

Оптические таммовские состояния на границе фотонного кристалла и сильно анизотропного нанокompозита

Р. Г. Бикбаев^{1,3,*}, С. Я. Ветров^{1,2,†}, И. В. Тимофеев^{1,4,‡}

¹Институт физики имени Л. В. Киренского СО РАН

Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, 50, строение №38

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

Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

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

Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

⁴ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», институт инженерной физики и радиоэлектроники, «Лаборатория нелинейной оптики и спектроскопии»

Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

Исследованы теоретически оптические таммовские состояния (ОТС) на границе фотонного кристалла (ФК) сильно анизотропного нанокompозита с резонансной дисперсией. Нанокompозит представляет собой прозрачную матрицу с равномерно диспергированными в ней наночастицами серебра эллипсоидальной формы и характеризующуюся эффективной резонансной диэлектрической проницаемостью, в то время как исходные материалы не обладают резонансными свойствами. Показано, что увеличение анизотропии позволяет получить большую локализацию поля и широкую запрещенную зону.

PACS: 42.70.Qs

УДК: 535.012.2, 535.361

Ключевые слова: нанокompозит, резонансная дисперсия, фотонный кристалл, оптическое таммовское состояние.

В последние годы интенсивно исследуются экспериментально и теоретически оптические таммовские состояния (ОТС) на границе двух фотонных кристаллов (ФК), а также на границе ФК и изотропной среды с отрицательной диэлектрической проницаемостью (ДП) $\varepsilon < 0$ [1]. Новые возможности управления светом представляют композитные среды с наночастицами металлов при создании наноструктурированных металл-диэлектрических ФК [2].

В данной работе представлены результаты расчета спектров пропускания для системы, состоящей из ФК, сопряженного со слоем нанокompозита, который состоит из металлических наночастиц в форме эллипсоидов вращения, равномерно распределенных в диэлектрической матрице и ориентированных вдоль оси вращения, совпадающей с осью x (рис. 1). Нанокompозит характеризуется резонансной эффективной диэлектрической проницаемостью, тогда как оптические характеристики исходных материалов резонансных особенностей не имеют. Положение резонанса, который лежит в видимой области света, зависит от диэлектрической проницаемости исходных материалов, концентрации и формы наночастиц.

Далее будем считать, что среда, в которую помещена ФК-структура, является вакуумом. Эффективная диэлектрическая проницаемость нанокompозита в соответствии с моделью Максвелла-Гарнетта [3]

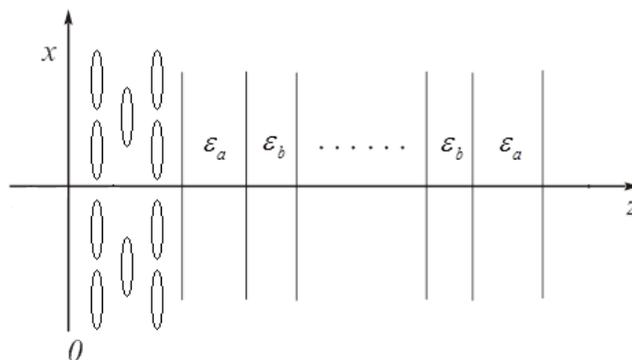


Рис. 1: Схематическое представление одномерного ФК, сопряженного с анизотропным слоем нанокompозита.

имеет вид

$$\varepsilon_{\perp,\parallel} = \varepsilon_d \left[1 + \frac{f(\varepsilon_m - \varepsilon_d)}{\varepsilon_d + (1 - f)(\varepsilon_m - \varepsilon_d)L_{\perp,\parallel}} \right], \quad (1)$$

где f — фактор заполнения, то есть доля наночастиц в матрице, ε_d и $\varepsilon_m(\omega)$ — диэлектрические проницаемости соответственно матрицы и металла, из которого изготовлены наночастицы; ω — частота излучения. Факторы деполяризации $L_{\perp,\parallel}$ в (1) зависят от отношения длин полярной a и экваториальной b полуосей эллипсоида вращения, а также от направления поля. Для поля, направленного вдоль оси вращения сфероид-

*E-mail: rashid-bikbaev@mail.ru

†E-mail: S.Vetrov@inbox.ru

‡E-mail: tiv@iph.krasn.ru

да, фактор L_{\parallel} определяется выражением

$$L_{\parallel} = \frac{1}{1 - \xi^2} \left(1 - \xi \frac{\arcsin \sqrt{1 - \xi^2}}{\sqrt{1 - \xi^2}} \right), \quad (2)$$

и для поля, направленного перпендикулярно к оси вращения сфероиды,

$$L_{\perp} = (1 - L_{\parallel}) / 2, \quad (3)$$

где $\xi = a/b$. Случай $\xi < 1$ соответствует сплюснутому сфероиду, $\xi > 1$ — вытянутому сфероиду. Случай $\xi = 1$, для которого $L_{\perp} = L_{\parallel} = 1/3$ и $\varepsilon_{\perp} = \varepsilon_{\parallel} = \varepsilon_{mix}$, соответствует шару.

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

$$\varepsilon_m(\omega) = \varepsilon_0 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)}, \quad (4)$$

где ε_0 — постоянная, учитывающая вклады межзонных переходов связанных электронов, ω_p — плазменная частота, γ — величина, обратная времени релаксации электронов. Для определенности, в качестве материалов чередующихся слоев ФК рассматриваем двуокись циркония (ZrO_2) с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_b = 4.16$ и двуокись кремния (SiO_2) с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_a = 2.10$. Толщины слоев соответственно $d_b = 50$ нм и $d_a = 74$ нм, число слоев $N = 21$. Диэлектрический слой нанокompозита толщиной $d_{mix} = 150$ нм состоит из серебряных наносфероидов, взвешенных в прозрачном оптическом стекле. Для серебра $\varepsilon_0 = 5$, $\omega_p = 9$ эВ, $\gamma = 0.02$ эВ, для стекла $\varepsilon_d = 2.56$.

Для расчета прохождения плоской световой волны, распространяющейся в z -направлении, использовался метод трансфер-матрицы. При слабой анизотропии нанокompозита $\xi = 0.8$ [4], каждой из двух ортогональных поляризаций нормально падающей волны отвечает своя частота локализованного на границе нанокompозита и сверхрешетки таммовского состояния.

Увеличение анизотропии существенно модифицирует спектр пропускания и при $\xi = 10$ оптическое таммовское состояние вообще не реализуется (рис. 2). Из рис. 2 видно, что для волн $-$ поляризации запрещенная полоса частот нанокompозита с $\xi = 10$ перекрывает существенную часть спектра в интервале от $w = 0.05\omega_p$ до $w = 0.25\omega_p$. И, очевидно, обусловлена поглощением света в НК и наличием частотной области, в которой НК подобен металлу с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_{mix}(\omega) < 0$. При этом наложение запрещенной зон фотонного кристалла и полосы поглощения нанокompозита не происходит, ввиду сильного смещения области с $\varepsilon_{mix}(\omega) < 0$ в низкочастотную область по сравнению с аналогичной областью для наночастиц сферической симметрии.

Для волн s -поляризации запрещенная полоса частот нанокompозита существенно перекрывается с запрещенной зоной фотонного кристалла. При этом оптическое таммовское состояние не формируется, так

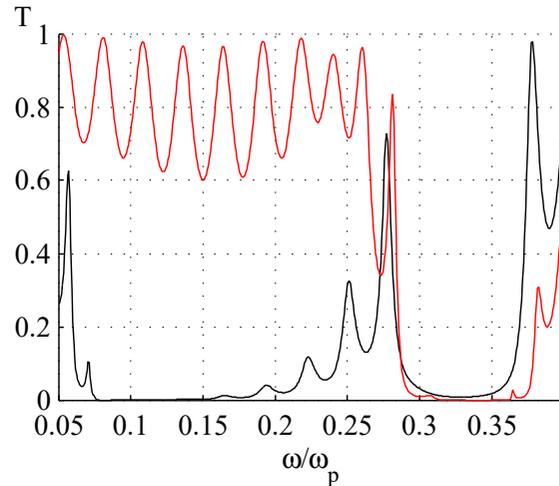


Рис. 2: Спектры пропускания при нормальном падении света на ФК сопряженный со слоем НК с диспергированными вытянутыми наночастицами для волн $-$ поляризации (черная линия) и s -поляризации (красная линия). Толщина слоя НК $d_{mix} = 150$ нм, фактор заполнения $f = 0.2$, $\xi = 10$.

как диэлектрическая проницаемость нанокompозита на частоте $w = 0.3627\omega_p$, соответствующая пику пропускания в запрещенной зоне, соизмерима с диэлектрической проницаемостью металла на той же частоте. Так для нанокompозита $\varepsilon_{mix}(\omega) = 2.3506 + 0.2112i$, а для металла $\varepsilon_m(\omega) = -2.6013 + 0.0466i$. При толщине нанокompозитной пленки $d = 150$ нм это не позволяет сформироваться таммовскому состоянию в связи с широкой полосой поглощения нанокompозита.

Однако при сохранении анизотропии $\xi = 10$ существуют параметры сверхрешетки, когда для волн $-$ поляризации таммовское состояние реализуется вблизи высокочастотной границы ЗЗ фотонного кристалла (рис. 3). Найденное оптическое таммовское состояние существует лишь в весьма узком частотном интервале. На частоте таммовского состояния $w = 0.2709\omega_p$ диэлектрическая проницаемость НК $\varepsilon_{mix}(\omega) = -1.0176 + 0.0381i$. Для волн s -поляризации ОТС при данных параметрах не формируется. Это связано с тем, что при изменении параметров ФК происходит смещение запрещенной зоны в низкочастотную область и не происходит её наложения с полосой поглощения нанокompозита, что является основным условием для формирования ОТС.

Из рис. 3б видно, что световое поле в таммовском плазмон-поляритоне локализовано на границе фотонного кристалла и нанокompозита в области, соизмеримой с длиной волны. Однако, в случае нанокompозитной пленки со сферическими включениями той же толщины и неизменных других параметрах системы, локализация поля на частоте таммовского состояния в 2 раза слабее. Отметим также, что характеристики ОТС весьма чувствительны к изменению объемной доли наночастиц в нанокompозите.

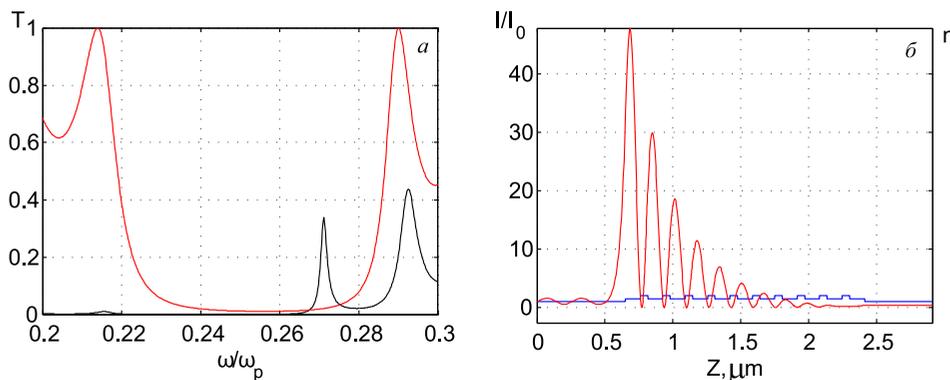


Рис. 3: Спектр пропускания при нормальном падении света на ФК (красная линия) и на ФК сопряженный со слоем НК (черная линия) с диспергированными вытянутыми наночастицами для волн -поляризации (а) и локализация поля на частоте таммовского состояния $\omega = 0.2709\omega_p$ (б). Толщина слоя НК $d_{mix} = 150$ нм, фактор заполнения $f = 0.3$, $\xi = 10$, толщина слоя $d_b = 55$ нм и $d_a = 110$ нм. Остальные параметры такие же как для рис. 2.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ Сибирскому федеральному университету на выполнение НИР в 2014 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.

- [1] Виноградов А. П. и др. УФН. **180**. №3. (2010).
 [2] Ветров С. Я. и др. ЖЭТФ. **140**, вып. 5. С. 871. (2011).
 [3] Maxwell Garnett J. C. Phil. Trans. R. Soc. Lond. **203**.

- Р. 385. (1904).
 [4] Ветров С. Я. и др. ЖЭТФ. **144**, вып. 6. С. 1129. (2013).

Optical Tamm state at the interface between a photonic crystal and a strongly anisotropic nanocomposite with resonance dispersion

R. G. Bikbaev^{1,3,b}, S. Ya. Vetrov^{1,2,a}, I. V. Timofeev^{1,4,c}

¹Kirensky Institute of Physics, Akademgorodok 50, bld. 38, Krasnoyarsk, 660036 Russia

²Siberian Federal University, 79 Svobodny pr., Krasnoyarsk, 660041 Russia

E-mail: ^aS.Vetrov@inbox.ru, ^brashid-bikbaev@mail.ru, ^ctiv@iph.krasn.ru

For nanocomposite and photonic crystal interface a complete theoretic study of optical Tamm state is presented. The nanocomposite consists of prolate metallic nanoparticles dispersed in a transparent matrix. It is characterized by resonant effective permittivity; whereas the optical properties of the initial materials have no resonant features. The nanocomposite anisotropy optimizes Tamm state localization and makes the photonic band gap wider.

PACS: 42.70.Qs.

Keywords: nanocomposite, resonant dispersion, photonic crystal, optical Tamm state.

Received 27.07.2015.

Сведения об авторах

1. Бикбаев Рашид Гельмединович — аспирант, инженер-исследователь; тел.: (923) 453-41-40, e-mail: rashid-bikbaev@mail.ru.
2. Ветров Степан Яковлевич — докт. физ.-мат. наук, профессор; тел.: (391) 249-57-93, e-mail: S.Vetrov@inbox.ru.
3. Тимофеев Иван Владимирович — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; тел.: (391) 249-46-13, e-mail: tiv@iph.krasn.ru.