

Таммовские плазмон-поляритоны на границе фотонного кристалла и прозрачных проводящих оксидов с близкой к нулю диэлектрической проницаемостью

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

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

²Сибирский федеральный университет, Красноярск

bikbaev@iph.krasn.ru

В последние годы огромный интерес вызывает стоячая поверхностная волна, не переносящая энергии - Таммовский плазмон-поляритон (ТПП) [1]. Формирование такой волны возможно на границе раздела двух отражающих сред, например, фотонного кристалла (ФК) и планарной металлической пленки. При этом амплитуда поля на длине волны ТПП локализована на границе раздела сред и экспоненциально спадает в обе стороны от неё. Экспериментально ТПП проявляется в виде узкого пика в энергетических спектрах образца [2]. В качестве материала с отрицательной диэлектрической проницаемостью могут выступать не только металлические пленки, но и материалы с резонансной дисперсией [3]. При этом была показана возможность формирования ТПП при конечных отрицательных и положительных значениях действительной части диэлектрической проницаемости, а также в случае, когда вещественная часть диэлектрической проницаемости принимает нулевое значение [4]. В качестве материалов с близкой к нулю диэлектрической проницаемостью могут выступать не только металл-диэлектрические наноконкомпозиты, но и прозрачные проводящие оксиды (ППО), такие как *ITO*, *AZO* и *GZO*. Подобные оксиды называют альтернативными классическим плазмонным материалам, таким как серебро и золото [5]. Привлекательность их связана с возможностью реализации большой нелинейности, создания модуляторов, поляризационных устройств, искривления волнового фронта, поглотителей и изоляторов. Все перечисленные эффекты реализованы за счет уникальным дисперсионных свойств прозрачных проводящих оксидов в области частот с близкой к нулю диэлектрической проницаемостью. В связи с этим в работе продемонстрирована возможность использования подобных материалов для формирования таммовских плазмон-поляритонов и управления их спектральными свойствами.

Рассмотрим ФК-структуру, представляющую собой слоистую среду, ограниченную конечным слоем прозрачного проводящего оксида (Рис. 1)

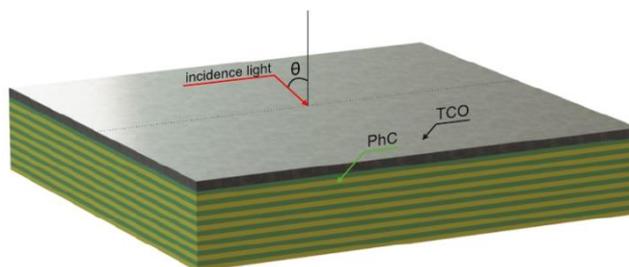


Рис. 1. Изображение исследуемой структуры.

Элементарная ячейка фотонного кристалла сформирована из материалов a и b с толщинами слоев и диэлектрическими проницаемостями соответственно d_a , ϵ_a и d_b , ϵ_b . Далее будем считать, что среда, в которую помещена ФК-структура, является вакуумом. Диэлектрическая проницаемость прозрачных проводящих оксидов в интервале длин

волн от 0.3 до 2 мкм с высокой степенью точности может быть описана с помощью модели Друде-Лоренца.

Зависимость диэлектрической проницаемости прозрачных проводящих оксидов от длины волны падающего света, изображена на Рис. 2.

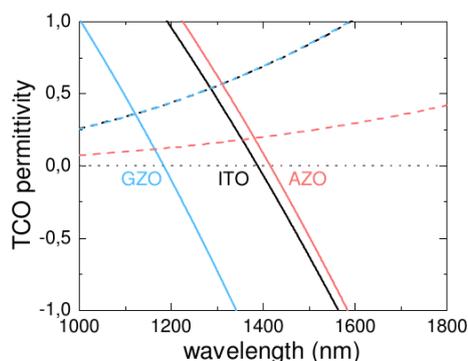


Рис. 2. Зависимости действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости прозрачных проводящих оксидов от длины волны падающего излучения. Сплошной линией изображены действительные части диэлектрической проницаемости, пунктирной – мнимые.

Из рисунка видно, что действительные части диэлектрических проницаемостей оксидов принимают близкие к нулю значения в ближней инфракрасной области спектра. Так $\text{Re } \epsilon_{AZO} \approx 0$ при $\lambda = 1416$ нм, $\text{Re } \epsilon_{GZO} \approx 0$ при $\lambda = 1184$ нм и $\text{Re } \epsilon_{ITO} \approx 0$ при $\lambda = 1389$ нм.

Энергетические спектры исследуемой структуры были рассчитаны методом трансфер-матрицы. Для определенности, в качестве материалов чередующихся слоев ФК, рассмотрим двуокись кремния (SiO_2) и двуокись циркония (ZrO_2). Толщины слоев фотонного кристалла, в случае его сопряжения с пленками *AZO*, *GZO* и *ITO* отображены в таблице 1.

Структура	d_a , нм	d_b , нм
<i>AZO</i> -ФК	220	208
<i>GZO</i> -ФК	200	160
<i>ITO</i> -ФК	220	195

Таблица. 1. Толщины слоев фотонного кристалла.

Результаты расчета представлены на рисунке 3. Из рисунка видно, что внутри запрещенной зоны ФК формируются таммовские плазмон-поляритоны в интервалах длин волн, в которых действительная часть диэлектрической проницаемости проводящих оксидов принимает близкие к нулю значения. Так в случае сопряжения ФК с пленкой *AZO* длина волны ТПП равна 1417 нм, с пленкой *GZO* - 1188, пленкой *ITO* - 1381 нм. Диэлектрические проницаемости оксидов на этих длинах волн соответственно равны $\epsilon_{GZO} = -0.011 + 0.2063i$, $\epsilon_{AZO} = -0.024 + 0.424i$ и $\epsilon_{ITO} = 0.034 + 0.6615i$. Отметим, что условие критической связи достигается при толщинах пленок $d_{AZO} = 480$ нм, $d_{GZO} = 280$ нм, $d_{ITO} = 260$ нм. Также из рисунков видно, что спектральная ширина линии, соответствующая таммовскому плазмон-поляритону, минимальна при сопряжении фотонного кристалла с пленкой *AZO*.

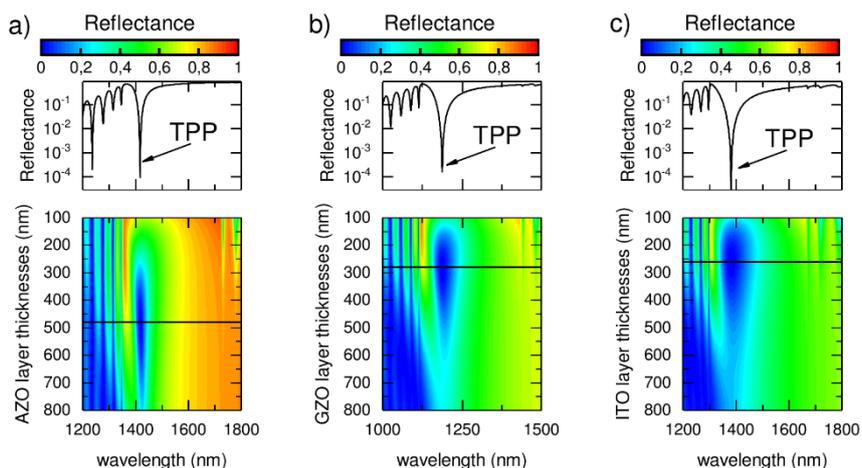


Рис. 3. Спектры пропускания фотонного кристалла, сопряженного со слоем (a) *AZO*, (b) *GZO* и (c) *ITO* при различных значениях их толщины.

Ширина линии ТПП максимальная в случае сопряжения ФК с пленкой *ITO*. В это случае внутри запрещенной зоны ФК формируется широкополосный таммовский плазмон-поляритон.

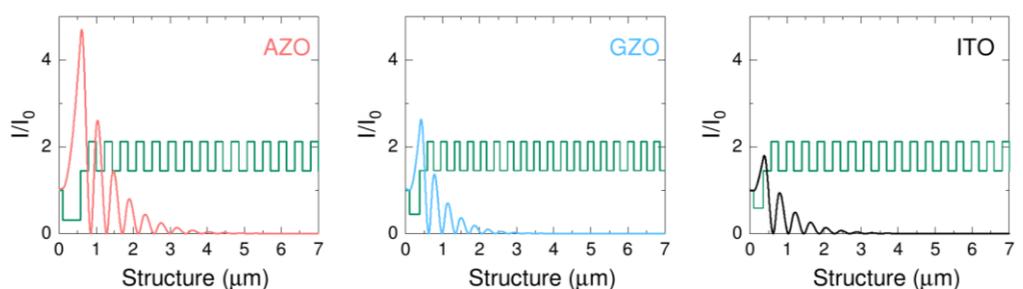


Рис. 4. Распределение локальной интенсивности поля на длине волны ТПП, нормированная на входную интенсивность для случаев сопряжения ФК с пленками *AZO*, *GZO* и *ITO*. Зеленой линией изображено пространственное распределение показателя преломления слоев ФК.

Пространственные распределения локальной интенсивности поля на частотах ТПП представлены на рисунке 4. Из рисунка видно, что локализация светового поля на длине волны ТПП для структуры *AZO*-ФК на 77% и 152% больше, чем для структур *GZO*-ФК и *ITO*-ФК, соответственно. Также отметим, что световое поле в ТПП локализовано в области, соизмеримой с длиной волны.

В работе исследованы таммовские плазмон-поляритоны, локализованные на границе фотонного кристалла и пленки прозрачного проводящего оксида с близкой к нулю диэлектрической проницаемостью. Численно показано, что, изменяя материал прозрачной оксидной пленки, можно получить либо ТПП с высокой добротностью (*AZO*-ФК), либо с большой спектральной шириной линии (*ITO*-ФК).

ЛИТЕРАТУРА

1. M.A. Kaliteevski et. al. // Phys. Rev. B. 2007. V.76. P.165415.
2. M. E. Sasin et. al. // Appl. Phys. Lett. 2008.V. 92. P. 251112.
3. A. N. Oraevsky, I. E. Protsenko // Quantum Electronics. 2001. V. 31. P. 252.
4. R. G. Bikbaev et. al. // J. Opt. 2017.V. 19. P. 0851103.
5. G. V. Naik et. al. // Opt. Mat. Exp. 2011. V. 1. P. 109099.