

УДК 535.33

СПЕКТРЫ ОТРАЖЕНИЯ И ПРОХОЖДЕНИЯ ОДНОМЕРНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА С ДЕФЕКТОМ ИЗ МОНОСЛОЯ НАНОЧАСТИЦ

© 2012 С.Г. Моисеев^{1,2}, В.А. Остаточников¹

¹Ульяновский государственный университет

²Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Поступила в редакцию 20.11.2012

Исследованы особенности спектров пропускания и отражения одномерной фотонно-кристаллической структуры со вставкой, представляющей собой диэлектрический слой, в котором размещен монослой металлических наночастиц. Показана возможность влияния на дефектные моды фотонного кристалла путем изменения местоположения плазмонного монослоя.

Ключевые слова: наноплазмоника, фотонный кристалл, дефектная мода

ВВЕДЕНИЕ

Использование в качестве материалов, составляющих ФК, сред с управляемыми свойствами открывает широкие возможности для создания модуляторов, оптических изоляторов, преобразователей поляризации света. Особый интерес вызывают слоисто-периодические структуры на основе сред, имеющих резонансную частотную зависимость магнитной и (или) диэлектрической проницаемостей, в том числе плазмонных нанокомпозитов. Наноконпозиты (НК) могут состоять из изотропных и анизотропных материалов, включая диэлектрики, металлы, полупроводники, сегнетоэлектрики и ферромагнетики. Свойства наноконпозита могут значительно отличаться от свойств образующих его материалов. Этими свойствами можно управлять, варьируя внутренние геометрические параметры (размер и форму включений), а также с помощью внешних полей. Так, характеристики ФК структур на основе активных диэлектрических материалов существенно зависят от величины внешнего электрического поля. Его направление существенно не только по отношению к направлению распространения волны, но и к направлению оси периодичности структуры. Дисперсионные свойства такой структуры во многом определяются частотной и полевой зависимостью диэлектрической проницаемости компонент структуры, наличием диссипации или усиления [1-5].

Одной из современных задач является изучение эффектов в одномерных ФК, содержащих слои наноконпозита (НК) [6-8]. В работе [8] про-

веден анализ спектров отражения и пропускания одномерного ФК с дефектным слоем, выполненным в виде однородного матричного наноконпозита с металлическими наночастицами несферической формы, и продемонстрирована возможность управления дефектными модами за счет варьирования формой наночастиц. В настоящей работе исследуются особенности спектров отражения и прохождения "дефектного" ФК, дефектный слой которого представляет собой наноконпозит с монослоем металлических наночастиц, плоскость которого ориентирована перпендикулярно оси периодичности ФК.

1. КОЭФФИЦИЕНТЫ ОТРАЖЕНИЯ И ПРОПУСКАНИЯ ФК

Для расчета отражательной и пропускной способностей одномерной плоско-слоистой структуры с внедренным монослоем наночастиц воспользуемся матричным методом для интерфейсов. Под интерфейсом понимается геометрическое место точек (плоскости в рассматриваемом случае), на котором происходит разделение падающей волны на преломленную и отраженную. Частным случаем интерфейса является граница раздела двух сред. Оптические характеристики такого интерфейса определяются френелевскими коэффициентами отражения и пропускания [9]. Поскольку монослой наночастиц, то есть массив наноразмерных частиц, расположенных в одной плоскости, взаимодействует с электромагнитной волной подобно плоской границе раздела двух сред, то есть создает отраженную и преломленную волны, а их углы отражения и преломления подчиняются закону Снеллиуса, он также может рассматриваться как интерфейс с некоторыми собственными

Моисеев Сергей Геннадьевич, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник.

E-mail: serg-moiseev@yandex.ru

Остаточников Владимир Александрович, младший научный сотрудник. E-mail: ost.vld@yandex.ru

коэффициентами отражения и пропускания.

Пусть в слоистой среде имеется N интерфейсов, образванных $N-1$ границами раздела сред и одним монослоем наночастиц. Пространство между интерфейсами заполнено средами с различными показателями преломления n_i ($i = 0 \dots N$). Среда с показателями преломления n_0 и n_N являются полубесконечными. Пусть на слоистую среду в направлении оси z падает плоская монохроматическая волна. Для описания ее распространения в ФК введем следующие обозначения: $E_i(z_i^-)$ – напряженность поля слева от интерфейса с номером i , $E_i(z_i^+)$ – напряженность поля справа от интерфейса с номером i , E_f – напряженность поля волны, распространяющейся “вперед”, E_b – напряженность поля волны, распространяющейся “назад”, ω и $k = \omega/c$ – частота и волновое число.

Согласно введенным обозначениям на интерфейсе с номером m в слое с показателем преломления n_{m-1} напряженности полей распространяющихся навстречу друг другу волн равны $E_f(z_m^-)$ и $E_b(z_m^-)$. На том же интерфейсе, но в слое с показателем преломления n_m они равны $E_f(z_m^+)$ и $E_b(z_m^+)$. Взаимосвязь этих полей на m -ом интерфейсе (слева и справа от него) может быть выражена в виде матричного уравнения:

$$\begin{pmatrix} E_f(z_m^-) \\ E_b(z_m^-) \end{pmatrix} = I_{m-1,m} \begin{pmatrix} E_f(z_m^+) \\ E_b(z_m^+) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$I_{m-1,m} = \frac{1}{t_{m-1,m}} \begin{pmatrix} 1 & -r_{m,m-1} \\ r_{m-1,m} & t_{m-1,m}t_{m,m-1} - r_{m-1,m}r_{m,m-1} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$r_{i,j}$, $t_{i,j}$ – амплитудные коэффициенты отражения и пропускания интерфейса, разделяющего среды с показателями преломления n_i и n_j , при падении световой волны со стороны среды с показателем преломления n_i . В случае плоской границы раздела сред коэффициенты $r_{i,j}$ и $t_{i,j}$ есть френелевские амплитудные коэффициенты отражения и пропускания [9].

Взаимосвязь полей на двух интерфейсах с номерами m и $m+1$, ограничивающих однородный слой с номером m , осуществляется передаточной матрицей одного слоя \hat{F}_m :

$$\begin{pmatrix} E_f(z_m^-) \\ E_b(z_m^-) \end{pmatrix} = \hat{F}_m \begin{pmatrix} E_f(z_m^+) \\ E_b(z_m^+) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\hat{F}_m = \begin{pmatrix} \exp(-i\delta_m) & 0 \\ 0 & \exp(i\delta_m) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где $\delta_m = kn_m d_m$ – фазовая толщина слоя.

Применяя выражения (1) – (4) ко всей слоисто-периодической структуре, получим связь поля

слева от первого интерфейса и справа от последнего интерфейса с номером N :

$$\begin{pmatrix} E_f(z_1^-) \\ E_b(z_1^-) \end{pmatrix} = \hat{G} \begin{pmatrix} E_f(z_N^+) \\ E_b(z_N^+) \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$\hat{G} = I_{0,1} F_1 I_{1,2} F_2 \dots F_{N-1} I_{N-1,N}. \quad (6)$$

Заметим, что в среде N с показателем преломления n_N существует только прошедшая волна, поэтому в (5) следует положить $E_b(z_N^+) = 0$.

Отражательная и пропускная способности всей структуры рассчитывается по формулам

$$T = \left| \frac{1}{\hat{G}_{11}} \right|^2, \quad R = \left| \frac{\hat{G}_{21}}{\hat{G}_{11}} \right|^2. \quad (7)$$

2. СПЕКТРЫ ОТРАЖЕНИЯ МОНОСЛОЯ НАНОЧАСТИЦ

Для анализа свойств ФК с нанокompозитным дефектом в виде монослоя наночастиц, помещенного в диэлектрическую матрицу, необходимо знать амплитудные коэффициенты отражения и преломления монослоя. Аналитический расчет этих коэффициентов является нетривиальной задачей, поэтому в настоящей работе применен численный метод – метод конечных элементов, реализованный в пакете программ физического моделирования COMSOL Multiphysics.

Выберем в качестве объекта моделирования монослой металлических наночастиц вытянутой эллипсоидальной формы с аспектным отношением 1:2, помещенный в диэлектрическую среду с проницаемостью ϵ_m . Пренебрегая поглощением и частотной дисперсией диэлектрика, используемого в качестве матрицы композита, положим параметр ϵ_m постоянной действительной величиной равной 2.25. Для расчета диэлектрической проницаемости металлических наночастиц воспользуемся соотношением теории Друде [9]:

$$\epsilon_p(\omega) = \epsilon_0 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma}, \quad (8)$$

где ω_p – плазменная частота; ϵ_0 – вклад решетки; γ – параметр релаксации. Для определенности при численном анализе в качестве материала наночастиц будем использовать серебро, для которого $\omega_p = 1.36 \cdot 10^{16} \text{ c}^{-1}$, $\epsilon_0 = 5$, $\gamma = 3 \cdot 10^{13} \text{ c}^{-1}$ [9]. Рассмотрим случай, когда оси металлических наночастиц одинаково ориентированы вдоль некоторого направления в плоскости монослоя.

Результаты моделирования оптических свойств монослоя серебряных наночастиц представлены на рис. 1. Видно, что спектры действи-

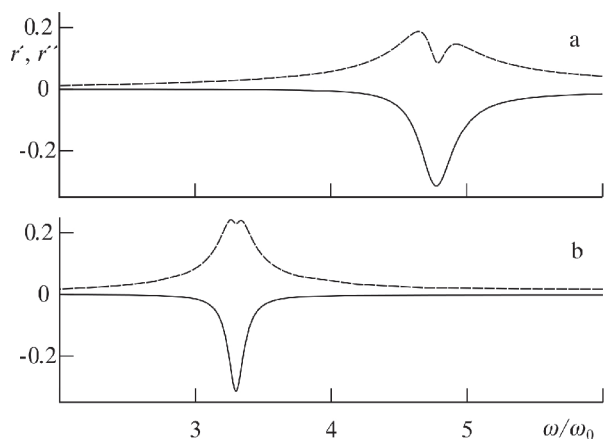


Рис. 1. Действительная и мнимая части (сплошная и пунктир) коэффициента отражения монослоя наночастиц для случаев тангенциальной (а) и продольной (б) ориентации светового вектора. Наночастицы образуют на плоскости квадратную сетку с периодом 140 нм

тельной и мнимой частей амплитудного коэффициента отражения рассматриваемой среды зависят от ориентации осей эллипсоида относительно направления ориентации светового вектора в электромагнитной волне. Наблюдается сдвиг резонансных частот для случаев тангенциальной и поперечной ориентаций осей эллипсоидов относительно направления вектора напряженности электрического поля световой волны. Этот сдвиг обусловлен отличием частот поверхностных плазмонных резонансов наночастиц эллипсоидальной формы: одна из этих частот отвечает колебаниям электронов металла в направлении полярной оси наночастицы, а другая – в перпендикулярном направлении.

Анализ также показывает, что амплитудный коэффициент отражения существенно зависит и от концентрации наночастиц в монослое. С уменьшением расстояния между наночастицами, то есть при увеличении их поверхностной концентрации в монослое, резонансы коэффициента отражения становятся более выраженными, их ширина увеличивается, резонансные частоты смещаются. Таким образом, спектральные характеристики монослоя металлических наночастиц существенно зависят от внутренних геометрических параметров, что позволяет настраивать их резонансы на эффективное взаимодействие со светом в заданном спектральном интервале.

3 АНАЛИЗ СВОЙСТВ ДЕФЕКТНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА С МОНОСЛОЕМ НАНОЧАСТИЦ

Рассмотрим ФК, в котором между двумя диэлектрическими ФК зеркалами, инвертированными относительно друг друга, включен дефект-

ный слой, состоящий из рассмотренной выше диэлектрической матрицы и монослоя наночастиц. Передаточная матрица такой структуры может быть представлена в следующем виде:

$$N = I_{0,1}F_1 \cdots I_{d-1,d}F_{d1}F_sF_{d2}I_{d,d+1} \cdots F_{N-1}I_{N-1,N} = M^aDM^b, \quad (9)$$

где F_s – передаточная матрица монослоя наночастиц, F_{d1} и F_{d2} – передаточные матрицы слоев, обрамляющих монослой наночастиц, M^a и M^b – передаточные матрицы, описывающие ФК зеркала, a и b – число периодов в боковых ФК зеркалах. Период ФК зеркала состоит из двух слоев изотропных диэлектриков с вещественными проницаемостями ϵ_j и толщинами L_j ($j = 1, 2$). Для моделирования оптических свойств структуры выбираем значения $\epsilon_1 = 5.52$ (TiO_2) и $\epsilon_2 = 2.25$ (SiO_2) [11]. Толщина слоев структуры подбиралась равной $L_{1,2} = \lambda_0/4n_{1,2}$, толщина дефектного слоя равна $L_d = \lambda_0/2n_d$, где λ_0 – длина волны в вакууме, рассчитанная для центральной частоты запрещенной зоны. Наличие в ФК дефектного слоя приводит к появлению в фотонной запрещенной зоне узкой спектральной области пропускания с пиковым значением показателя пропускания близким к единице. Дефектная мода пропускания ФК может быть подавлена в случае, когда в нем имеются металлические наночастицы с плазмонным резонансом, лежащим в том же спектральном интервале [7]. Рассмотрим, какое влияние оказывает монослой наночастиц на оптические спектры пропускания и отражения ФК.

На рис. 2 продемонстрировано изменение спектров пропускания и отражения ТЕ моды в структуре M^5DM^5 , в которую добавлен монослой плазмонных наночастиц. Для расчета места расположения монослоя наночастиц в области дефекта использовались следующие соотношения: $L_{d1} = yL_d$, $L_{d2} = L_d - L_{d1}$, $0 < y \leq 1$, где L_d – толщина дефектного слоя, который монослой наночастиц разбивает на две области толщинами L_{d1} и L_{d2} соответственно (область толщиной L_{d1} расположена со стороны падения внешней ЭМВ). Считаем, что размер наночастиц много меньше толщины дефектного слоя. Видно, что при смещении монослоя к краям дефектного слоя, т.е. при значениях $y = 0.05 \div 0.4$ и $0.6 \div 0.95$, происходит полное подавление дефектной моды (а). При небольших смещениях от центра дефектного слоя подавление дефектной моды становится неполным (б, с), а при нахождении монослоя в центре дефектного слоя подавление вообще отсутствует (д).

На рис. 3 продемонстрировано изменение спектров пропускания и отражения в зависимости от положения монослоя в структуре \overline{M}^5DM^5 , которая отличается от структуры M^5DM^5 пере-

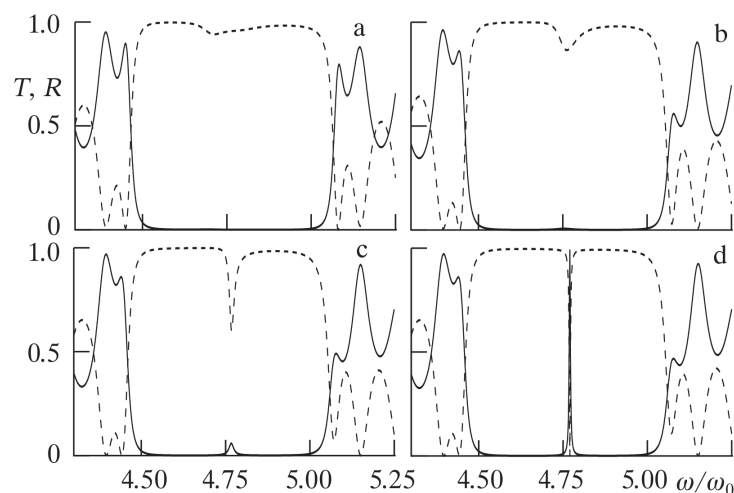


Рис. 2. Спектры пропускания и отражения (сплошная и пунктир) ТЕ моды в зависимости от положения монослоя наночастиц в структуре $M^5 DM^5$. Оси наночастиц направлены перпендикулярно плоскости поляризации волны

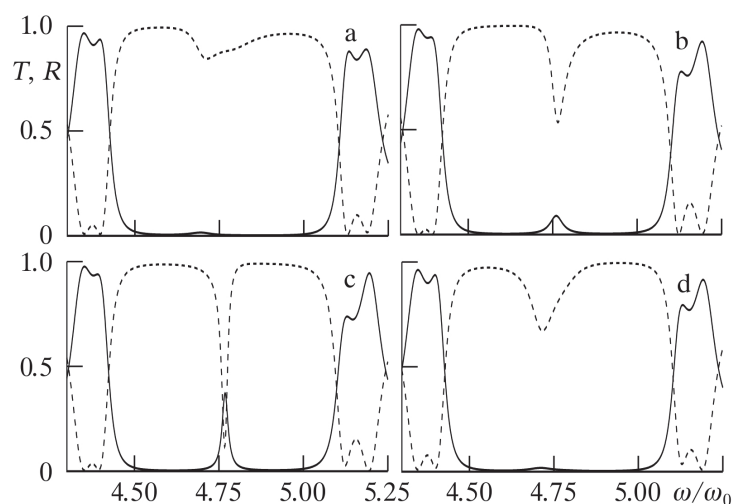


Рис. 3. Спектры пропускания и отражения (сплошная и пунктир) структуры $\bar{M}^5 DM^5$

ставленными зеркалами (остальные параметры те же, что и на рис. 2). В данном случае полное подавление дефектной моды наблюдается при нахождении монослоя вблизи границ раздела дефектного слоя $y = 0.05 \div 0.25$, $0.8 \div 0.95$ и в его центральной области $y = 0.4 - 0.6$ (случай а). При смещении монослоя от центра дефекта, т.е. при значениях $y = 0.25 \div 0.4$ и $0.6 \div 0.8$ (случай b, d), подавление неполное. Максимум пропускания наблюдается при $y = 0.65$ (случай d).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлена возможность управления коэффициентами пропускания и отражения, отвечающих дефектной моде в фотонной запрещенной зоне, за счет использования монослоя металлических наночастиц. Показано, что амплитуда дефектной моды существенным образом зависит от местоположения монослоя наночастиц. В зависимости от используемой конфигурации ФК

(последовательности слоев в ФК-зеркала) дефектная мода может подавляться, когда монослой располагается ближе к краям или, наоборот, к середине дефектного слоя. Зависимость спектральных характеристик дефектных ФК от местоположения плазмонного монослоя обусловлена двумя причинами. Первая из них – разный характер распределения поля по дефектному слою в структурах $M^5 DM^5$ и $\bar{M}^5 DM^5$, что приводит к зависимости от фактора y эффективности взаимодействия ЭМВ с наночастицами монослоя и, как следствие, степени его влияния на спектральные характеристики всего ФК. Вторая причина связана с тем, что наличие монослоя наночастиц приводит к дополнительным интерференционным эффектам внутри дефектного слоя, в результате которых пропускание и отражение дефектного слоя существенно изменяются.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследова-

ний и Федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы” Министерства образования и науки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьев Л.Е., Ивченко Е.Л., Фирсов Д.А., Шалыгин В.А. Оптические свойства наноструктур. Санкт-Петербург: Наука, 2001. С. 188.
2. Гапоненко С.В., Розанов Н.Н., Ивченко Е.Л. и др. Оптика наноструктур. Санкт-Петербург: Недра, 2005. С. 326.
3. Елисеева С.В., Семенов Д.И. Дефектные моды и магнитооптическая активность одномерного магнитофотонного кристалла. // ЖЭТФ, 2011, Т. 139. № 2. С.235-240.
4. Prasad P. Nanophotonics. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2004. P. 415.
5. Дьяченко П.Н., Микляев Ю.В. Одномерный фотонный кристалл на основе нанокompозита: металлические наночастицы – диэлектрик // Компьютерная оптика. 2007. Т. 31. № 1. С.31–34.
6. Ветров С.Я., Авдеева, А.Ю., Тимофеев. И.В. Особенности спектральных свойств одномерного фотонного кристалла с резонансным дефектным слоем нанокompозита // ЖЭТФ. 2011. Т. 140, № 5. С.871–878.
7. Моисеев С.Г., Остаточников В.А., Семенов, Д.И. Подавление дефектной моды в фотонно-кристаллической структуре с резонансным нанокompозитным слоем // Квант. электроника. 2012. Т. 42. № 6. С. 557–560.
8. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. С. 855.
9. Johnson P.B., Christy R.W. Optical Constants of the Noble Metals // Phys. Rev. B. 1972 Vol.6. №12. P. 4370-4379.
10. Tsurumachi N., Yamashita S., Muroi N. et al. Enhancement of nonlinear optical effect in one-dimensional photonic crystal structures // Japanese Journal of Applied Physics. 1999. Vol. 38. Part 1. № 11. P.6302–6308.

REFLECTION AND TRANSMISSION SPECTRA OF ONE-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTALS WITH DEFECTS MONOLAYER OF NANOPARTICLES

© 2012 S.G. Moiseev^{1,2}, V.A. Ostatochnikov¹

¹Ulyanovsky State University

²Ulyanovsk branch of the Institute of Radio Engineering and Electronics named after V.A. Kotelnikov RAS

The features of the transmission and reflection spectra of one-dimensional photonic crystal structure with an insert, which is dielectric layer, which contained a monolayer of metal nanoparticles. The possibility of influence on the photonic crystal defect modes by changing the position of the plasmon monolayer.

Keywords: Nanoplasmonics, photonic crystal defect mode

Sergey Moiseev, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Senior Research Fellow.
E-mail: serg-moiseev@yandex.ru
Vladimir Ostatochnikov, Associate Fellow.
E-mail: ost.vld@yandex.ru