

Поглотитель на основе таммовского плазмон-поляритона, локализованного на границе фотонного кристалла и нанокompозита с близкой к нулю диэлектрической проницаемостью

Р.Г. Бикбаев^{1,2}, С.Я. Ветров^{2,1}, И.В. Тимофеев^{1,2}

¹Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск

²Сибирский федеральный университет, Красноярск

bikbaev@iph.krasn.ru

Особым типом поверхностных электромагнитных состояний, где поле экспоненциально затухает по обе стороны от поверхности, является таммовский плазмон-поляритон (ТПП) [1], для которого может прекращаться перенос энергии вдоль поверхности. Экспериментально это локализованное состояние проявляется в виде узкого резонанса в оптическом спектре пропускания или отражения образца на длинах волн внутри запрещенной зоны фотонного кристалла (ФК) [2]. Для формирования таммовского плазмон-поляритона и устройств на его основе используется, как правило, планарная металлическая пленка, сопряженная с фотонным кристаллом. При этом выбор ее материала и толщины исчерпывает возможности оптимизации оптических свойств таких структур за счет изменения параметров пленки. Новые возможности появляются, если в качестве материала пленки использовать металл-диэлектрические нанокompозиты (НК) – искусственно сформированные и особым образом структурированные среды. Отметим, что металл-диэлектрические нанокompозиты могут выступать и в качестве материалов с близкой к нулю эффективной диэлектрической проницаемостью (ДП). В [3] было показано, что подобные материалы могут быть использованы для формирования ТПП. Авторами был установлен диссипативный принцип формирования локализованного состояния, при котором ТПП может формироваться не только при малых отрицательных и положительных значениях действительной части ДП, но и при нулевом значении. В данной работе продемонстрирована возможность создания узкополосных поглотителей на основе таммовских плазмон-поляритонов, локализованных на границе ФК и нанокompозита с близкой к нулю ДП.

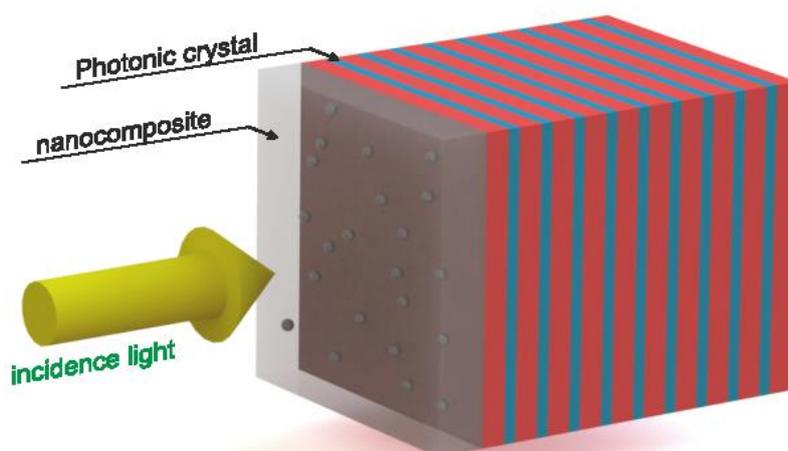


Рис. 1. Изображение исследуемой структуры.

Рассмотрим ФК-структуру, представляющую собой слоистую среду, ограниченную конечным слоем нанокompозита (Рис. 1). Элементарная ячейка фотонного кристалла сформирована из материалов a и b с толщинами слоев и ДП

соответственно d_a , ϵ_a и d_b , ϵ_b . Слой нанокompозита толщиной d_{eff} с ДП ϵ_{eff} состоит из металлических наносфер, равномерно распределенных в прозрачной матрице из оптического стекла.

Эффективная ДП нанокompозита определяется формулой Максвелл-Гарнетта [4]:

$$\epsilon_{eff} = \epsilon_d \left[1 + \frac{f(\epsilon_m(\omega) - \epsilon_d)}{\epsilon_d + (1-f)(\epsilon_m(\omega) - \epsilon_d)1/3} \right] \quad (1)$$

где f – фактор заполнения, то есть объемная доля наночастиц в матрице; ϵ_d и $\epsilon_m(\omega)$ – диэлектрические проницаемости соответственно матрицы и металла, из которого изготовлены наночастицы; ω – частота излучения.

Диэлектрическую проницаемость металла, из которого изготовлены наночастицы, найдем, используя приближение Друде, параметры которого для серебра $\epsilon_0 = 5$, $\omega_p = 9$ эВ, $\gamma = 0.02$ эВ. Диэлектрическая проницаемость матрицы $\epsilon_d = 2.56$. Далее будем считать, что среда, в которую помещена ФК-структура, является вакуумом.

Исследуем две схемы возбуждения таммовского плазмон-поляритона: со стороны нанокompозитного слоя и со стороны фотонного кристалла (Рис. 2).

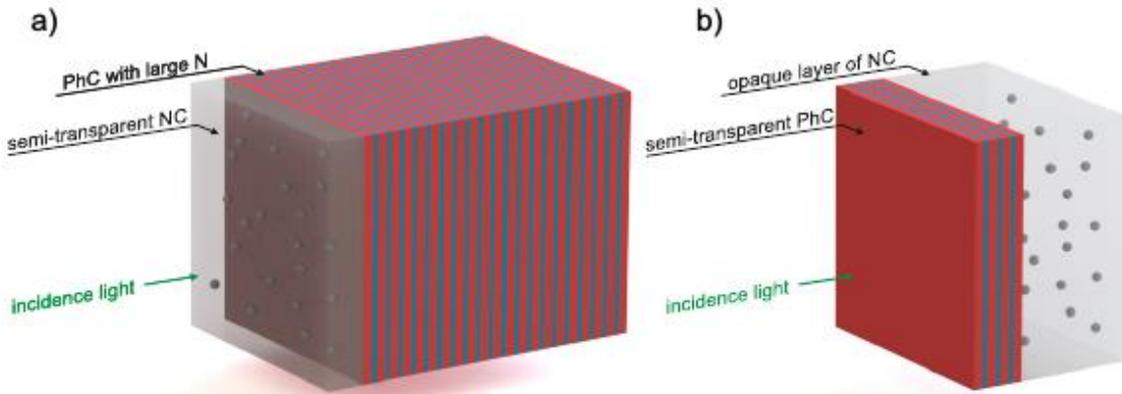


Рис. 2. Схема возбуждения ТПП со стороны нанокompозитной пленки (a) и со стороны фотонного кристалла (b).

Для численного сравнения двух схем возбуждения, рассчитаем спектры пропускания структур методом трансфер-матрицы. Результаты расчета изображены на рисунке 3. Из рисунка 3а видно, что критическая связь ТПП с падающим полем, в случае его возбуждения через НК, достигается при толщине нанокompозитного слоя $d_{eff} = 201$ нм.

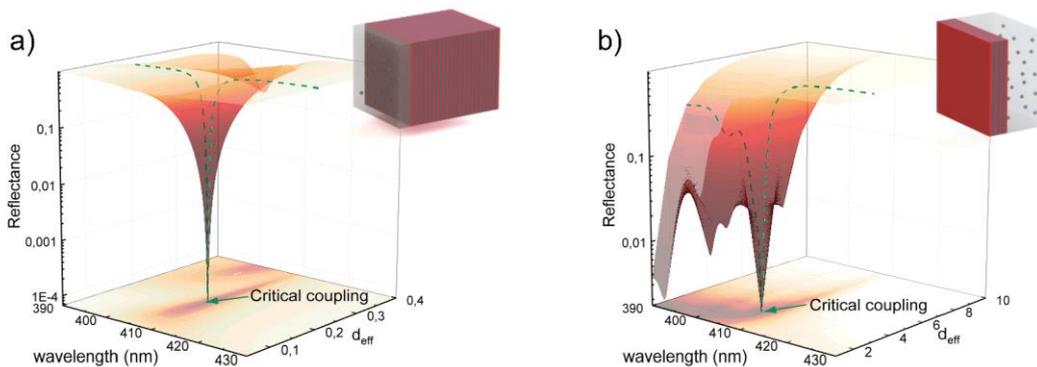


Рис. 3. Спектры отражения структуры НК-ФК (а) и ФК-НК (б) при различных значениях толщины нанокompозитного слоя d_{eff} и фиксированном значении фактора заполнения $f = 0.11$.

Также расчеты показали, что при возбуждении ТПП со стороны фотонного кристалла, критическая связь достигается при количестве периодов ФК $N = 3$ (Рис. 3б). При этом, ширина спектральной линии для первой схемы возбуждения оказывается уже. В случае возбуждения ТПП со стороны НК, максимум поглощения наблюдается на длине волны $\lambda = 407.1$ нм, а при возбуждении со стороны ФК – на длине волны $\lambda = 406.7$ нм. Эффективная ДП на этих длинах волн принимает значения $\epsilon_{eff} = 0.0094 + 0.0858i$ и $\epsilon_{eff} = 0.0348 + 0.0843i$, соответственно. Пространственные распределения локальной интенсивности поля на длинах волн ТПП изображены на рисунке 4.

Как в одном, так и во втором случае, поле локализовано на границе раздела сред в области, соизмеримой с длиной волны. При этом величина локализации для схемы возбуждения через НК в 1,5 раза больше, чем для схемы возбуждения через ФК.

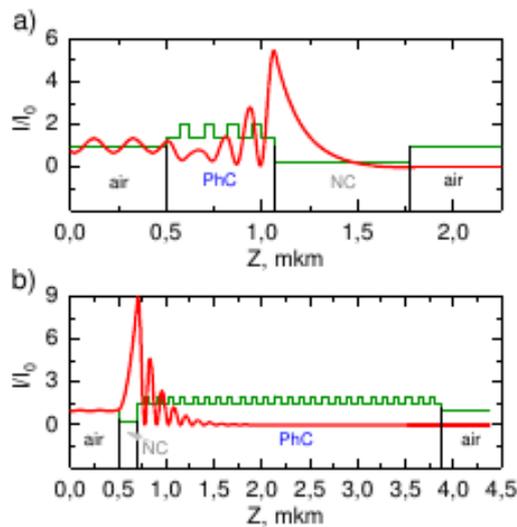


Рис. 4. ТПП в области положительных ϵ_{eff} . Пространственное распределение показателя преломления структуры (зеленая линия) и локальной интенсивности поля на длине волны ТПП (красная линия), в случае возбуждения ТПП со стороны НК (а) и со стороны ФК (б).

В работе исследованы оптические свойства ТПП, локализованных на границе фотонного кристалла и нанокompозита с близкой к нулю эффективной диэлектрической проницаемостью. Исследованы две схемы возбуждения ТПП: через фотонный кристалл и нанокompозитный слой. Численно показано, что схема возбуждения ТПП через НК более привлекательна, так как в условиях критической связи линия резонанса и, как следствие, полоса поглощения становится уже. Предложенная в работе модель может лечь в основу узкополосных поглотителей, основанных на таммовских плазмон-поляритонах, локализованных в резонансных ФК структурах.

ЛИТЕРАТУРА

1. М.А. Kaliteevski et. al. // Phys. Rev. B. 2007. V.76. P.165415.
2. R. G. Bikbaev et. al. // J. Opt. 2017.V. 19. P. 0851103.
3. М. Е. Sasin et. al. // Appl. Phys. Lett. 2008.V. 92. P. 251112.
4. J. C. Maxwell-Garnett // Philos. Trans. Roy. 1904. V. 203. P. 385.