

МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.315.592

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛЕГИРОВАННЫХ ТЕРБИЕМ ОДНОМЕРНЫХ
ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ**

Д.С. СИДОРЕНКО, Н.В. ГАПОНЕНКО, Р.А. ДЫНИЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 15 апреля 2009*

Рассмотрена возможность моделирования оптических свойств фотонных кристаллов, выявлено влияние параметров отдельных элементов слоистых структур на результирующие спектральные характеристики. Для расчета использован метод Т-матриц, на основании которого разработана прикладная программа для моделирования свойств одномерных фотонных кристаллов. На основании расчетов предложена структура распределенных брэгговских отражателей для модификации спектров спонтанного испускания тербия в полосе 543 нм.

Ключевые слова: фотонный кристалл, метод Т-матриц, спектральные характеристики, люминесценция.

Введение

Фотонные кристаллы — это оптические материалы, для которых характерно изменение диэлектрической проницаемости с периодом, сравнимым с длиной волны света, следствием чего является наличие связанной с периодичностью кристалла запрещенной зоны, которая обнаруживается как полоса непрозрачности в оптическом спектре структуры. Фотонные кристаллы, благодаря периодическому изменению коэффициента преломления, позволяют получить разрешенные и запрещенные зоны для энергий фотонов, аналогично полупроводниковым материалам, в которых наблюдаются разрешенные и запрещенные зоны для энергии электронов. Фотонные кристаллы предоставляют новые возможности управления световыми потоками благодаря наличию запрещенной зоны в заданной области частот электромагнитного излучения, при этом целенаправленное внесение искажений (дефектов) в структуру кристалла позволяет создавать различные устройства, например волноводы, резонаторы, фильтры, разветвители и др. [1]. В настоящее время внимание как экспериментаторов, так и теоретиков сконцентрировано на исследовании спонтанного испускания люминофоров, в частности, ионов лантаноидов, в диапазоне фотонной запрещенной зоны.

Фотонные кристаллы по характеру изменения коэффициента преломления можно разделить на три основных класса: одномерные, двухмерные и трехмерные (рис. 1).

Как и электрические среды, в зависимости от ширины запрещенных и разрешенных зон, фотонные кристаллы можно разделить на проводники — среды, в которых свет распространяется на большие расстояния с малыми потерями, диэлектрики — практически идеальные в широкой области спектра зеркала, полупроводники — вещества, способные, например, выборочно отражать фотоны определенной длины волны и сверхпроводники, в которых благодаря коллективным явлениям фотоны способны распространяться практически на неограниченные расстояния.

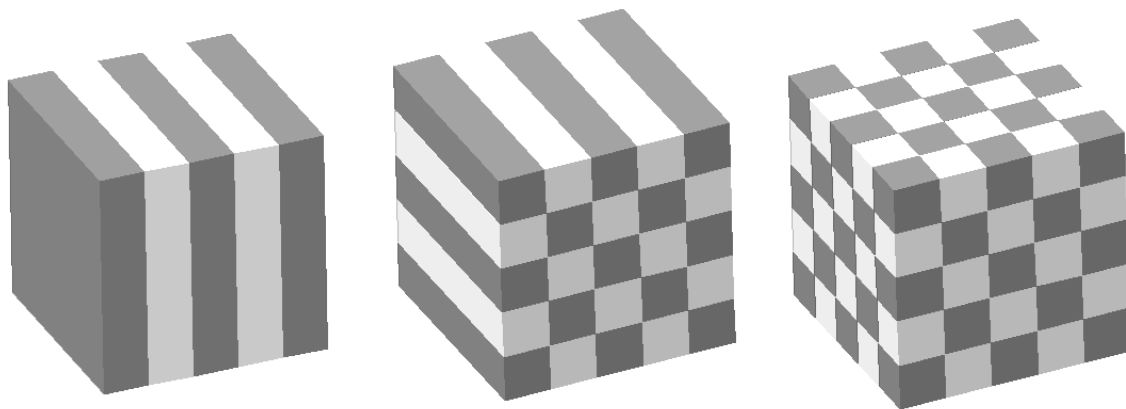


Рис. 1. Схематичное изображение одномерных (а), двумерных (б) и трехмерных (в) фотонных кристаллов

Фотонные кристаллы применяются успешно для формирования нового класса световодов и распределенных брегговских отражателей [2, 3].

В течение последнего десятилетия возрастает интерес к золь-гель методу для формирования не только люминесцентных структур [4, 5], но и распределенных брегговских отражателей [6, 7]. В работе [6] показана возможность сужения полосы и увеличения интенсивности люминесценции для европия в распределенном брегговском отражателе (РБО). Рассмотрено изготовление люминесцентных микрорезонаторов золь-гель методом и изучены их оптические свойства. Было обнаружено увеличение интегральной интенсивности фотолюминесцентной структуры, сужение спектра излучения вдоль оси, перпендикулярной плоскости резонаторов.

Увеличение интенсивности люминесценции частично связано с многократным отражением возбуждающего излучения в многослойной системе, что способствует более эффективному возбуждению лантаноидов. Наличие оптической запрещенной зоны частично подавляет полосу люминесценции, что повышает энергетический выход излучения для разрешенной длины волны.

В настоящее время легированные тербием оксиды рассматриваются как перспективные люминофоры для дисплейных технологий, т.к. трехвалентные ионы тербия обуславливают люминесценцию в видимом диапазоне благодаря оптическим переходам ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_j$ ($j=2; 3; 4; 5; 6$), наиболее интенсивный из которых ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$ соответствует длине волны излучения 543 нм [8]. Интенсивная фотолюминесценция тербия наблюдалась в наночастицах оксида кремния, сформированных методом коллоидной химии, в пленках оксидов кремния и циркония, имплантированных тербием, в пленочных структурах, полученных с использованием золь-гель метода [4, 5, 8].

При изменении типа люминесцирующего иона и длины волны излучения требуется изменение параметров структуры микрорезонатора, имеющей в пределах фотонной запрещенной зоны полосу прозрачности, совпадающей с термом люминесценции иона. Реализация подобных структур значительно упрощается при предварительном моделировании их оптических свойств. В данной работе проведены расчеты, на основании которых предложена структура, состоящая из слоев SiO_2 и TiO_2 , в которой, на наш взгляд, может наблюдаться модификация спонтанного испускания тербия, как наблюдалось недавно для европия [6]. В работе [6] золь-гель методом был сформирован микрорезонатор, состоящий из двух РБО, содержащих семь пар чередующихся четвертьволновых слоев SiO_2 и TiO_2 , и легированный европием средний полуволновой слой SiO_2 . Слои SiO_2 и TiO_2 имеют показатели преломления 1,45 и 2,20 соответственно для длины волны 650 нм.

Теоретический анализ (Методика расчетов)

Для расчета используется метод Т-матриц [9]. Этот метод опирается на теорию оптических свойств однослойных покрытий и рассматривает изменение оптических свойств покрытия по мере постепенного наращивания числа слоев. При этом на каждом этапе наращивания по-

крытия вся совокупность нижележащих слоев и подстилающего вещества трактуется как нечто единое и характеризуется коэффициентами прозрачности и отражения на своей верхней границе. Этот путь ведет к рекуррентным формулам, сравнительно удобным для расчета отдельных частных случаев, но весьма трудно поддающимся качественному анализу.

Одной из разновидностей метода последовательного наращивания слоев является использование аналогии с теорией линий передачи, приведшее к матричной формулировке законов распространения электромагнитных волн в одномерных фотонных кристаллах.

В случае однородной диэлектрической пленки (рис. 2) ее диэлектрическая проницаемость и абсолютный показатель преломления n_1 постоянны и характеристическая матрица имеет вид:

$$\mathbf{M}(z_1) = \begin{bmatrix} \cos(k_0 n_1 z_1) & -\frac{i}{n_1} \sin(k_0 n_1 z_1) \\ -i n_1 \sin(k_0 n_1 z_1) & \cos(k_0 n_1 z_1) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Смысл такой матрицы \mathbf{M} заключается в том, что она связывает x - и y -компоненты электрического (или магнитного) векторов на плоскости $z=0$ с этими компонентами на произвольной плоскости $z=\text{const}$. Следовательно, для того чтобы узнать, как распространяется плоская монохроматическая волна через слоистую среду, последнюю необходимо охарактеризовать лишь соответствующей матрицей \mathbf{M} . По этой причине матрицу \mathbf{M} называют характеристической матрицей слоистой среды. Особый интерес представляет форма характеристической матрицы для случаев слоистой среды, состоящей из тонких однородных пленок (рис. 3).

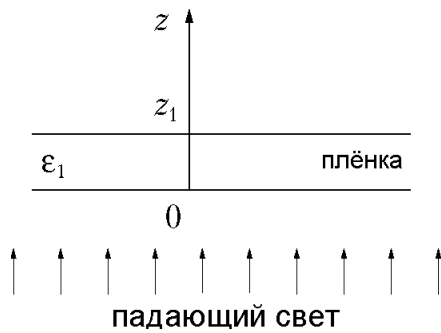


Рис. 2. Схематическое представление одной пленки

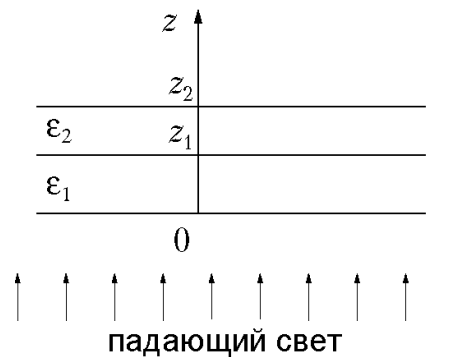


Рис. 3. Схематическое представление слоистой среды из нескольких пленок

Если $\mathbf{M}_1(z)$ и $\mathbf{M}_2(z)$ — характеристические матрицы двух сред, то характеристическую матрицу системы, состоящей из двух смежных сред, можно выразить произведением характеристических матриц отдельных ее составляющих:

$$\mathbf{M}(z_2) = \mathbf{M}_1(z_1) \cdot \mathbf{M}_2(z_2 - z_1). \quad (2)$$

Этот результат можно обобщить на случай непрерывного ряда слоистых сред, расположенных в областях $0 \leq z \leq z_1$, $z_1 \leq z \leq z_2$, $z_2 \leq z \leq z_3$, ..., $z_{N-1} \leq z \leq z_N$. Если $\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2, \dots, \mathbf{M}_N$ — характеристические матрицы сред, то

$$\mathbf{M}(z_N) = \mathbf{M}_1(z_1) \cdot \mathbf{M}_2(z_2 - z_1) \cdot \dots \cdot \mathbf{M}_N(z_N - z_{N-1}) \quad (3)$$

Если элементы характеристической матрицы всей структуры обозначить как $M_{11}, M_{12}, M_{21}, M_{22}$, то конечные формулы для коэффициентов пропускания и отражения запишутся в виде:

$$T = \left| \frac{2}{M_{11} + M_{12} + M_{21} + M_{22}} \right|^2, \quad (4)$$

$$R = \left| \frac{M_{11} + M_{12} - M_{21} - M_{22}}{M_{11} + M_{12} + M_{21} + M_{22}} \right|^2. \quad (5)$$

На основании приведенного метода была разработана прикладная программа для моделирования спектров пропускания и отражения произвольных слоистых структур. Используя ее, мы рассчитали параметры структуры, содержащей два РБО и средний полуволновой слой для люминесценции тербия. Для тербия наиболее интенсивная полоса люминесценции имеет максимум на длине волны 543 нм (переход ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$).

Результаты и их обсуждение

В результате проведенного моделирования предложена структура для изменения спонтанного испускания тербия в полосе с максимумом 543 нм. Для этого, согласно выполненным расчетам, толщина слоя четвертьволнового SiO_2 составляет 93,6 нм, четвертьволнового TiO_2 — 61,7 нм, полуволнового $\text{SiO}_2:\text{Tb}$ — 187,2 нм.

На рис. 4,*а* представлено схематичное изображение используемого в моделируемом микрорезонаторе РБО, состоящего из семи пар четвертьволновых слоев $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2$. На рис. 4,*б* приведен результат моделирования спектра отражения данного РБО, где отчетливо видна неполная фотонная запрещенная зона для диапазона длин волн 480–620 нм.

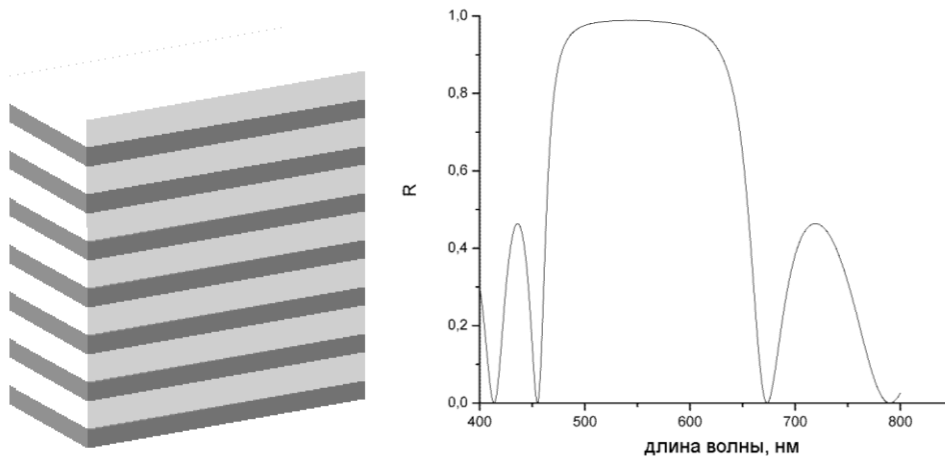


Рис. 4. РБО с соблюдением пропорций толщин слоев: *а* — схематичное изображение (светлый слой соответствует SiO_2 , темный — TiO_2); *б* — спектральная зависимость коэффициента отражения

Особый интерес привлекает возможность введения в такие четвертьволновые структуры дополнительных слоев, в общем случае произвольной, не четвертьволновой толщины. Такие слои будут являться дефектными по отношению к периодической структуре брэгговского зеркала и при этом создавать дополнительные неоднородности в спектрах отражения и пропускания всей слоистой структуры в целом. Такие изменения спектральных характеристик могут привести к образованию фотонных разрешенных зон (участков спектра с низким отражением и, соответственно, высоким пропусканием) непосредственно внутри запрещенной зоны. Примером может служить легированный европием микрорезонатор, рассмотренный в работе [6]. Разрешенная фотонная область приходится на максимум спектра люминесценции европия — 613 нм.

Моделируемая структура микрорезонатора (рис. 5,*а*) состоит из полуволнового слоя SiO_2 , легированного тербием, окруженного сверху и снизу брэгговскими зеркалами (РБО).

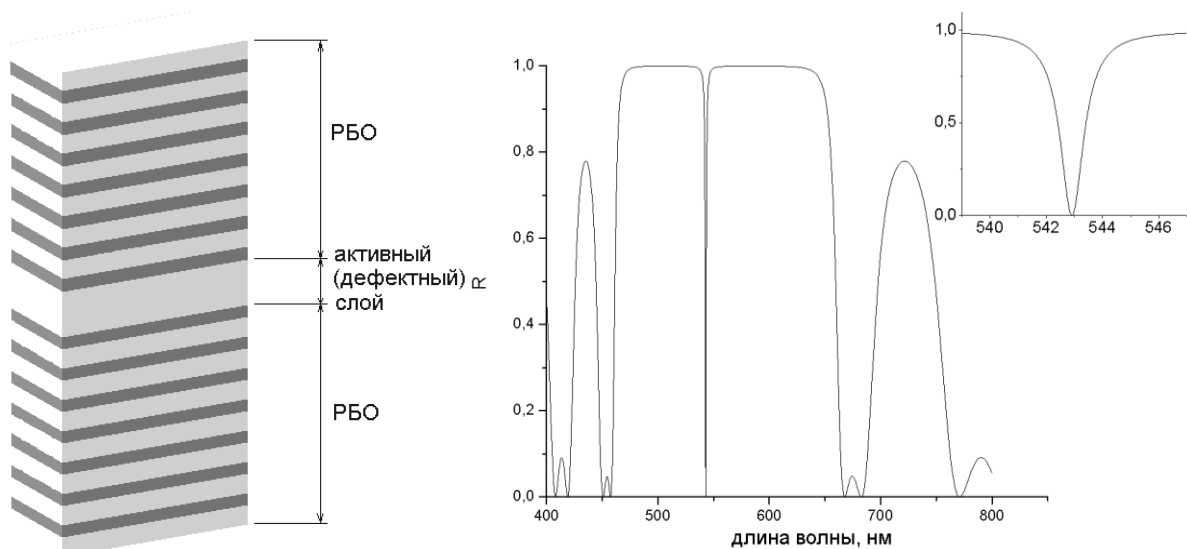


Рис. 5. Микрорезонатор с соблюдением пропорций толщин слоев: *a* — схематичное изображение структуры (светлый слой соответствует SiO_2 , темный — TiO_2); *b* — спектральная зависимость коэффициента отражения

Спектральная характеристика (рис. 5,*b*) показывает, что при введении в структуру среднего слоя (дефекта фотонного кристалла) с оптической толщиной $\lambda/2$, согласно расчетам, в полосе непрозрачности появляется очень узкое окно прозрачности в диапазоне 542–544 нм, которое соответствует максимуму полосы люминесценции Tb^{3+} ($^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_5$).

Описанный нами метод расчета можно использовать для исследования влияния оптической толщины дополнительного слоя на положение разрешенной области в спектральной характеристике структуры (рис. 6).

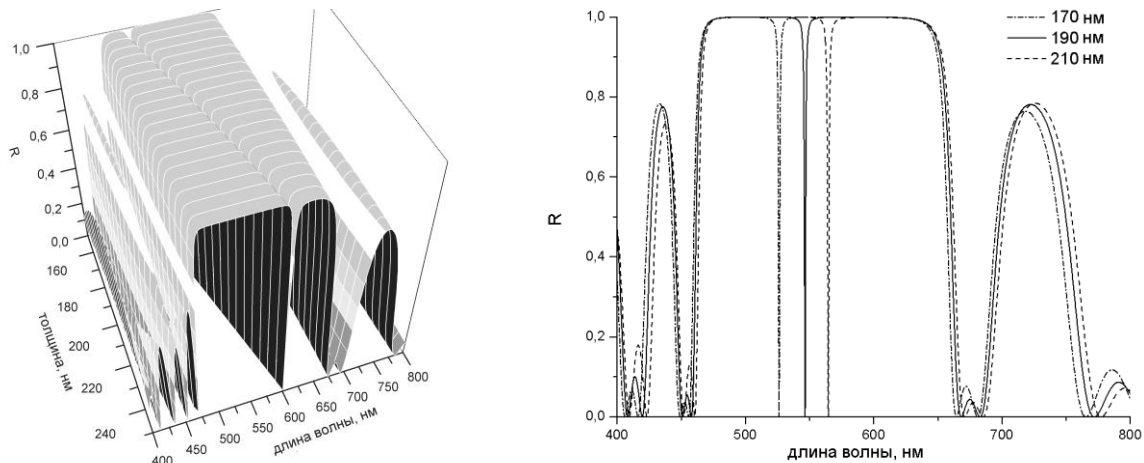


Рис. 6. Спектральные зависимости коэффициента отражения микрорезонатора: *a* — от длины волны падающего излучения и толщины среднего слоя; *b* — зависимости для трех толщин среднего слоя: 170 нм, 190 нм и 210 нм

Из графика видно, что изменением толщины среднего слоя в микрорезонаторе можно эффективно изменять положение полосы прозрачности на всем промежутке запрещенной зоны, в то время как последняя практически не смещается. Таким образом, можно говорить, что в рассмотренной структуре микрорезонатора (рис. 5,*a*) положение полосы непрозрачности определяется сугубо параметрами двух РБО, а положение полосы прозрачности — сугубо параметрами дефектного слоя.

Заклучение

Таким образом, на основании расчетов и моделирования методом Т-матриц предложена структура одномерного фотонного кристалла, состоящая из слоев $\lambda/4$ SiO₂, TiO₂ и среднего (дефектного) слоя SiO₂, легированного тербием. Рассмотрена возможность управления спектральными характеристиками резонатора в диапазоне наиболее интенсивной полосы люминесценции тербия 543 нм. Можно ожидать, что изготовление такой структуры золь-гель методом или методами осаждения пленок в вакууме позволит изучать в ней люминесценцию тербия в условиях перераспределения плотности фотонных состояний.

SIMULATION OF TERBIUM - DOPED ONE DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTAL

D.S. SIDORENKO, N.V. GAPONENKO, R.A. DYNICH

Abstract

Simulation the optical properties of two Bragg mirrors reflectors and Tb-doped cavity is considered using the method of T-matrixes. On the basis of performed calculations multilayered structure comprising layers of SiO₂ and TiO₂ with appropriate thicknesses is proposed. According to the calculations, the proposed structure possesses photonic band-gap, overlapping most intensive photoluminescence band of trivalent terbium ions at 543 nm. Depending on the thickness of terbium-doped active layer the window of transparency within photonic band-gap could be developed at the wavelength of Tb-related emission at 545 nm. Fabrication of the simulated structure could be useful for inhibition Tb spontaneous emission in one-dimensional photonic band-gap material.

Литература

1. *Joannopoulos J.D., Villeneuve P.R., Fan S.* // Nature. 1997. Vol. 386, № 6621. P. 143–147.
2. *Желтиков А.М.* // Успехи физических наук. 2000. Т. 170, Вып. 11. С. 1203–1215.
3. *Голубев В.Г., Дукин А.А., Медведев А.В.* // Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35, Вып. 10. С. 1266–1274.
4. *Gaponenko N.V.* // Acta Physica Polonica. 2007. Vol. 112. P. 737–749.
5. *Гапоненко Н.В., Молчан И.С., Лютнич А.А. и др.* // Докл. БГУИР. 2004. № 2. С. 130–142.
6. *Bellessa J., Rabaste S., Plenet J.C. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2001. Vol. 79, N. 14. P. 2142–2144.
7. *Hong X.K., Hu G.J., Chen J. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 89, № 082902. 3 pages.
8. *Маляревич Г.К., Гапоненко Н.В., Мудрый А.В. и др.* // Физика и техника полупроводников. 2009. Т. 43, Вып. 2. С. 170–173.
9. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики: Пер. с англ. / Под. ред. Г.П. Мотулевич. М., 1970.