

## Связанные оптические таммовские состояния на границе фотонного кристалла и нанокompозита, содержащего 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, строение № 38

<sup>2</sup>ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»,  
институт инженерной физики и радиоэлектроники,  
кафедра «Теоретическая физика и волновые явления»

<sup>3</sup>ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»,  
институт инженерной физики и радиоэлектроники,  
кафедра «Фотоника и лазерные технологии»

<sup>4</sup>ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»,  
институт инженерной физики и радиоэлектроники,  
«Лаборатория нелинейной оптики и спектроскопии»  
Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

Исследуются связанные оптические таммовские состояния, локализованные на краях фотонного кристалла, ограниченного нанокompозитом. Нанокompозит состоит из диспергированных в прозрачной матрице сферических наночастиц, имеющих диэлектрическое ядро и металлическую оболочку. Показано, что положение спектральных пиков чувствительно к толщине крайнего слоя фотонного кристалла.

PACS: 42.70.Qs

УДК: 535.361.

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

В последние годы активно исследуется особый тип локализованных электромагнитных состояний, которые можно возбудить при нормальном падении света на образец — оптические таммовские состояния (ОТС) [1]. ОТС может возбуждаться между фотонным кристаллом (ФК) и средой с отрицательной диэлектрической проницаемостью (ДП)  $\varepsilon$  (плазмподобная среда). Поверхностная электромагнитная волна на границе ФК и среды с  $\varepsilon < 0$  представляет собой неразрывное целое с поверхностным плазмоном — колебаниями свободных электронов вблизи поверхности проводника. Такая связанная мода поля излучения и поверхностного плазмонного возбуждения называется таммовским плазмон-поляритоном (ТПП). Экспериментально ОТС проявляется в виде узкого пика в спектре пропускания образца.

При ограничении ФК плазмподобной средой с двух сторон, можно получить связанные ТПП [2]. В [3] была показана возможность реализации связанных ТПП, когда в качестве плазмподобной среды был использован металл-диэлектрический нанокompозит (НК). Положение частотного интервала, в котором НК подобен металлу, то есть, в котором  $\text{Re}\varepsilon(\omega) < 0$ , зависит от ДП материалов НК, концентрации и формы наночастиц, наполняющих его. Это открывает широкие возможности контроля над оптическими свойствами ОТС за счет варьирования параметрами НК.

В настоящей работе исследовано влияние параметров структуры на спектральное проявление связанных ТПП, реализованных в ФК, ограниченном с двух сторон НК, содержащим частицы с оболочками. Расчеты спектральных свойств ФК выполнены с использованием метода трансфер-матрицы.

ФК представляет собой чередующиеся слои двуокиси кремния ( $\text{SiO}_2$ ) и двуокиси циркония ( $\text{ZrO}_2$ ) с диэлектрическими проницаемостями и толщинами  $\varepsilon_a = 2.10$ ,  $W_a = 74$  нм и  $\varepsilon_b = 4.16$ ,  $W_b = 50$  нм соответственно. ФК ограничен с двух сторон НК-слоем толщиной  $W_d = 150$  нм, состоящим из слоистых сферических наночастиц с оболочкой, равномерно распределенных в диэлектрической матрице из прозрачного оптического стекла с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_m = 2.56$ . Структура помещена в среду (воздух) с диэлектрической проницаемостью равной единице и состоит из  $N = 17$  слоев, включая НК-слои (рис. 1а).

Эффективная диэлектрическая проницаемость нанокompозита определяется формулой Максвелла-Гарнетта:

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

где  $f$  — фактор заполнения, т. е. объемная доля наночастиц в композите. Параметр  $\alpha$  пропорционален дипольной поляризуемости слоистой наночастицы, и для сферической частицы с ДП ядра  $\varepsilon_c$  и оболочки  $\varepsilon_s$ , находящейся в среде с ДП  $\varepsilon_m$ , определяется следующим выражением [4]:

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

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

†E-mail: p.s.pankin@mail.ru

‡E-mail: tiv@iph.krasn.ru

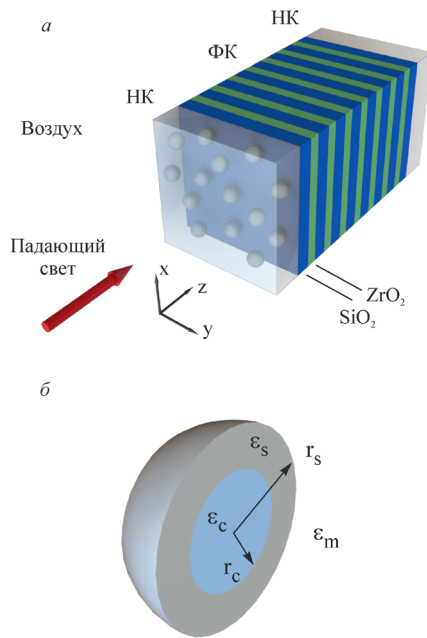


Рис. 1: Схематичное представление одномерного фотонного кристалла, ограниченного нанокompозитными слоями (а) и сечение наночастицы (б)

где  $\beta = (r_c/r_s)^3$  — отношение объема ядра частицы к ее полному объему (рис. 1б). В рассматриваемой нами структуре наночастицы состоят из диэлектрического ядра с ДП  $\epsilon_c = 3$  и серебряной оболочки с ДП  $\epsilon_s$ , выражаемой формулой Друде–Зоммерфельда [4, 7].

На рис. 2а показан спектр пропускания структуры в зависимости от толщины  $d$  первого слоя  $\text{SiO}_2$ , непосредственно примыкающего к НК-слою. Вблизи коротковолновой границы ЗЗ ФК видны два пика пропускания. Как было показано в работе [5], эти пики соответствуют связанным ТПП. Световое поле на длине волны этих пиков локализуется на границе между ФК и НК-слоями, и спадает экспоненциально вглубь сверхрешетки и композита (рис. 3). На рис. 2б показано расталкивание по длине волны пиков, соответствующих связанным ТПП.

Из рис. 2 видно, что положения пиков и расстояние между ними существенным образом изменяются при изменении толщины  $d$  первого слоя. Раздвоение пика объясняется снятием вырождения, которое обусловлено взаимным влиянием локализованных на границе раздела оптических таммовских мод. Как было отмечено в работе [6], при увеличении толщины первого слоя ФК, непосредственно сопряженного с плазмоподобной средой (в нашем случае это НК, имеющий в данном диапазоне длин волн действительную отрицательную часть ДП), длина волны ОТС увеличивается (на рисунке показана пурпурным). Таким образом, изменяется длина волны ОТС, локализованного на границе

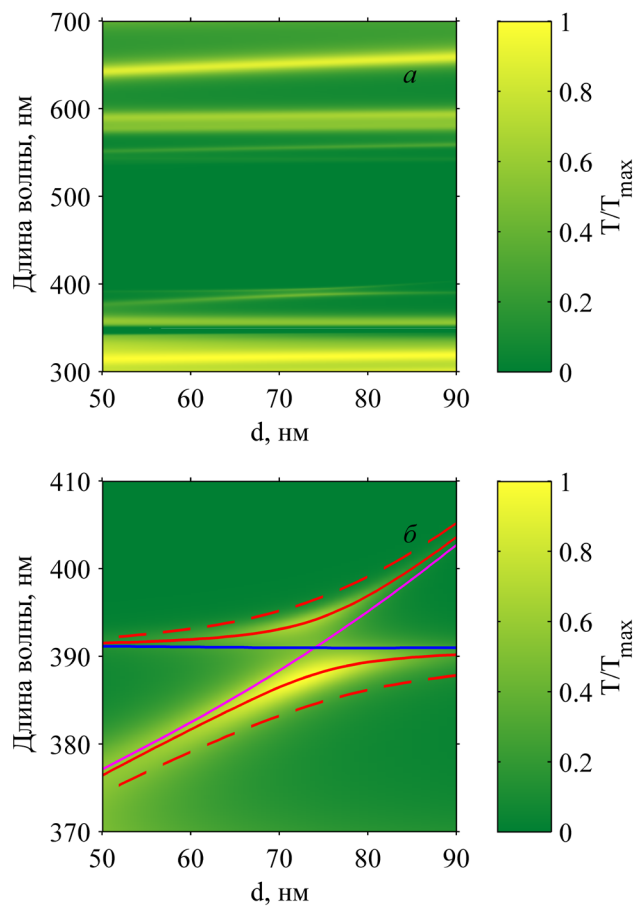


Рис. 2: Спектр пропускания системы в зависимости от толщины  $d$  первого слоя  $\text{SiO}_2$  ( $T_{\max} = 0.9144$ ) (а). В увеличенном масштабе показано движение пиков, соответствующих связанным таммовским плазмон–поляритонам ( $T_{\max} = 0.4124$ ) (б). Красным цветом показаны максимумы пиков пропускания при числе слоев ФК  $N = 17$ . Пунктирной — при  $N = 13$ . Пурпурным и синим цветом показано положение ОТС для структур НК–ФК и ФК–НК соответственно. Параметры  $f = 0.3$ ,  $\beta = (0.3)^3$

между НК и слоем переменной толщины, в то время как длина волны второго ОТС, локализованного на другой границе ФК, не меняется (на рисунке показана синим). При отстройке длин волн связанных мод ОТС, увеличивается расстояние между пиками. Оно достигает минимума при  $d = 74$  нм, т. е. когда структура становится симметричной и длины волн связанных таммовских мод совпадают — их дисперсионные кривые пересекаются.

Существенная зависимость положения пиков пропускания от толщины первого слоя ФК открывает возможность создания перестраиваемого фильтра на основе подобной структуры. Для этого следует изготовить первый слой с переменной толщиной, например в виде клина.

При уменьшении числа слоев ФК происходит увеличение расстояния по длине волны между пиками, соот-

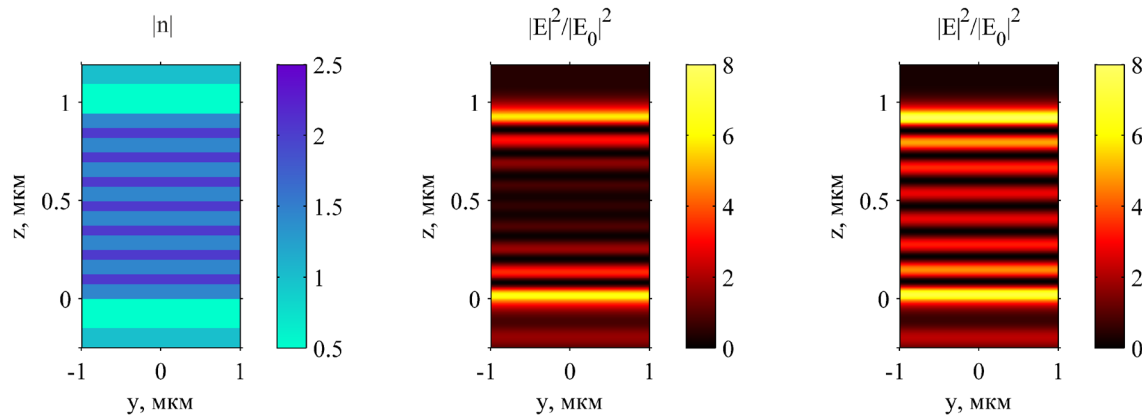


Рис. 3: Пространственное распределение показателя преломления (а). Пространственное распределение интенсивности поля для пиков, соответствующих связанным ТПП (рис. 2б) на длине волны 387.9 нм (б) и 394.1 нм (в) при  $d = 74$  нм

ветствующими связанным ТПП. Это связано с тем, что расстояние между НК-слоями уменьшается, увеличивается пространственная область перекрытия взаимодействующих таммовских мод, что приводит к более сильной связи мод и расталкиванию пиков (рис. 2б).

В настоящее время существуют технологии изготовления наночастиц, которые позволяют изменять размеры ядра и оболочки в широких пределах [7]. Это открывает дополнительную возможность настройки положения пиков пропускания при создании таких структур. На рис. 4 показано движение пиков при росте отношения  $r_c/r_s$ . Из рисунка видно, что пики смещаются в длинноволновую область. Это связано с тем, что ДП НК, вычисленная по формуле (1), имеет две резонансные области, которые отвечают двум поверхностным плазмонам, локализованным в частице на двух границах металлической оболочки — с ядром, и с матрицей. В наших расчетах проявляется более сильный из этих резонансов — длинноволновый, соответствующий внешней границе. При уменьшении толщины оболочки увеличивается связь локализованных на ее границах плазмонов, и наблюдается расталкивание мод — движение коротковолнового края резонансной области ДП в короткие длины волн, длинноволнового — в сторону увеличения длины волны. Поэтому область отрицательных значений действительной части ДП НК сдвигается в длинноволновую область, а вместе с ней и длина волны ОТС, локализованных на краях ФК (на рисунке показана синим). При увеличении значения  $r_c/r_s$  поле на длине волны ОТС спадает вглубь ФК быстрее, уменьшается пространственная область перекрытия взаимодействующих таммовских мод, это приводит к более слабой их связи и уменьшению расталкивания пиков. Они асимптотически приближают-

ся к длине волны несвязанного ОТС — вырождение состояний уменьшается. Пунктирные линии на рисунке показывают, что при уменьшении числа слоев ФК расстояние между пиками увеличивается.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ Сибирско-

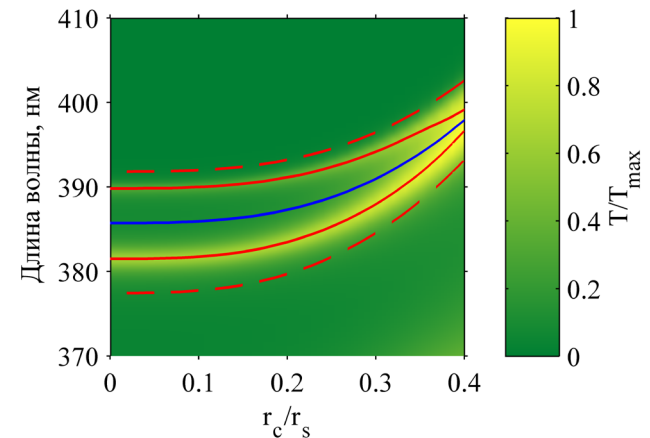


Рис. 4: Спектр пропускания системы в зависимости от отношения радиуса ядра  $r_c$  к радиусу частицы  $r_s$  ( $T_{max} = 0.4966$ ). Красным цветом показаны максимумы пиков пропускания при числе слоев ФК  $N = 17$ . Пунктирной — при  $N = 13$ . Синим цветом показано положение ОТС для структур НК-ФК и ФК-НК (кривые совпадают). Параметр  $f = 0.3$

му федеральному университету на выполнение НИР в 2016 г. (Задание № 3.1276.2014/К), при поддержке стипендии Президента РФ (№ СП-227.2016.5).

[1] Виноградов А. П. и др. УФН. **180**, № 3. С. 249. (2010).  
 [2] Иорш И. и др. Письма в ЖТФ. **38**, № 7. С. 104. (2012).

[3] Ветров С. Я., Бикбаев Р. Г., Тимофеев И. В. ЖЭТФ. **144**, № 6. С. 1129. (2013).

- [4] *Sihvola A.* Electromagnetic Mixing Formulas and Applications. London: The Institution of Engineering and Technology, 2008.
- [5] *Ветров С.Я., Панкин П.С., Тимофеев И.В.* УЗФФ. № 4 P. 154315. (2015).
- [6] *Белецкий Н.Н., Борисенко С.А., Гвоздев Н.И.* Радиофизика и электроника. **4**, № 3. С. 55. (2013).
- [7] *Климов В.В.* Наноплазмоника. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.

## Coupled optical Tamm states at the boundary of a photonic crystal and a nanocomposite consisting of core–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*

The optical Tamm states localized at both edges of a one-dimensional photonic crystal enclosed by a nanocomposite are investigated. The nanocomposite consists of spherical nanoparticles with a dielectric core and a metal shell, which are dispersed in a transparent matrix. It is shown that the position of the spectral peaks is sensitive to the thickness of the outermost layer of the photonic crystal.

PACS: 42.70.Qs, 78.66.Sq

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

### Сведения об авторах

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