

**Самарский филиал федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Физического института им. П.Н. Лебедева
Российской академии наук**

ФГБОУ ВПО «Самарский государственный университет»

**Самарский научно-образовательный центр
по оптике и лазерной физике**

**XII Всероссийский молодежный Самарский
конкурс-конференция научных работ
по оптике и лазерной физике**

(Самара, 12-15 ноября 2014 года)

Сборник конкурсных докладов

Москва, 2014

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА С ДЕФЕКТОМ ИЗ НАНОКОМПОЗИТА, С УЧЕТОМ РАЗМЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ

П.С. Панкин¹, С.Я. Ветров^{1,2}, И.В. Тимофеев^{1,2}

¹*Сибирский федеральный университет
(660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79)*

²*Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН
(660036, г. Красноярск, Академгородок 50/38)
e-mail: p.s.pankin@mail.ru*

АННОТАЦИЯ

Исследованы спектральные свойства одномерного фотонного кристалла с дефектом структуры, в качестве которого рассмотрен слой изотропного нанокompозита, внедренного между двумя многослойными диэлектрическими зеркалами. Нанокompозит состоит из диспергированных в прозрачной матрице наночастиц золота сферической формы и характеризуется эффективной резонансной диэлектрической проницаемостью. Исследована зависимость спектров пропускания от размера и концентрации наночастиц.

1. ВВЕДЕНИЕ

Фотонные кристаллы (ФК) – это метаматериалы, с периодически меняющимся в пространстве показателем преломления, с периодом, допускающим Брэгговскую дифракцию света. Важным свойством ФК является локализация электромагнитных волн на дефектах структуры. В этом случае в запрещенной зоне (ЗЗ) ФК появляются дополнительные разрешенные уровни, соответствующие локализованным дефектным модам. В случае одномерного ФК, дефектный слой, внедренный между двумя многослойными диэлектрическими зеркалами, проявляет себя как структура типа микрорезонатора Фабри-Перо, а локализованные дефектные моды суть собственные моды микрорезонатора. Положением и коэффициентом пропускания дефектных мод, а также формой и размером ЗЗ можно эффективно управлять, варьируя геометрические и структурные параметры ФК. На основе ФК с дефектными модами созданы новые типы фотоннокристалли-

ческих волноводов, нанорезонаторы с высокой добротностью и низкороговые лазеры, предложены способы повышения эффективности нелинейно-оптических процессов [1,2].

Новые способы управления светом возникают, если в качестве дефектного слоя в одномерном ФК использовать изотропный слой нанокompозита (НК), состоящий из диспергированных в прозрачной матрице металлических наноразмерных включений сферической формы [3-6]. В [7] получены и исследованы экспериментально и теоретически нанокompозитные пленки на основе SiO_2 и TiO_2 с включением золотых сферических наночастиц. Показано, что такие нанокompозиты характеризуются эффективной резонансной диэлектрической проницаемостью, которая описывается формулой Максвелла Гарнетта [8]. Отметим, что пленки SiO_2 и TiO_2 с диспергированными в них золотыми наночастицами вызывают повышенный интерес как фотовольтаические материалы [7,9]. В данной работе изучаются спектральные свойства 1Д ФК с дефектным слоем нанокompозита, полученного в [7], с учетом размерных эффектов в золотых наночастицах.

2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Рассматриваемая нами ФК-структура представляет собой слоистую среду с резонансным дефектным слоем нанокompозита. Дефектный НК-слой толщиной W_d состоит из золотых наночастиц сферической формы, равномерно распределенных в диэлектрической матрице диоксида титана (TiO_2) с диэлектрической проницаемостью (ДП) $\epsilon_a = 4.57$. В качестве чередующихся слоев, из которых составлена элементарная ячейка ФК, рассматриваются слой двуокиси циркония (ZrO_2) с ДП $\epsilon_a = 4.16$ и двуокиси кремния (SiO_2) с ДП $\epsilon_b = 2.10$. Толщины слоев равны соответственно $W_a = 50$ нм и $W_b = 74$ нм. ФК-структура помещена в среду (воздух) с ДП равной единице и состоит из $N = 19$ слоев, включая дефектный слой в центре симметрии структуры.

Эффективная диэлектрическая проницаемость нанокompозита определяется формулой Максвелла Гарнетта, широко применяемой при рассмотрении матричных сред, когда в материале матрицы диспергированы изолированные металлические включения малой объемной доли:

$$\epsilon = \epsilon_d \left[1 + \frac{3f(\epsilon_m - \epsilon_d)}{3\epsilon_d + (1 - f)(\epsilon_m - \epsilon_d)} \right], \quad (1)$$

где f – фактор заполнения, т. е. доля наночастиц в матрице, ϵ_d и ϵ_m – диэлектрические проницаемости соответственно матрицы и металла, из которого изготовлены наночастицы.

Диэлектрическую проницаемость металла, из которого изготовлены наночастицы, найдем, используя приближение Друде – Зоммерфельда:

$$\epsilon_m(\omega) = \epsilon_0 - \frac{\omega_p^2}{\omega \left(\omega + i \left(\gamma + A \frac{v_F}{r} \right) \right)}, \quad (2)$$

где ϵ_0 – постоянная, учитывающая вклады межзонных переходов связанных электронов, ω_p – плазменная частота, γ – величина, обратная времени релаксации электронов, v_F – скорость Ферми, r – радиус наночастицы, A – эффективный параметр, описывающий степень потери когерентности при рассеянии электрона на поверхности. Для золота $\epsilon_0 = 9.84$, $\omega_p = 9$ эВ, $\gamma = 0,1$ эВ, $v_F = 1.4 \cdot 10^8$ см/с, $A = 1$ [10].

На рисунке 1 представлены действительные и мнимые части эффективной ДП НК, вычисленные по формуле (1) как функции длины волны падающего света. ДП представлена для двух значений фактора заполнения f . Тонкими линиями выделены ДП, вычисленные при формальном стремлении радиуса r частиц к бесконечности (приближение неограниченного материала в формуле Друде – Зоммерфельда (2)).

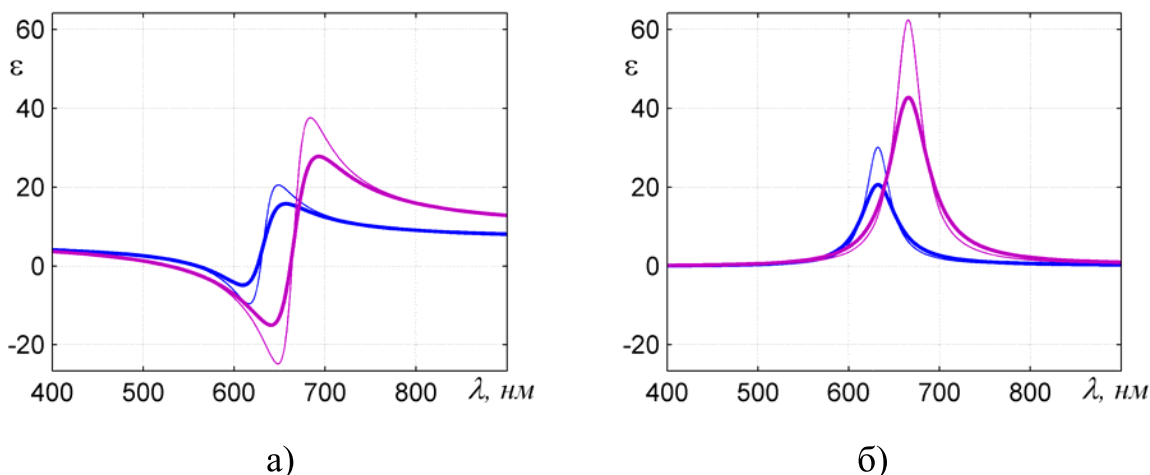


Рис. 1. Действительная (а) и мнимая (б) части диэлектрической проницаемости нанокompозита при факторе заполнения $f = 0.13$ (синий) и 0.24 (пурпурный). Тонкими линиями показана ДП без учета размера частиц, толстыми – при радиусе частиц $r = 20$ нм

Из рисунка 1 видно, что величина ДП нанокompозита, а также положение резонансной частоты, существенным образом зависят от действительного размера и концентрации наночастиц в НК.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Спектры пропускания и поглощения структуры были найдены методом матрицы переноса [11]. На рисунке 2 представлены спектры пропускания и поглощения системы при толщине дефектного слоя $W_d = 70$ нм, и факторе заполнения $f = 0.13$. Черной линией показан затравочный спектр ФК, включающий дефектный слой из диоксида титана, не содержащий наночастиц.

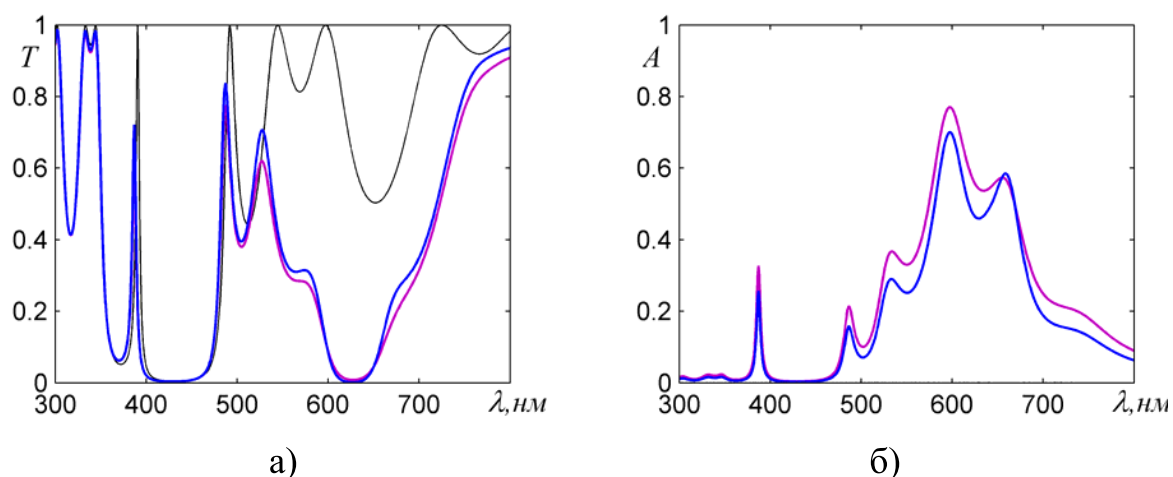


Рис. 2. Коэффициент пропускания T (а) и поглощения A (б) системы как функция длины волны падающего света. Толщина дефекта $W_d = 70$ нм. Параметры: $f = 0$ (черный); $f = 0.13$, без учета размера (синий); $f = 0.13$, $r = 20$ нм (пурпурный)

Из рисунка 2(а) видно, что на длине волны, соответствующей резонансной частоте НК (см. рисунок 1) появляется дополнительная ЗЗ в спектре пропускания. Это связано с тем, что золото в модели Друде – Зоммерфельда (2) обладает большим коэффициентом затухания, поэтому появление этой ЗЗ – эффект поглощения на резонансной частоте (см. рисунок 2(б)), в отличие от исходной ЗЗ затравочного спектра, природа которой связана с Брэгговской дифракцией света. Также наблюдается уменьшение пропускания и небольшой частотный сдвиг для дефектного пика в Брэгговской ЗЗ при введении наночастиц в НК. При учете размера наночастиц наблюдается уменьшение пропускания системы – это связано с тем, что

величина ДП НК уменьшается при учете размерных эффектов (см. рисунок 1).

На рисунке 3 представлены спектры пропускания и поглощения системы при толщине дефектного слоя $W_d = 90$ нм, и факторе заполнения $f = 0.24$. Черной линией показан затравочный спектр ФК, включающий дефектный слой из диоксида титана, не содержащий наночастиц.

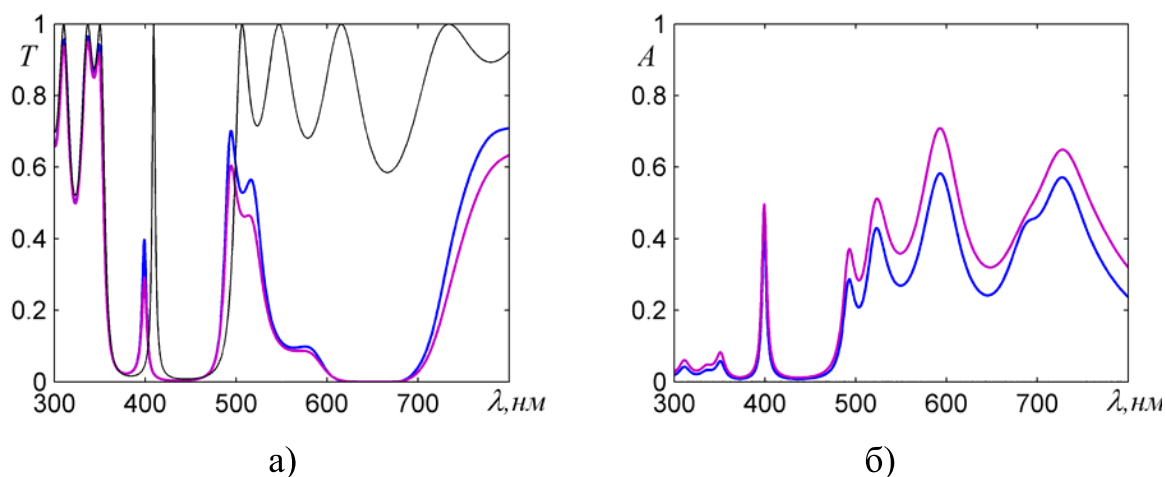


Рис. 3. Коэффициент пропускания T (а) и поглощения A (б) системы как функция длины волны падающего света. Толщина дефекта $W_d = 90$ нм. Параметры: $f = 0$ (черный); $f = 0.24$, без учета размера (синий); $f = 0.24$, $r = 20$ нм (пурпурный)

На рисунке 3(а) также видна дополнительная ЗЗ, соответствующая поглощению в НК на резонансной частоте ДП НК, ширина этой ЗЗ, при заданной толщине дефектного слоя $W_d = 90$ нм, увеличилась по сравнению с ЗЗ на рисунке 2(а). Эффект уменьшения пропускания для дефектного пика в Брэгговской ЗЗ, а также его частотный сдвиг в случае увеличения фактора заполнения, проявляются интенсивнее. При учете размера наночастиц происходит уменьшение пропускания, аналогично случаю на рисунке 2(а).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность качественного изменения спектральных характеристик 1Д ФК при помощи дефектного слоя нанокompозита, допированного золотыми наночастицами. Спектры пропускания и поглощения существенным образом зависят от концентрации наночастиц в НК. При учете размера частиц происходит модификация спектра, обусловленная эффек-

тами диссипации – затуханием для неограниченного объема металла и процессами рассеяния электронов на поверхности наночастицы. Применение ФК-резонатора для увеличения поглощения света в подобном НК может быть полезно для нужд фотовольтаики, при создании элементов для солнечных батарей.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ Сибирскому федеральному университету на выполнение НИР в 2014 году (Задание № 3.1276.2014/К) и при поддержке РФФИ (грант № 14-02-31248).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J.D. Joannopoulos et al., Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. // Princeton: Princeton University Press, 2008, 286 p.
2. Б.И. Манцызов, Когерентная и нелинейная оптика фотонных кристаллов. // М.: Физматлит, 2009, 149 с.
3. С.Я. Ветров, А.Ю. Авдеева, И.В. Тимофеев, Особенности спектральных свойств одномерного фотонного кристалла с резонансным дефектным слоем нанокompозита. // ЖЭТФ, 2011, № 5(11), с. 871 – 878.
4. С.Я. Ветров, Р.Г. Бикбаев, И.В. Тимофеев, Оптические таммовские состояния на границе фотонного кристалла и нанокompозита с резонансной дисперсией. // ЖЭТФ, 2013, № 6, с. 1129 – 1139.
5. С.Г. Моисеев, В.А. Остаточников, Д.И. Семенцов, Подавление дефектной моды в фотонно-кристаллической структуре с резонансным нанокompозитным слоем. // Квантовая электроника, 2012, т. 42, № 6, с. 557 – 560.
6. С.Г. Моисеев, В.А. Остаточников, Д.И. Семенцов, Влияние размерных эффектов на оптические характеристики одномерного фотонного кристалла с нанокompозитным дефектом. // Письма в ЖЭТФ, 2014, т. 100, № 6, с. 413 – 417.
7. E. Pedrueza et al., Novel Method of Preparation of Gold-Nanoparticle-Doped TiO₂ and SiO₂ Plasmonic Thin Films: Optical Characterization and Comparison with Maxwell–Garnett Modeling. // Adv. Funct. Mater., 2011, v. 21, p. 3502 – 3507.
8. J. C. Maxwell Garnett, Colours in Metal Glasses and in Metallic Films. // Phil. Trans. R. Soc. Lond., 1904, v. 203, p. 385 – 420.

9. V.E. Ferry, J.N. Munday, H.A. Atwater, Design Considerations for Plasmonic Photovoltaics. // *Adv. Funct. Mater.*, 2010, v. 22, p. 4794 – 4808.
10. В.В. Климов, Наноплазмоника. // М.: Физматлит, 2009, 480 с.
11. P. Yeh, Electromagnetic propagation in birefringent layered media. // *J. Opt. Soc. Amer.*, 1979, v. 69, p. 742 – 756.