

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

**ОПТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ОТРАЖЕНИЯ ОДНОМЕРНЫХ ФОТОННЫХ
КРИСТАЛЛОВ С ДЕФЕКТНЫМ СЛОЕМ ИЗ АКТИВНОЙ СРЕДЫ**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса

направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

факультета нано– и биомедицинских технологий

Горелова Андрея Рамилевича

Научный руководитель

профессор, д.ф.–м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

В.Ф.Названов

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.–м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

Д.А.Усанов

инициалы, фамилия

Саратов, 2017

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность данной темы обусловлена тем, что фотонные кристаллы способны, не только заменить традиционные элементы оптических систем, но и стать основой для фотонных интегральных схем. Такая замена позволит резко сократить высокое энергопотребление, характерное для всех ЭИС, а также увеличить тактовые частоты и скорость передачи данных за счет более высокой скорости распространения оптического луча по сравнению с фазовой скоростью электрического сигнала. Также с помощью внедрения дефектов в ФК мы можем управлять шириной запрещенной зоны, длиной волны и спектрами отражения и пропускания в периодических структурах, что очень важно для настройки или создания приборов узкой специализации.

Целью данной курсовой работы является компьютерное моделирование одномерных фотонных кристаллов на основе периодических структур с дефектным слоем из активной среды.

Задачи:

- Анализ научной информации по теме работы;
- Рассмотрение основных методов расчета спектров отражения, в частности, одномерных фотонных кристаллов без и с дефектами.
- Компьютерное моделирование спектров отражения, одномерных фотонных кристаллов с дефектным слоем из активной среды в математическом пакете MathCAD и обобщение результатов.

Основное содержание работы

В первой главе приведено определение фотонным кристаллам. Рассмотрены основные типы фотонных кристаллов по поведению их оптических свойств (линейные, дисперсионные, нелинейные). Классифицированы ФК также по периодичности изменения показателя преломления на одно-, двух- и

трехмерные ФК. Кратко рассмотрены области применения и дальнейшие перспективы использования ФК. Также рассмотрены методы управления оптическими свойствами фотонного кристалла. Отмечается роль вносимых дефектов в структуру ФК.

Во второй главе показаны программы расчета спектров отражения одномерных фотонных кристаллов, методами характеристических матриц (передачи), а также связанных мод (волн) с применением пакета программ MathCAD.

В третьей главе проведен анализ спектров отражения и пропускания одномерного ФК с дефектным слоем из активной среды, выполненным в виде халькогенидного полупроводникового стекла и продемонстрирована возможность управления дефектными модами за счет варьирования коэффициентов преломления дефекта и толщин слоев материнского кристалла.

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

Фотонные кристаллы по поведению их оптических свойств можно разделить на линейные, дисперсионные и нелинейные ФК.

Также фотонные кристаллы делятся на три класса по характеру изменения коэффициента преломления.

Одномерные фотонные кристаллы, в которых коэффициент преломления периодически изменяется в одном пространственном направлении. Такие фотонные кристаллы состоят из параллельных друг другу слоев различных материалов с разными коэффициентами преломления и могут проявлять свои свойства в одном пространственном направлении, перпендикулярном слоям. Схематическое представление одномерного фотонного кристалла показано на рисунке 1.1 (в).

Двумерные фотонные кристаллы, в которых коэффициент преломления периодически изменяется в двух пространственных направлениях. Фотонный

кристалл создан прямоугольными областями с коэффициентом преломления n_1 , которые находятся в среде с коэффициентом преломления n_2 . При этом, области с коэффициентом преломления n_1 упорядочены в двумерной кубической решетке. Такие фотонные кристаллы могут проявлять свои свойства в двух пространственных направлениях, и форма областей с коэффициентом преломления n_1 не ограничивается прямоугольниками, а может быть любой (окружности, эллипсы, произвольная и т.д.). Кристаллическая решётка, в которой упорядочены эти области, также может быть другой, а не только кубической. Схема такого ФК представлена на рисунке 1.1 (б).

Трехмерные фотонные кристаллы, могут проявлять свои свойства в трех пространственных направлениях, их можно представить, как массив объемных областей (сфер, кубов и т.д.), упорядоченных в трехмерной кристаллической решётке.

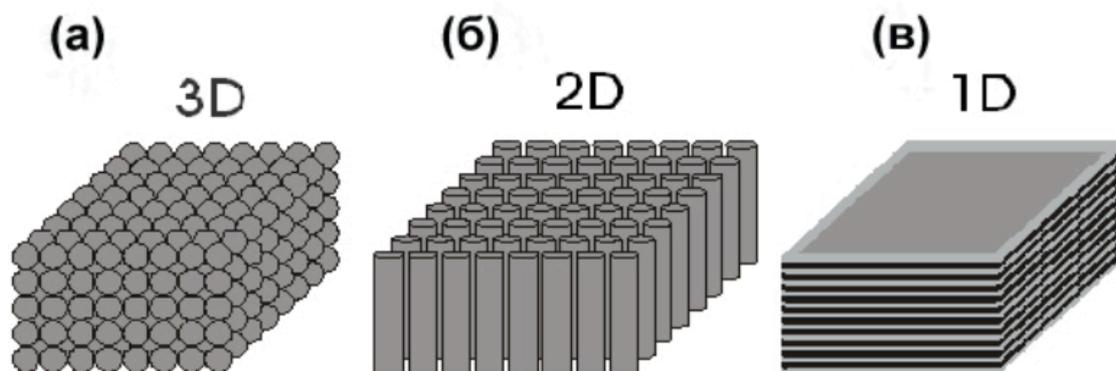


Рисунок 1.1 – Типы фотонных кристаллов различной размерности:

- (а) – трехмерный фотонный кристалл; (б) - двумерный фотонный кристалл;
(в) - одномерный фотонный кристалл

Применение фотонных кристаллов

Первое применение фотонного кристалла – создание световедущих каналов.

Второе применение – это спектральное разделение каналов.

Третье – кросс для световых потоков.

С их помощью фотонных кристаллов можно сузить диапазон длин волн излучения в полупроводниковых лазерах и эмиссионных диодах или создать оптические фильтры с высокой селективностью. Главный недостаток существующих эмиссионных диодов и полупроводниковых лазеров в том, что они испускают фотоны в большой телесный угол и в широком частотном диапазоне. На основе фотонных кристаллов можно создать зеркало, которое будет отражать определенную волну света для любого выбранного угла и направления [6].

Дефекты в фотонном кристалле

Любая неоднородность в фотонном кристалле называется дефектом фотонного кристалла.

Рассмотрим основные типы дефектов в одномерных периодических структурах:

- дефекты внедрения (введение в структуру дополнительного слоя материала),
- дефекты инверсии (изменение порядка следования слоев),
- дефекты замещения (замещение в одном из периодов структуры одного из слоев периода слоем другого материала этой же структуры),
- дефекты перестановки (изменение порядка следования слоев в одном из периодов структуры) и другие.

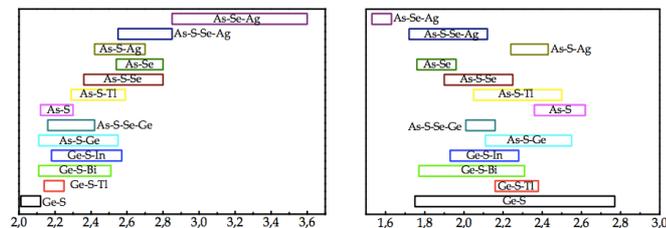
В нашем случае материалом дефектного слоя будет халькогенидное полупроводниковое стекло на основе As–Se.

Величина изменений зависят от состава, режимов и условий изготовления образца, его толщины, температуры в процессе облучения и ряда других факторов. В таблице 1 приведены характеристики фотоиндуцированных изменений оптических свойств пленок системы As–Se с разным соотношением компонентов (см. также рис. 1.3).

Таблица 1 – Характеристика фотоиндуцированных изменений оптических свойств пленок системы As-Se [9]

Состав	Излучение, нм	Т записи, К						Температура размягчения, К	Температура стирания, К
			S, см ² /Дж*	Изменение ширины запрещенной зоны, эВ	Контраст	Изменения показателя преломления			
						неревверсивные	реверсивные		
Se	Белый свет	88	-	-	-	-	-	305 ± 2	190-210
As ₂ Se ₇	633	300	0,13-0,15	-	1,4-1,6	≤0,02	-	389 ± 2	300-400
As ₂ Se ₅	633	300	0,22-0,25	0,025	1,8-2,2	≤0,02	-	408 ± 2	418-428
As ₂ Se ₃	633	300	0,9-1,1	0,06	≤8,0	0,13	0,02	464 ± 2	463-473
AsSe	633	300	0,5-0,6	0,145	80-100	0,21	0,13	455 ± 2	463-468
As ₃ Se ₂	633	300	0,5-0,6	0,19	180-200	0,30	0,24	414 ± 2	463-468

Халькогениды – бинарные химические соединения халькогенов (элементов 6-й группы периодической системы, которым относятся кислород, сера, селен, теллур, и др.) с металлами.



Показатель преломления, n (при $\lambda = 1,5$ мкм)

Оптическая ширина запрещенной зоны [эВ]

Рисунок 1.3 – Композиционная вариация показателя преломления и оптической полосовой щели тонких пленок халькогенидного стекла

Халькогенидные стекла, как подразумевается последним термином, характеризуются отсутствием дальнего порядка в расположении структурных единиц внутри стеклообразной сети и, следовательно, по своей природе – метастабильны.

Метод расчета спектров отражения одномерных фотонных кристаллов без и с дефектом с помощью характеристических функций

Результаты компьютерного моделирования спектров отражения одномерных ФК с дефектным слоем из активной среды.

В качестве 1D- фотонного кристалла использовалась периодическая структура ZrO_2 и SiO_2 . Два диэлектрических слоя с показателями коэффициентов преломления $n_1 = 2,0$ и $n_2 = 1,457$ соответственно.

Число периодов первого слоя $N = 6$, второго слоя $b = 3$, толщины слоев $h_1 = h_2 = 0,2 \cdot 10^{-6}$, угол падения равен нулю.

Изначально ФК кристалл настроен при таких толщинах, что центру ФЗЗ соответствует длина волны 1.5 мкм. Это длина волны очень важна для оптоволоконной оптической связи [2].

На рисунке 3.1 показаны спектры отражения и пропускания для материнского фотонного кристалла.

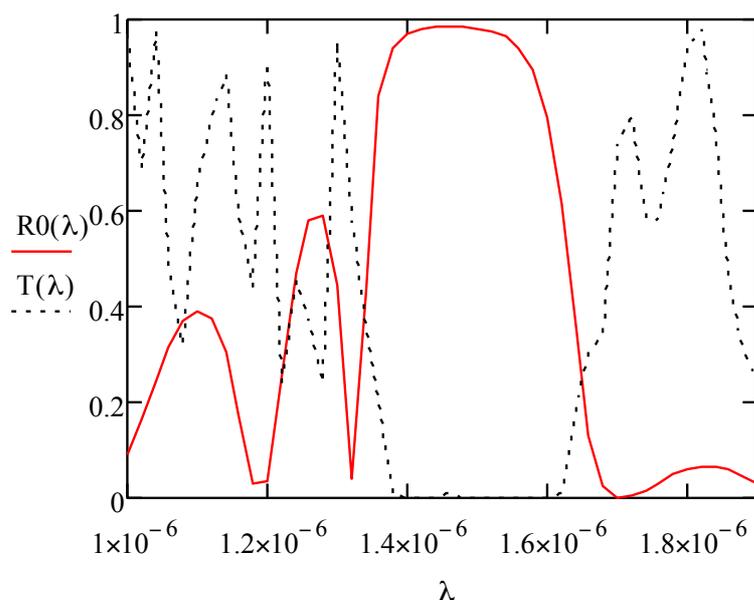


Рисунок 3.1 - Спектр отражения 1D- ФК (R_0 – спектр отражения, T – спектр пропускания)

Введем в эту периодическую структуру дефектный слой в виде халькогенидного полупроводникового стекла на основе As–Se. Толщина дефектного слоя равна 1 мкм. Структура нашего ФК выглядит как, N периодов – дефект – b периодов – дефект.

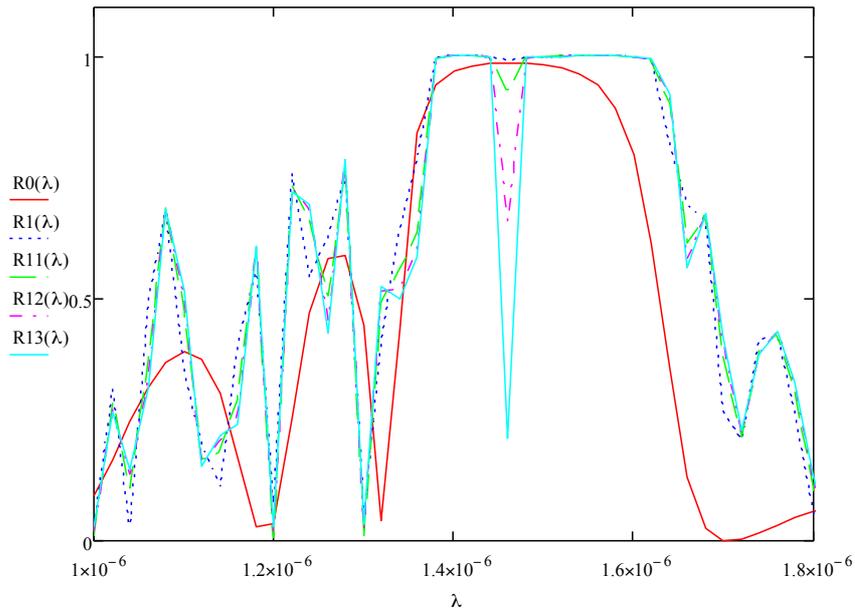


Рисунок 3.2 – Спектры отражения 1D- ФК с дефектом

На рисунке 3.2 мы можем видеть динамику усиления спектра отражения с помощью изменения коэффициентов преломления дефектного слоя.

R_0 соответствует спектру отражения материнского ФК без дефекта.

Коэффициенты преломления в дефектном слое $R_1 = 2.5$, $R_{11} = 2.52$, $R_{12} = 2.526$, $R_{13} = 2.529$.

При R_1 все еще наблюдается чистая ФЗЗ.

При R_{11} при изменении коэффициента преломления на 0,02 у нас появляется небольшой диапазон дефектной волны.

При R_{13} изменение коэффициента преломления на 0,029, Появляется полоса, в которой коэффициент отражения в ФЗЗ падает, это устройство начинает пропускать длину волны 1,5 мкм. и мы можем при помощи варьирования толщин дефектного слоя этой полосой управлять (рисунок 3.4).

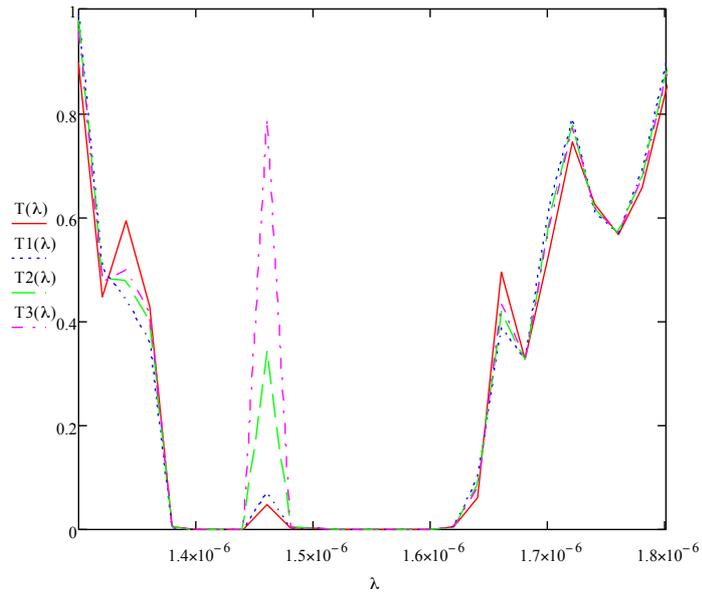


Рисунок 3.3 – Спектры пропускания 1D- ФК при тех же значениях коэффициента преломления

Подбором заданных толщин слоев можно ФЗЗ настроить на любую длину волны, что видно на рисунке 3.5.

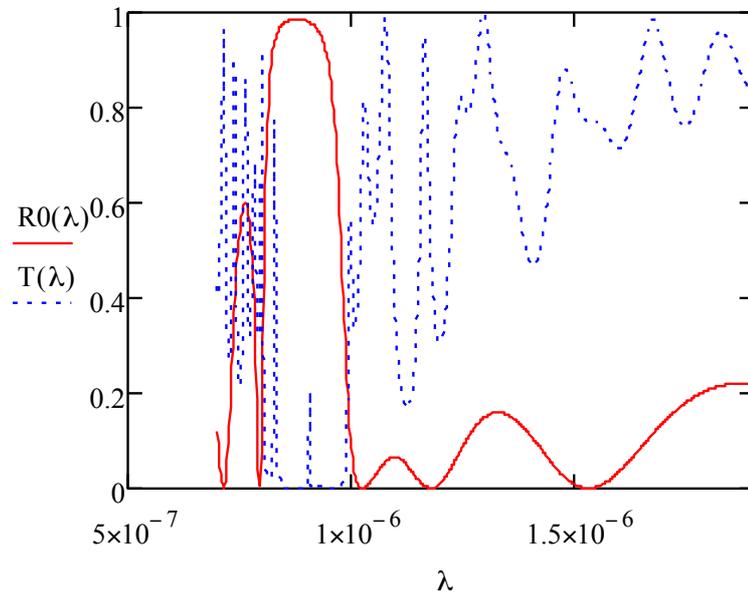


Рисунок 3.5 - Спектры отражения 1D- ФК

Исследуя данную периодическую структуру был найден экстремум, при значениях коэффициента преломления 2,52929 (рисунок 3.4)

В этом диапазоне эффект поглощения не учитывается, все среды прозрачны, то есть коэффициент преломления не имеет дисперсии.

$$2,52928 = 0.20174 \quad \mathbf{2,52929 = 0.20173} \quad 2,5293 = 0.20174$$

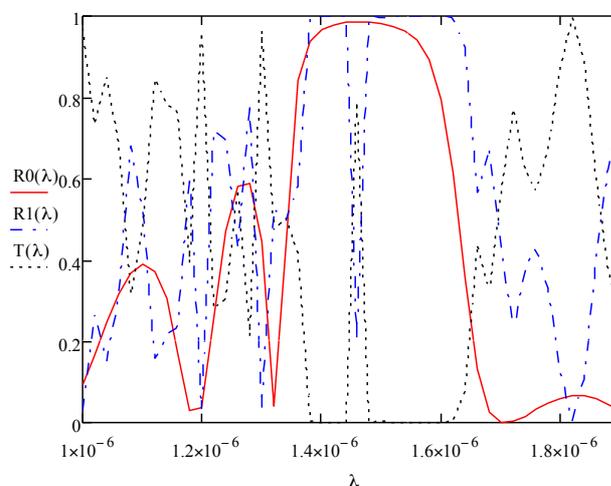


Рисунок 3.4 – Спектр отражения 1D- ФК

Стеклообразные полупроводники позволяют изменять коэффициент преломления при освещении в пределах 0,02 – 0,24 (исходя из таблицы 1, см. главу 1). Также вместо стеклообразного полупроводника мы можем использовать другой материал, если у него изменяется коэффициент преломления под действие освящения.

Вывод: мы имеем возможность управлять дефектной полосой по амплитуде отражения и пропускания варьируя коэффициент преломления дефектного слоя, который в нашем случае является стеклообразным материалом.

Представленные результаты компьютерного моделирования, демонстрирующие спектры отражения одномерного фотонного кристалла с дефектом из активной среды, позволяют сделать вывод, что мы имеем возможность управлять дефектной полосой по амплитуде отражения и пропускания варьируя коэффициент преломления дефектного слоя, который в нашем случае является стеклообразным материалом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Названов В.Ф. Фотонные кристаллы в примерах и задачах/ В.Ф. Названов Саратов: изд-во ООО»Новый ветер, 2015.–144с.
2. Названов В.Ф. Фотонные кристаллы в примерах/ В.Ф. Названов 2013.
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. Айвазов А.А. Неупорядоченные полупроводники / А.А. Айвазов, Б.Г. Будагян, С. П.Вихров, А.И. Попов; Под ред А.А. Айвазова. // М.: Издатель-ство МЭИ, 1995. – 352 с.
9. Fritzsche. H. Toward understanding the photoinduced changes in chalcogenide glasses. *Semiconductors* /H. Fritzsche. Vol.32, No.8, (August 1998), pp. 850-854, ISSN 1063-7826
- 10.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.
- 11.Толмачев В.А. Спектры отражения и области запрещенных фотонных зон одномерного фотонного кристалла на основе периодической структуры Si – воздух./ В.А. Толмачев // Оптика и спектроскопия. 2004. Т. 97. № 2. С. 292-296.
- 12.Абрамов В.В. Фотонные кристаллы с заданной шириной запрещенной зоны / В.В. Абрамов, А.С. Синицкий, Ю.Д. Третьяков // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 86. Вып. 4. С. 370-373.

