

## Спектральные свойства фотонного кристалла, сопряженного с нанокompозитом, содержащим частицы с оболочками

С. Я. Ветров<sup>1,2,\*</sup>, П. С. Панкин<sup>1,3,†</sup>, И. В. Тимофеев<sup>1,4,‡</sup>

<sup>1</sup>Институт физики имени Л. В. Киренского СО РАН  
Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, 50, стр. 38

ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»,  
Институт инженерной физики и радиоэлектроники  
Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

<sup>2</sup>кафедра «Теоретическая физика и волновые явления»

<sup>3</sup> кафедра «Фотоника и лазерные технологии»

<sup>4</sup> «Лаборатория нелинейной оптики и спектроскопии»

Исследованы спектральные свойства фотонного кристалла, сопряженного с нанокompозитом, содержащим частицы с диэлектрическим ядром и металлической оболочкой. В спектре наряду с фотонной запрещенной зоной, получена полоса непропускания, связанная с поглощением, а также оптические таммовские состояния.

PACS: 42.70.Qs      УДК: 535.361

Ключевые слова: спектр пропускания, плазмонный резонанс, нанокompозит, оптическое таммовское состояние.

Оптические материалы, имеющие запрещенные зоны (ЗЗ) в собственном энергетическом спектре, получили название фотонные кристаллы (ФК) — новый класс материалов для фотоники и оптоэлектроники, диэлектрические свойства которых меняются периодически с периодом, допускающим брэгговскую дифракцию света. Новые способы управления светом возникают, если в качестве дефектного слоя в одномерном ФК использовать изотропный слой нанокompозита (НК), имеющий резонансную дисперсию, и состоящий из диспергированных в прозрачной матрице металлических наноразмерных включений сферической формы. В этом случае, наряду с дефектной модой в ЗЗ, появляется полоса непропускания, обусловленная поглощением света на резонансной длине волны диэлектрической проницаемости (ДП) НК [1]. При сопряжении ФК с НК, на границе раздела возможно получение оптического таммовского состояния (ОТС), или, иначе, таммовского плазмон-поляритона [2]. В данной работе показано, что при рассмотрении сферических наночастиц, имеющих диэлектрическое ядро и металлическую оболочку, диспергированных в НК, возможно получить в спектре одновременно как полосу непропускания, связанную с поглощением, так и ОТС.

Рассматриваемая нами ФК-структура представляет собой слоистую среду, ограниченную с одной, или двух сторон слоем НК. НК-слой толщиной  $W_d = 150$  нм состоит из слоистых сферических наночастиц с оболочкой, равномерно распределенных в диэлектрической матрице из прозрачного оптического стекла с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_m = 2.56$ . В качестве чередующихся слоев, из которых составлена элементарная

ячейка ФК, рассматриваются слой двуокиси циркония ( $ZrO_2$ ) с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_a = 4.16$  и двуокиси кремния ( $SiO_2$ ) с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_b = 2.10$ . 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  $N = 16$  или  $17$  слоев, включая нанокompозитные слои на границах ФК.

Эффективная диэлектрическая проницаемость нанокompозита определяется формулой Максвелла Гарнетта, широко применяемой при рассмотрении композитных сред, когда в материале матрицы диспергированы изолированные металлические включения малой объемной доли [3]:

$$\varepsilon = \varepsilon_m \left( 1 + \frac{3f\alpha}{1 - f\alpha} \right), \quad (1)$$

где  $f$  — фактор заполнения, т. е. доля наночастиц в матрице, параметр  $\alpha$  пропорционален дипольной поляризуемости слоистой наночастицы. Для сферической частицы с ДП ядра  $\varepsilon_c$  и оболочки  $\varepsilon_s$ , находящейся в среде с ДП  $\varepsilon_m$  данный параметр определяется следующим выражением [3]:

$$\alpha = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_m)(\varepsilon_c + 2\varepsilon_s) + \beta(\varepsilon_m + 2\varepsilon_s)(\varepsilon_c - \varepsilon_s)}{(\varepsilon_s + 2\varepsilon_m)(\varepsilon_c + 2\varepsilon_s) + 2\beta(\varepsilon_s - \varepsilon_m)(\varepsilon_c - \varepsilon_s)}, \quad (2)$$

где  $\beta$  — это отношение объема ядра частицы к ее полному объему. В рассматриваемой нами структуре наночастицы состоят из диэлектрического ядра с ДП  $\varepsilon_c = 3$  и серебряной оболочки с ДП  $\varepsilon_s$ , выражаемой формулой Друде-Зоммерфельда:

$$\varepsilon_m(\omega) = \varepsilon_0 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_0$  — постоянная, учитывающая вклады межзонных переходов связанных электронов,  $\omega_p$  — плазменная частота,  $\gamma$  — коэффициент затухания (величина,

\*E-mail: S.Vetrov@inbox.ru

†E-mail: p.s.pankin@mail.ru

‡E-mail: tiv@iph.krasn.ru

обратная времени релаксации электронов),  $\omega$  — частота падающего света. Для серебра  $\varepsilon_0 = 5$ ,  $\omega_p = 9 \text{ эВ}$ ,  $\gamma = 0.02 \text{ эВ}$ .

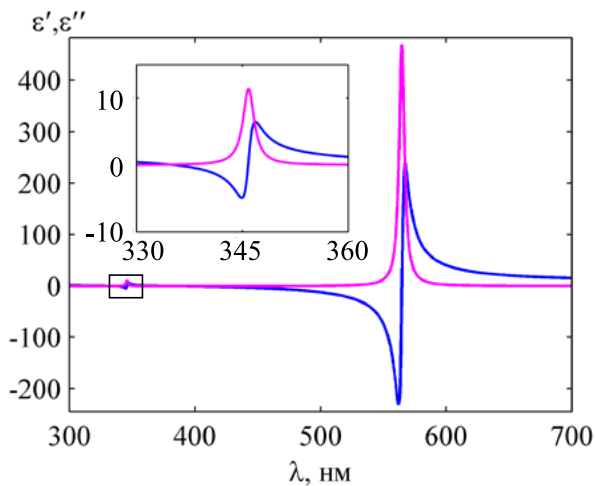


Рис. 1: Действительная  $\varepsilon'$  (синий) и мнимая  $\varepsilon''$  (пурпурный) части диэлектрической проницаемости нанокompозита в зависимости от длины волны падающего света. На вставке в увеличенном масштабе показан участок, выделенный черной рамкой. Параметры  $f = 0.4$ ,  $\beta = (0.4)^3$ ,  $\varepsilon_m = 2.56$ ,  $\varepsilon_c = 3$ .

На рис. 1 приведена зависимость эффективной ДП НК, от длины волны падающего света для выбранных нами параметров нанокompозита. Из рисунка видно, что возникают две резонансные части ДП, природа которых связана с плазмонным резонансом наночастиц [3,4]. Поверхностные плазмоны возникают на границах раздела металлической оболочки с ядром и матрицей. При увеличении ДП ядра, резко увеличивается коротковолновая резонансная часть ДП, в то время как длинноволновая уменьшается незначительно. При увеличении ДП матрицы происходит обратная ситуация. Кроме того происходит смещение обоих резонансов в длинноволновую область. При уменьшении толщины оболочки, увеличивается связь локализованных на ее границах плазмонов и наблюдается движение коротковолновой резонансной части ДП в область коротких длин волн, длинноволновой — в сторону увеличения длины волны.

На рис. 2а показаны спектры пропускания ФК, состоящего из 15 слоев и сопряженного с одной стороны со слоем нанокompозита при отсутствии наночастиц в НК и при факторе заполнения, равном 0.4. Из рисунка видно, что при введении наночастиц спектр качественно изменяется. На длине волны около 345 нм формируется зона непропускания, природа которой связана с поглощением света на резонансной длине волны, соответствующей коротковолновой резонансной части

ДП НК (рис. 1). Исходная ЗЗ увеличивается почти вдвое, что объясняется высоким отражением света на данных длинах волн, которое возникает из-за большой отрицательной величины действительной части ДП НК (рис. 1). Кроме того, вблизи коротковолновой границы ЗЗ возникает пик пропускания, связанный с возникновением оптического таммовского состояния. Световое поле в таммовском плазмон-поляритоне локализовано в области, соизмеримой с длиной волны. Распределение локальной интенсивности поля на длине волны 391.5 нм, соответствующей ОТС, показано на рис. 2, б. Поле локализуется на границе ФК и НК, это связано с тем, что на данной длине волны НК имеет отрицательную действительную часть ДП — он подобен металлу. Вглубь ФК огибающая интенсивности убывает экспоненциально, в связи с тем, что данная длина волны попадает в ЗЗ ФК.

На рис. 3 показаны спектры пропускания ФК, состоящего из 15 слоев и ограниченного с одной или обеих сторон слоем нанокompозита при факторе заполнения, равном 0.4. При введении второго слоя нанокompозита, в спектре пропускания возникает расщепление пика в ЗЗ ФК, величина которого равна 6.2 нм. Такое расщепление резонансной таммовской длины волны объясняется снятием вырождения, которое обусловлено взаимным влиянием локализованных на границе раздела оптических таммовских мод. Полоса непропускания, связанная с поглощением в коротковолновой области спектра практически не изменяется.

Распределение локальной интенсивности поля на длинах волн, соответствующих расщепленным пикам, увеличенным на рис. 3 во вставке, показано на рис. 4. Черным цветом изображено распределение по структуре напряженности электрического поля, нормированного на напряженность падающего света. Из рисунка видно, что при совмещении ФК с двумя слоями НК, образовались связанные таммовские плазмон-поляритоны. Распределение поля имеет разную симметрию для каждого из пиков и зависит от числа слоев в структуре, заключенной между нанокompозитными слоями. Огибающая локальной интенсивности поля убывает экспоненциально вглубь ФК с каждой стороны.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ Сибирскому федеральному университету на выполнение НИР в 2015 г. (Задание № 3.1276.2014/К), при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-02-31248) и совместного проекта СО РАН и Министерства науки и технологий Тайваня.

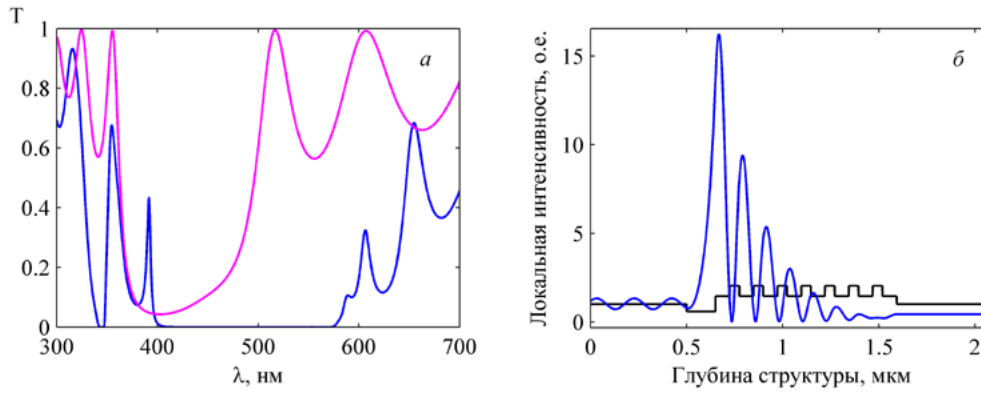


Рис. 2: Коэффициент пропускания  $T$  ФК, сопряженного со слоем НК, в зависимости от длины волны падающего света (а). Параметры  $W_d = 150$  нм,  $f = 0$  (пурпурный),  $f = 0.4$  (синий). Пространственное распределение локальной интенсивности поля (б) (квадрат модуля напряженности электрического поля) (синий). Локальная интенсивность нормирована на входную интенсивность света. Показатели преломления слоев (черный).

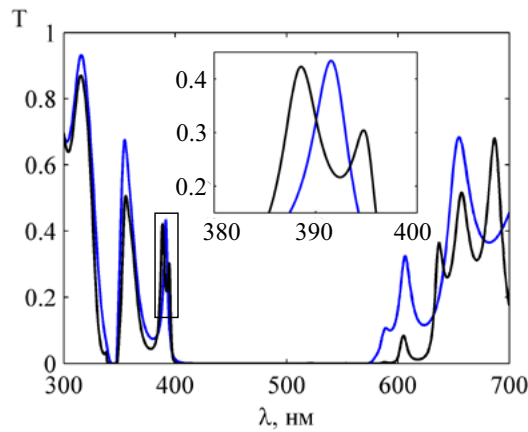


Рис. 3: Коэффициент пропускания  $T$  ФК, ограниченного с одной стороны (синий) и с двух сторон (черный) слоем НК, в зависимости от длины волны падающего света. На вставке в увеличенном масштабе показан участок, выделенный черной рамкой. Параметры  $W_d = 150$  нм,  $f = 0.4$ .

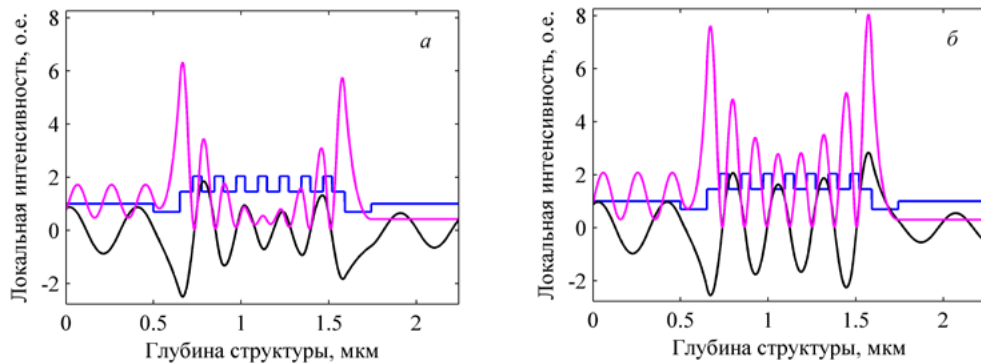


Рис. 4: Пространственное распределение локальной интенсивности поля (квадрат модуля напряженности электрического поля) (пурпурный). Локальная интенсивность нормирована на входную интенсивность света. Показатели преломления слоев (синий). Напряженность электрического поля, нормированная на входную напряженность поля (черный). Для коротковолновой (а) и длинноволновой (б) плазмон-поляритонных мод структуры. Параметры  $W_d = 150$  нм,  $f = 0.4$ .

- [1] *Ветров С.Я. и др.* Опт. и спектр. **119**, №1. С. 69. (2015). Applications. London: The Institution of Engineering and Technology. (2008).
- [2] *Ветров С.Я. и др.* ЖЭТФ. **144**, № 6(12). С. 1129. (2013). [4] *Мусеев С.Г.* Опт. и спектр. **111**, №2. С. 264. (2011).
- [3] *Sihvola A.* Electromagnetic Mixing. Formulas and

## Spectral properties of a photonic crystal conjugated to nanocomposite containing shell particles

**S. Ya. Vetrov<sup>1,2,a</sup>, P. S. Pankin<sup>1,2,b</sup>, I. V. Timofeev<sup>1,2,c</sup>**

<sup>1</sup>*Kirensky Institute of Physics, Akademgorodok 50, bld. 38, Krasnoyarsk, 660036 Russia*

<sup>2</sup>*Siberian Federal University, 79 Svobodny pr., Krasnoyarsk, 660041 Russia*

*E-mail: <sup>a</sup>S.Vetrov@inbox.ru, <sup>b</sup>p.s.pankin@mail.ru, <sup>c</sup>tiv@iph.krasn.ru*

Spectral properties are investigated of a photonic crystal conjugated to nanocomposite containing particles comprised of a dielectric core and a metallic shell. In the spectrum three features are obtained: optical Tamm states; photonic band gap; stopband associated with absorption.

PACS: 42.70.Qs, 78.66.Sq

Keywords: transmission spectrum, plasmon resonance, nanocomposite, optical Tamm state.

Received 27.07.2015.

### Сведения об авторах

1. Ветров Степан Яковлевич — докт. физ.-мат. наук, профессор; тел.: (391) 249-57-93, e-mail: S.Vetrov@inbox.ru.
2. Панкин Павел Сергеевич — аспирант, инженер-исследователь; тел.: 8 (923) 334-64-79, e-mail: p.s.pankin@mail.ru.
3. Тимофеев Иван Владимирович — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; тел.: (391) 249-46-13, e-mail: tiv@iph.krasn.ru.