

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

Спектры отражения одномерных фотонных кристаллов с дефектным слоем  
из гетерогенной среды металл – диэлектрик

название темы выпускной квалификационной работы полужирным шрифтом

---

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 2 курса 201 группы  
направления (специальности) 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»  
код и наименование направления (специальности)  
факультет нано- и биомедицинских технологий  
наименование факультета, института, колледжа

Максиной Дарьи Анатольевны

---

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

Профессор, д.ф.-м.н.  
должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_  
дата, подпись

В. Ф. Названов  
инициалы, фамилия

Заведующий кафедрой  
профессор, д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_

Д.А.Усанов  
инициалы, фамилия

должность, уч. степень, уч. звание

дата, подпись

Саратов 2016 год

## **Введение. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы.** На сегодняшний день одной из наиболее интенсивно развивающихся областей науки является направление по созданию и исследованию фотонных кристаллов – искусственных периодических структур с периодом, сравнимым 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 запрещенными зонами.

Уникальные свойства фотонных кристаллов, обусловленные резонансным взаимодействием электромагнитной волны с периодической структурой, позволяют создавать на их основе новые типы структур и устройств с управляемыми параметрами, а также реализовать новые высокочувствительные методы измерения параметров материалов.

Большой интерес представляют так называемые композитные среды с наночастицами металлов при создании наноструктурных металл-диэлектрических фотонных кристаллов и новых способов управления светом на их основе [4]. Спектральные свойства 1D ФК с включением в качестве структурного элемента резонансного слоя нанокompозита металл-диэлектрик, взвешенных в прозрачной матрице, изучались в работе [5].

**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)

### **Научная новизна.**

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 рассмотрены общие сведения о фотонных кристаллах, наиболее известные методы изготовления фотонных кристаллов.
2. В работе кратко описаны оптические свойства пассивных и активных 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 из пассивной и активной гетерогенной среды металл- диэлектрик с разным коэффициентом усиления (с использованием пакета программ Mathcad).

Научное значение работы.

В работе впервые показано, что при использовании в одномерных диэлектрических фотонных кристаллах дефектных слоев из активной гетерогенной среды металл – диэлектрик можно существенно управлять спектрами отражения этих кристаллов с помощью изменения коэффициента усиления применяемой активной среды.

### **Основное содержание работы**

В первой главе приведено определение фотонных кристаллов, рассмотрены основные типы фотонных кристаллов, основные методы изготовления одно-, двух- и трехмерных ФК, а также основные методы расчета спектров отражения (краткий анализ).

Во второй главе рассмотрены свойства гетерогенных сред, состоящих из сферических металлических наночастиц в прозрачной матрице.

Приведенное рассмотрение показывает, что на основе гетерогенных сред можно рассчитывать на создание материалов и различных устройств с управляемыми оптическими характеристиками.

В третьей главе представлены результаты компьютерного моделирования спектров одномерных диэлектрических фотонных кристаллов с дефектным слоем как из пассивной, так и активной гетерогенной среды металл-диэлектрик.

**Фотонный кристалл** - это материал, структура которого характеризуется периодическим изменением показателя преломления в пространственных направлениях.

- 1) Одномерные, в которых коэффициент преломления периодически изменяется в одном пространственном направлении как показано на Рис. 1.1.



Рисунок 1. Схематическое представление одномерного фотонного кристалла.

- 2) Двухмерные, в которых коэффициент преломления периодически изменяется в двух пространственных направлениях как показано на Рис. 1.2.

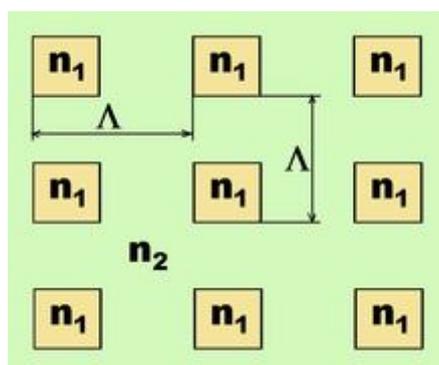


Рисунок 2. Схематическое представление двумерного фотонного кристалла.

### Основные свойства фотонных кристаллов

Фотонные кристаллы по поведению их оптических свойств можно классифицировать как **линейные, дисперсионные и нелинейные ФК**.

Если показатель преломления не зависит от длины волны электромагнитного излучения и его интенсивности, то ФК такого типа называют **линейным ФК**. Если показатель преломления зависит от длины волны, то ФК называют **дисперсионным** (например, металлические ФК, которые в комбинации с диэлектрическими материалами могут быть названы металлодиэлектриками). Если показатель преломления зависит от интенсивности электромагнитного излучения, то фотонный кристалл называют **нелинейным**.

В настоящее время огромный интерес исследователей во всем мире привлекают гетерогенные среды, состоящие из ансамбля металлических или

полупроводниковых наночастиц, находящихся в оптически прозрачной диэлектрической матрице (А.Н. Ораевский, И. Е. Проценко, С. Я. Ветров, А. Ю. Авдеева, И. В. Тимофеев).

Методы получения таких структур, включая, ионную имплантацию, химическое легирование и другие комплексные методики интенсивно разрабатываются в ведущих научных центрах. Такие среды могут иметь аномально высокий коэффициент преломления, значительно превосходящий достижимые в настоящее время значения, что позволит создать микроминиатюрные лазеры, нелинейные преобразователи частоты излучения и ряд других устройств. Такие системы весьма перспективны для разработки нового поколения устройств интегральной оптики и оптоэлектроники, так как для них характерен нелинейный отклик на воздействие фемтосекундного лазера.

Кратко рассмотрим оптические, в частности, резонансные, свойства гетерогенной среды, состоящей из малых металлических шаров, распределенных в другом материале.

Для указанных сред используется формула Максвелла – Гарнета [5]

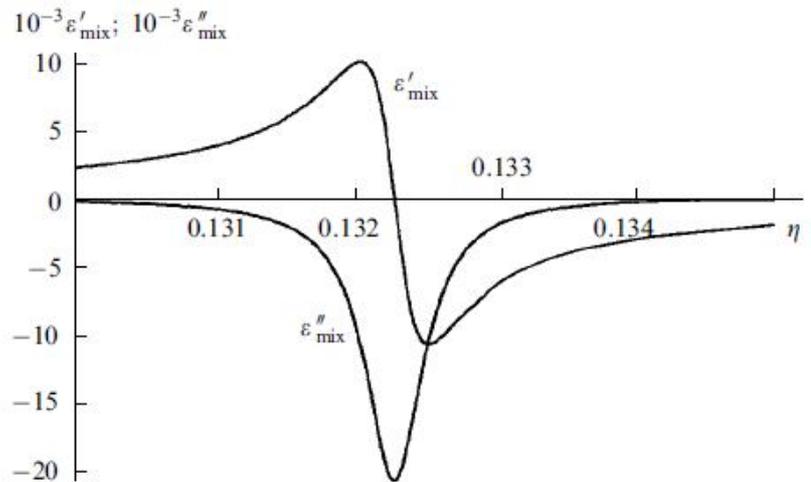
$$\frac{\epsilon_{\text{mix}}(\lambda) - \epsilon_{\text{m}}(\lambda)}{\epsilon_{\text{mix}}(\lambda) + 2\epsilon_{\text{m}}(\lambda)} = \sum_j \eta_j \frac{\epsilon_{\text{bj}}(\lambda) - \epsilon_{\text{m}}(\lambda)}{\epsilon_{\text{bj}}(\lambda) + 2\epsilon_{\text{m}}(\lambda)}.$$

Кривые на рис. 3 [4] имеют выраженный резонансный характер, причем в окрестности резонансных точек  $\epsilon'_{\text{mix}}(g)$  и  $\epsilon''_{\text{mix}}(g)$  существенно больше, чем соответствующие величины исходных материалов.

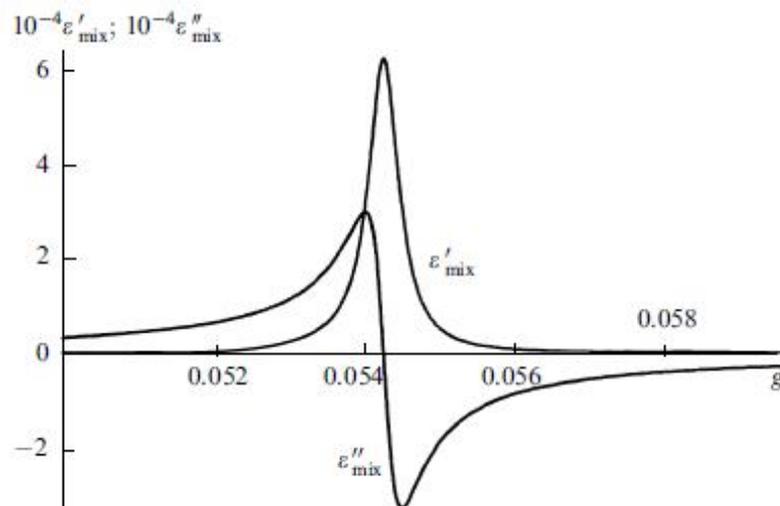
В качестве примера рассмотрим среду, изготовленную из серебряных наночастиц, распределённых в GaAs с показателем преломления, равным 3.6. Возьмём длину волны равной  $\lambda_0=0.8$  мкм. Кривые на рис. 3 [4] имеют выраженный резонансный характер, причем в окрестности резонансных точек  $\epsilon'_{\text{mix}}(g)$  и  $\epsilon''_{\text{mix}}(g)$  существенно больше, чем соответствующие величины исходных материалов.

В гетерогенной среде с металлическими наночастицами возникает своеобразный «внутренний резонанс». Этот резонанс является «отголоском» плазменного резонанса, который присущ отдельному металлическому шару. В рассматриваемой нами смеси положение резонансной частоты (длины волны) зависит как от диэлектрической проницаемости исходных материалов, так и параметра  $\eta$ . Отметим, что оптические свойства,

взвешенных в воздухе металлических наночастиц будут существенно отличаться от свойств сплошной металлической среды.



**Рисунок 3.** [4] Функции  $\epsilon'_{mix}(g)$  и  $\epsilon''_{mix}(g)$  для серебряных наночастиц, взвешенных в активной лазерной матрице, при  $\lambda = 0.8$  мкм,  $n_m = 3.6$ ,  $\eta = 0.1322$



**Рисунок 4.** [4] Функции  $\epsilon'_{mix}(g)$  и  $\epsilon''_{mix}(g)$  для серебряных наночастиц, взвешенных в активной лазерной матрице, при  $g > g_{cr}$ ,  $\lambda = 0.8$  мкм,  $n_m = 3.6$ ,  $\eta = 0.054$ .

Для серебра и GaAs при  $\lambda = 0.8$  мкм имеем  $g_{cr} = 0.05$ , что соответствует коэффициенту усиления  $\kappa = (2\pi/\lambda)g \approx 4 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$ . Такой коэффициент является высоким, но он достигается только в экспериментах.

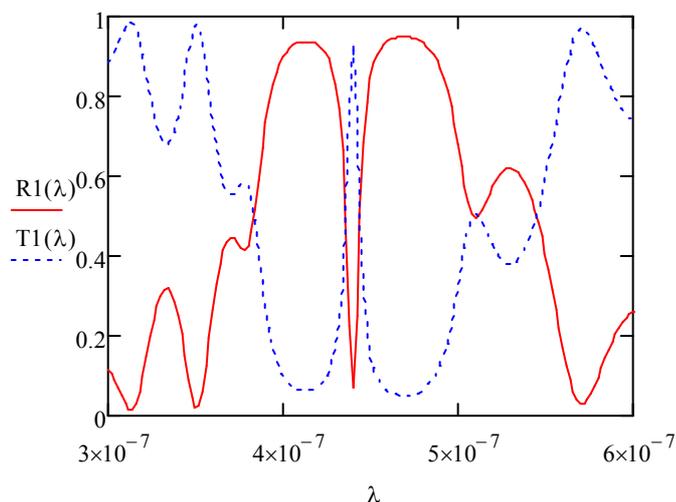
В связи с вышеизложенным гетерогенные среды могут получить широкое распространение при разработке и изготовлении нового поколения приборов интегральной оптики и оптоэлектроники (повышение разрешающей способности оптических микроскопов, управление направлением распространения светового луча, включая самофокусирующие устройства,

создание миниатюрных высококачественных линз и других оптических элементов).

В третьей главе приведены результаты компьютерного моделирования спектров отражения одномерных фотонных кристаллов как бездефектных, так и с дефектами, в качестве которых использованы слои из пассивных и активных гетерогенных сред с разным коэффициентом усиления.

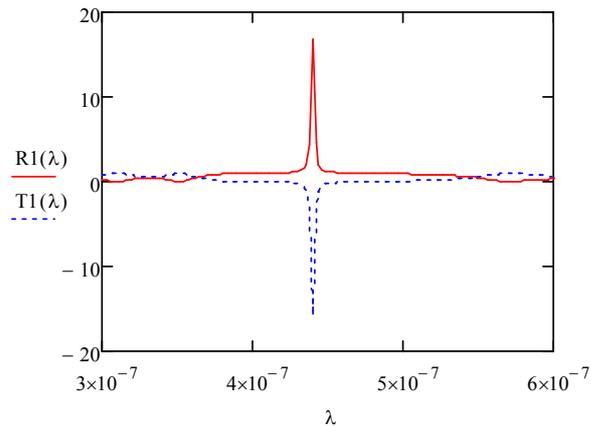
В качестве 1D фотонного кристалла использовалась периодическая структура  $ZrO_2$  и  $SiO_2$ :

Два диэлектрических слоя 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.



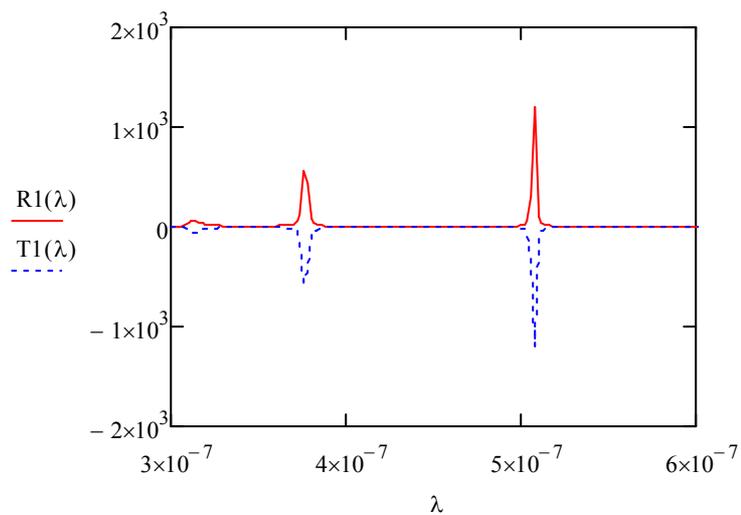
**Рисунок 5.** Спектр отражения 1D- ФК ( серебряные наночастицы, взвешенные в прозрачной матрице, при  $\eta=0.1322$  и  $g=0$ ).

Как можно видеть из рисунка 5, в спектре отражения, как и ожидалось, появляется дефектная полоса.



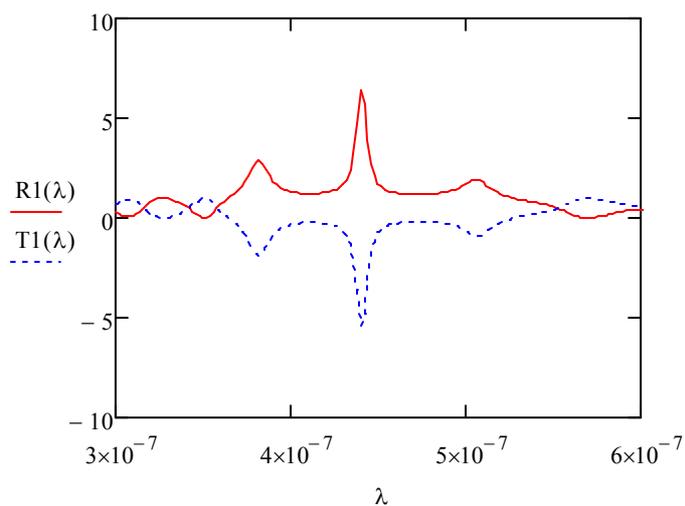
**Рисунок 6.** Спектр отражения 1D- ФК( серебряные наночастицы, взвешенные в активной матрице, при  $\eta=0.1322$  и  $g=0.065$ )

Как можно видеть из рисунка 6, при значении  $g=0.065$  (коэффициент усиления) наблюдается значительное усиление в дефектной полосе спектра отражения.



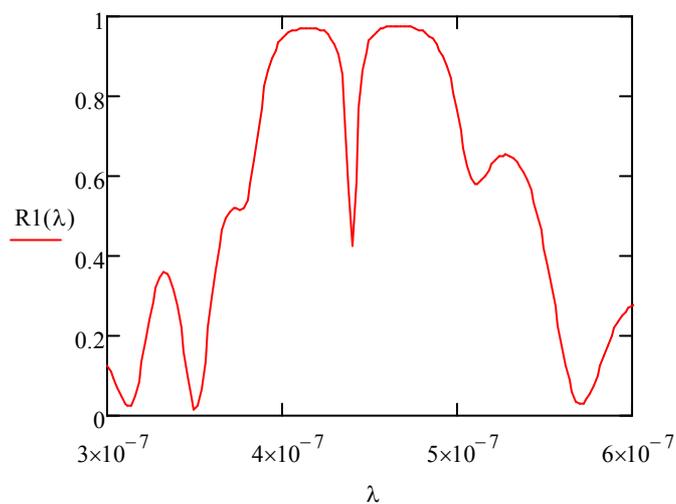
**Рисунок 7.** Спектр отражения 1D- ФК( серебряные наночастицы, взвешенные в активной матрице, при  $\eta=0.1322$  и  $g=0.6$ )

Как видно из рисунка 7, с увеличением до  $g=0.6$  (коэффициента усиления) наблюдаем два пика усиления в дефектной полосе спектра отражения. На наш взгляд, появление указанных пиков в спектре отражения можно объяснить эффектом расщепления частоты дефектной моды, который возникает при совмещении резонансной частоты гетерогенной среды с частотой дефектной моды (при том же значении фактора заполнения).

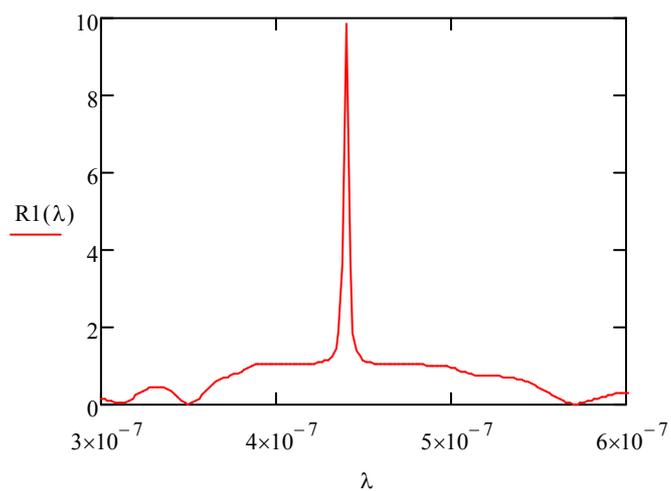


**Рисунок 8.** Спектр отражения 1D- ФК( серебряные наночастицы, взвешенные в активной матрице, при  $\eta=0.1322$  и  $g=0.16$ )

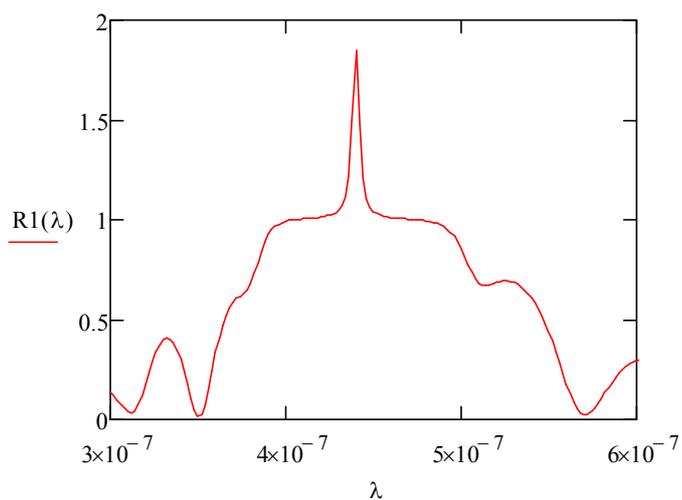
Как можно видеть из рисунка 8, при уменьшении коэффициента до  $g= 0.16$  наблюдается усиление в дефектной полосе спектра отражения (при этом также можно заметить эффект расщепления дефектной моды).



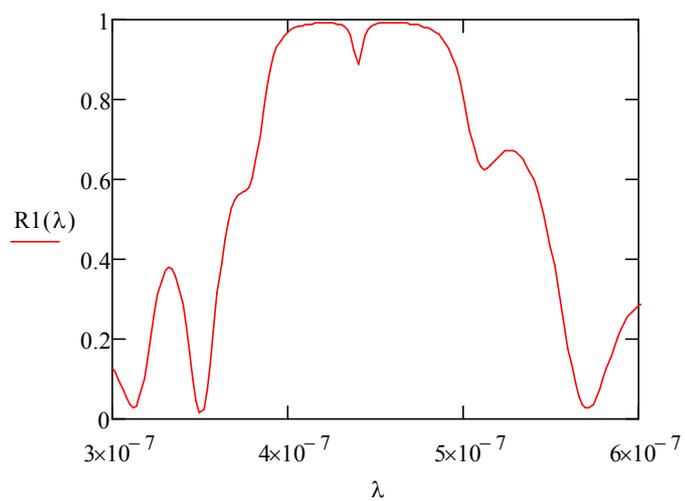
**Рисунок 9.** Спектр отражения 1D- ФК( серебряные наночастицы, взвешенные в активной матрице, при  $\eta=0.1322$  и  $g=0.01$ )



**Рисунок 10.** Спектр отражения 1D- ФК( серебряные наночастицы, взвешенные в активной матрице, при  $\eta=0.1322$  и  $g=0.06$ )



**Рисунок 11.** Спектр отражения 1D- ФК( серебряные наночастицы, взвешенные в активной матрице, при  $\eta=0.1322$  и  $g=0.04$ )



**Рисунок 11.** Спектр отражения 1D- ФК( серебряные нанопшары, взвешенные в активной матрице, при  $\eta=0.1322$  и  $g=0.03$ )

## **Заключение. Основные результаты работы.**

1. Рассмотрены классификация, способы изготовления и применение фотонных кристаллов. Кратко рассмотрены методы расчета спектров отражения одномерных фотонных кристаллов, при этом основное внимание уделено матричному методу расчета.
2. Кратко рассмотрены оптические свойства гетерогенных сред, представляющих собой смеси из металлических шаров, погруженных в прозрачный диэлектрик.
3. Представлены результаты компьютерного моделирования спектров отражения однородных фотонных кристаллов с дефектным слоем как из пассивной, так и активной гетерогенной среды. Моделирование проводилось с использованием пакета программ MathCAD(в предположении 3D-дефектного слоя).
4. Результаты моделирования показывают, что при изменении коэффициента усиления активной среды (нанокомпозита металл – диэлектрик) при заданной величине фактора заполнения проявляется эффект расщепления частоты дефектной моды, возникающий при совмещении резонансной частоты нанокомпозита с частотой дефектной моды.

## Библиографический список

1. Названов В.Ф. Фотонные кристаллы в примерах и задачах.-Саратов: изд-во ООО»Новый ветер, 2015.-144с.
2. Кособукин, В.А. Фотонные кристаллы /В.А. Кособукин //Окно в Микромир. - 2002 г.
3. Ораевский А.Н., Проценко И.Е. Оптические свойства гетерогенных сред.// Квантовая электроника. 2001. Том 31. № 3. С. 252 – 256.
4. Займидорога О. А., В.Н. Самойлов, И. Е. Проценко. Проблема получения высокого показателя преломления и оптические свойства гетерогенных сред. Физика элементарных частиц и атомного ядра 2002, Т. 33. Вып. 1.С. 101-157.
5. Ветров С.Я., Авдеева А.Ю., Тимофеев И.В. Особенности спектральных свойств одномерного фотонного кристалла с резонансным дефектным слоем нанокompозита.// ЖЭТФ. 2011. Том 140. Вып. 5 (11). Стр. 871 -878.
6. Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. М.: Мир, 1987.