выполнить компьютерное моделирование спектров отражения 1D-фотонных кристаллов с пассивным и активным дефектным слоем из гетерогенной

среды металл- диэлектрик с разным коэффициентом усиления (с использованием пакета программ Mathcad)

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

- в 1 главе рассмотрены краткие свойства фотонных кристаллов их типы.
- во 2 главе ознакомились с расчетами спектров отражения на 1D-ФК матричным методом
- в 3 главе мы рассмотрели анализ оптических свойств гетерогенных сред
- в 4 главе мы отразили компьютерное моделирование спектров отражения дефектных одномерных фотонных кристаллов.

В настоящей работе впервые проведено компьютерное моделирование спектров отражения одномерных фотонных кристаллов с дефектным слоем из активной гетерогенной среды металл- диэлектрик, состоящей из металлических наночастиц, взвешенных в прозрачной матрице.

1. В данной работе изучены типы и определение фотонных кристаллов, наиболее известные методы изготовления фотонных кристаллов.
2. В работе кратко описаны оптические свойства гетерогенных сред металл - диэлектрика, состоящих из малых металлических шаров, распределённых в диэлектрическом материале.
3. В работе также представлены результаты компьютерного моделирования спектров отражения 1D- фотонных кристаллов с дефектным слоем гетерогенной среды металл- диэлектрик с разным коэффициентом усиления и толщинами (с использованием пакета программ Mathcad).

Научное значение работы.

В работе впервые показано, что при использовании в одномерных диэлектрических фотонных кристаллах дефектных слоев гетерогенной среды металл – диэлектрик можно менять спектры отражения этих кристаллов с помощью изменения коэффициента усиления и изменение толщины слоя.

### **Основное содержание работы:**

В первой главе мы отразили изучили следующие пункты :

- 1) Мы рассмотрели основные типы фотонных кристаллов, а так же типы дефектов.
- 2) Отразили во 2 пункте различные дефекты на фотонных кристаллах
- 3) Ну и сами методы управления спектрами отражения на фотонных кристаллах

В второй главе мы ознакомились с методом подсчета спектров отражения мы использовали метод характеристических матриц для многослойных

систем. Так же мы ознакомились с методом характеристических матриц с применением тождества Чебышева.

В третьей главе показан краткий оптический анализ гетерогенной среды состоящей из металлических наночастиц и диэлектрика. В связи с вышеизложенным гетерогенные среды могут получить широкое распространение при разработке и изготовлении нового поколения приборов интегральной оптики и оптоэлектроники (повышение разрешающей способности оптических микроскопов, управление направлением распространения светового луча, включая самофокусирующие устройства, создание миниатюрных высококачественных линз и других оптических элементов).

В четвертой главе проведен анализ спектров отражения и пропускания одномерного ФК с дефектным слоем из гетерогенной среды, выполненным в виде гетерогенной среды диэлектрик-металл и продемонстрирована возможность управления дефектными модами за счет варьирования коэффициентов усиления дефекта и толщин слоев материнского кристалла. Так же был рассмотрен метод перестановки что добавляя новую матрицу мы получили изменение в структуре кристалла и изменение положения дефектной полосы и ширины ФЗЗ.

Фотонные кристаллы – это материалы с упорядоченной структурой, характеризующейся строго периодическим изменением коэффициента преломления в масштабах, сопоставимых с длинами волн излучений в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Фотонные кристаллы позволяют получить разрешенные и запрещенные зоны для энергий фотонов, аналогично полупроводниковым материалам, в которых наблюдаются разрешенные и запрещенные зоны (ФЗЗ) для энергий носителей заряда. В настоящее время интерес представляют

фотонные кристаллы, для которых ФЗЗ лежит в  $(\lambda \approx 400 - 700 \text{ нм})$

или в ИК  $(\lambda = 1 - 1,5 \text{ мкм})$  областях [1]. Практически - это значит, что, если на фотонный кристалл падает фотон, обладающий энергией (длиной волны, частотой), которая соответствует запрещенной зоне данного фотонного кристалла, то он не может распространяться в фотонном

кристалле и отражается обратно. Но если, на фотонный кристалл падает фотон, обладающий энергией, которая соответствует разрешенной зоне данного фотонного кристалла, то он может распространяться в фотонном кристалле. Другими словами, фотонный кристалл выполняет функцию оптического фильтра. С общей точки зрения фотонный кристалл является сверхрешеткой (crystal superlattice) – средой, в которой искусственно создано дополнительное поле с периодом, на порядки превышающим период основной решетки. Для фотонов такое поле получают периодическим изменением коэффициента преломления среды – в одном, двух или трех измерениях (1D–, 2D–, 3D–фотонные структуры соответственно). Если период оптической сверхрешетки сравним с длиной электромагнитной волны, то поведение фотонов кардинально отличается от их поведения в решетке обычного кристалла, узлы которого находятся друг от друга на расстоянии, много меньшем длины волны света. Поэтому такие решетки и получили особое название – фотонные кристаллы.

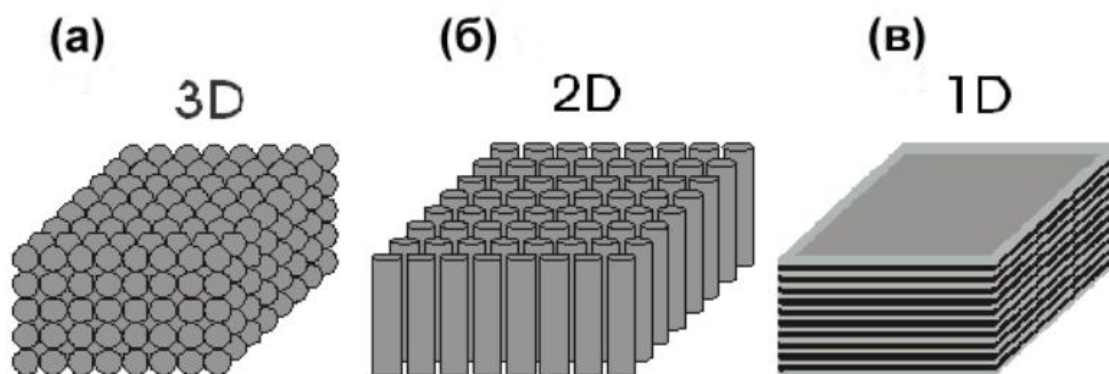


Рисунок 1 – Типы фотонных кристаллов

—

-

-

кристалл

В 1 главе мы отразили изучили следующие пункты :

- 4) Мы рассмотрели основные типы фотонных кристаллов, а так же типы дефектов.
- 5) Отразили во 2 пункте различные дефекты на фотонных кристаллах
- 6) Ну и сами методы управления спектрами отражения на фотонных кристаллах

В четвертой главе приведены результаты компьютерного моделирования спектров отражения одномерного фотонного кристалла с дефектом из активной среды.

В качестве исходного фотонного кристалла использовалась периодическая структура

$\text{ZrO}_2$  и  $\text{SiO}_2$ , состоящий из двух диэлектрических слоев с показателями преломления  $n_2$  и  $n_3$ , соответственно, длина волны  $\lambda$ ,  $N$ - число периодов,  $\epsilon d$ - диэлектрическая проницаемость,  $h$ -толщина слоя,  $g$ -коэффициент усиления,  $Q$ - угол падения,  $\eta$ - фактор заполнения,  $\gamma$ - коэффициент отражения света,  $R$ - Отражательная способность,  $T$ -пропускная способность.

Два диэлектрических слоя с показателями коэффициентов преломления  $n_1 = 2,04$  и  $n_2 = 1,457$  соответственно. Толщина слоя  $h_c = 150 \cdot 10^{-9}$ .

- 1) Для начала изучения моделирования спектров отражения мы зададим исходную матрицу без дефекта однородного материала.

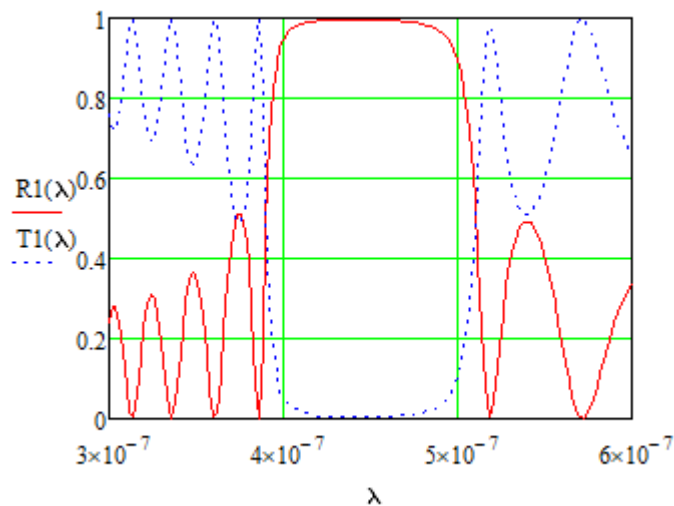
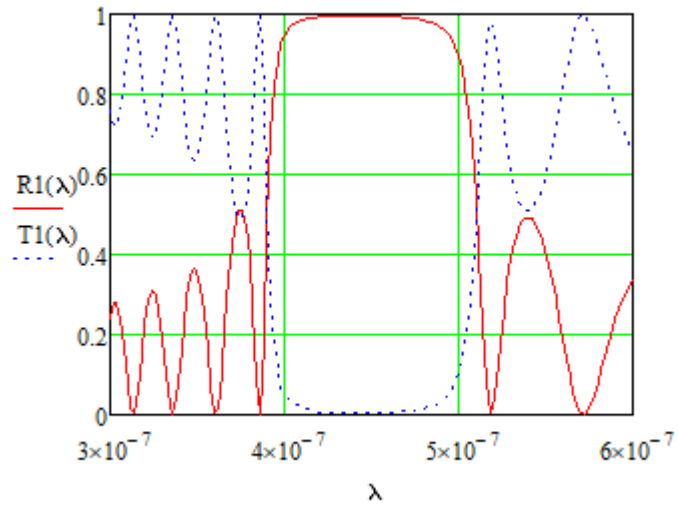
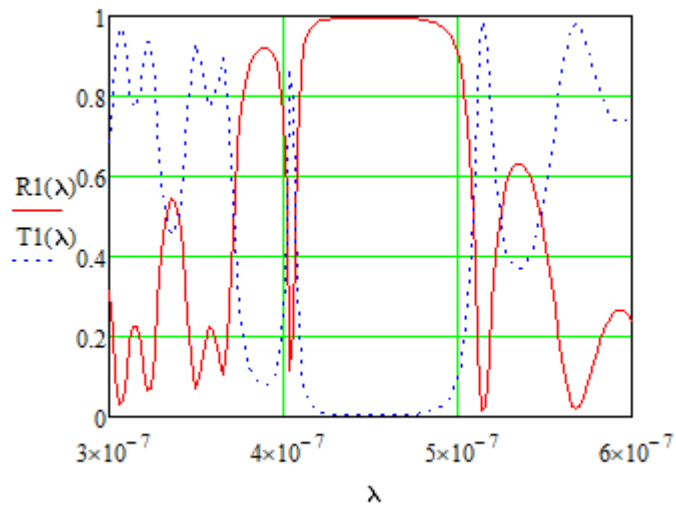


Рисунок 2. Спектр отражения 1D- ФК без дефекта при  $N=5$  и  $D=3$ .

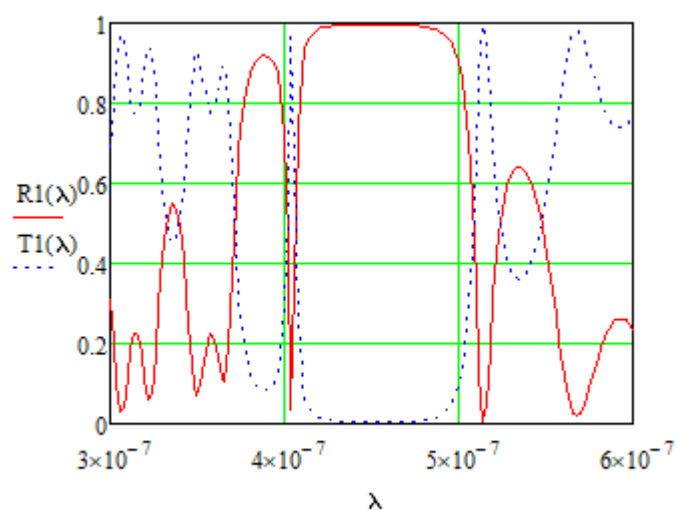


**Рисунок 3.** Спектр отражения 1D- ФК без дефекта при  $N=5$  и  $D=2$ .

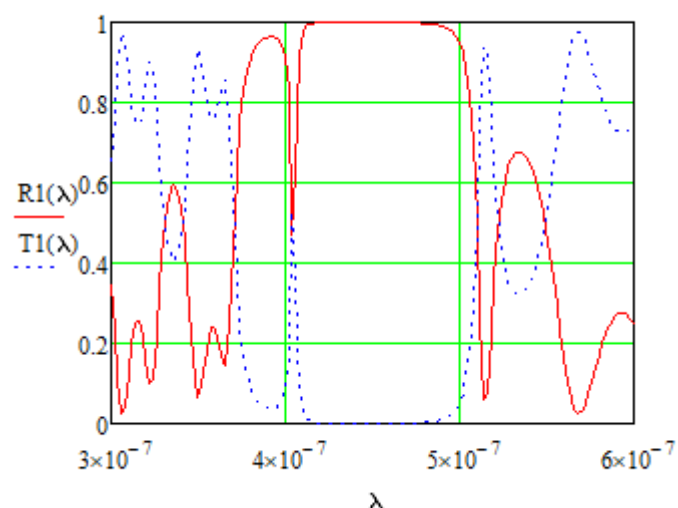
Из рисунка 2 и 3 мы видим что дефектной полосы не наблюдается. Рассмотрим кристалл уже с введенным дефектом и будем изменять коэффициент усиления( $g$ )/



**Рисунок 4.** Спектр отражения 1D- ФК при  $\eta=0.1322$  и  $g=0.01$  при  $D=3$



**Рисунок 5.** Спектр отражения 1D- ФК при  $\eta=0.1322$  и  $g=0.01$  при  $D=2$   
Из рисунков 4 и 5 мы видим изменение дефектной полосы. А так же при коэффициенте усиления равном 0.01 видно что особого усиления не наблюдается в дефектной полосе.



**Рисунок 6.** Спектр отражения 1D- ФК при  $\eta=0.1322$  и  $g=0.03$  при  $D=3$

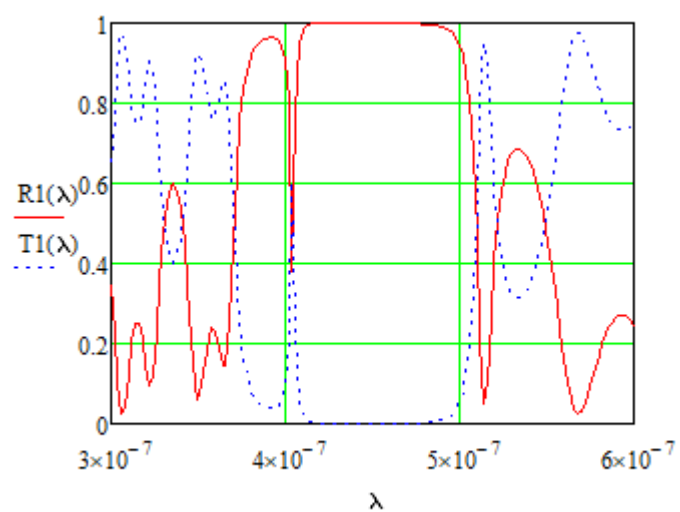


Рисунок 7. Спектр отражения 1D- ФК при  $\eta=0.1322$  и  $g=0.03$  при  $D=2$

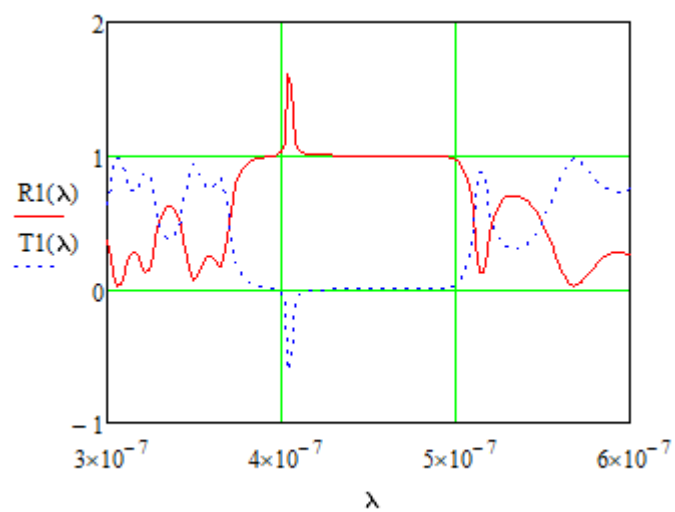
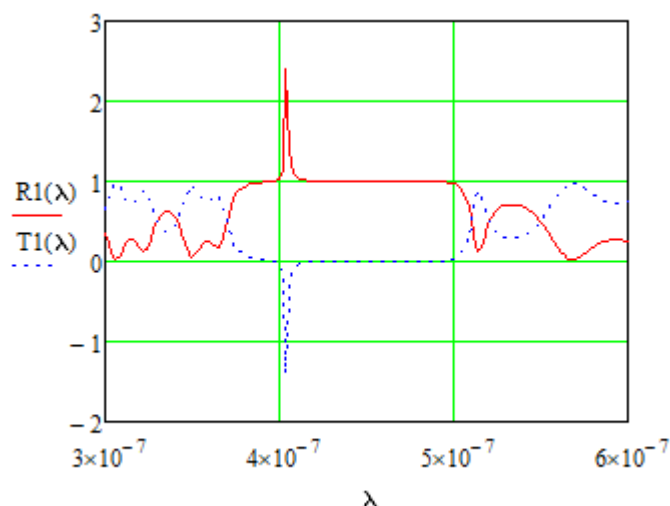


Рисунок 8. Спектр отражения 1D- ФК при  $\eta=0.1322$  и  $g=0.04$  при  $D=3$



**Рисунок 9.** Спектр отражения 1D- ФК при  $\eta=0.1322$  и  $g=0.04$  при  $D=2$

Как можно видеть из рисунков 19 и 20, при уменьшении коэффициента до  $g=0.04$  наблюдается усиление в дефектной полосе спектра отражения (при этом также можно заметить эффект расщепления дефектной моды).

В данной главе проведен анализ спектров отражения и пропускания одномерного ФК с дефектным слоем из гетерогенной среды, выполненным в виде гетерогенной среды диэлектрик-металл и продемонстрирована возможность управления дефектными модами за счет варьирования коэффициентов усиления дефекта и толщин слоев материнского кристалла.

## Заключение

1. Осмотрены разновидности, способы производства и использование фотонных кристаллов. Коротко рассмотрены способы расчета спектров отражения одномерных фотонных кристаллов, при этом главное внимание уделено матричному методу расчета.
2. Кратко рассмотрены оптические свойства гетерогенных сред, представляющих собой смеси из металл-диэлектрик.
3. Представлены результаты компьютерного моделирования спектров отражения одномерных фотонных кристаллов с дефектным слоем как из гетерогенной среды. Моделирование проводилось с использованием пакета программ MathCAD(в предположении 3D-дефектного слоя).

4. Итоги моделирования демонстрируют, что при изменении коэффициента усиления активной среды (нанокомпозита металл – диэлектрик) при данной величине фактора заполнения имеет место быть эффект расщепления частоты дефектной моды, появляющийся при совмещении резонансной частоты нанокомпозита с частотой дефектной моды.

## Список используемой литературы

1. Названов В.Ф. Фотонные кристаллы в примерах и задачах/ В.Ф. Названов, 2015.–144с.
2. А. Н. Ораевский, И. Е. Проценко, “Оптические свойства гетерогенных сред”, Квантовая электроника, **31:3** (2001), 252–256 [Quantum Electron., **31:3** (2001), 252–256]
3. Белотелов В. И. Фотонные кристаллы и другие метаматериалы/ В.И. Белотелов, А.К. Звездин Библиотечка квант., 2006.
4. Шабанов В.Ф. Оптика реальных фотонных кристаллов. Жидкокристаллические дефекты, неоднородности/ В.Ф. Шабанов, С.Я. Ветров, А.В. Шабанов Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005.
5. Кособукин, В.А. Фотонные кристаллы / В.А. Кособукин //Окно в Микромир. – 2002 г.
6. Ярив А. Оптические волны в кристаллах / А. Ярив, П. Юх. М.: Мир, 1987.
7. Борн М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф, 1973.
8. Ветров С.Я. Спектральные свойства резонансного одномерного фотонного кристалла/ И.В. Тимофеев, А.Ю. Кутукова // Оптика и спектроскопия. 2009. Т. 106. № 5. С. 838-842.