

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ
ПРОБЛЕМЫ ОПТИКИ “ФПО-2016”

УДК 535.5+535.345.1

ОПТИЧЕСКИЕ ЛОКАЛИЗОВАННЫЕ СОСТОЯНИЯ
В ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ,
ГРАНИЧАЩЕЙ С МЕТАЛЛОМ¹

© 2017 г. М. В. Пятнов^{a,*}, С. Я. Ветров^{a,b}, И. В. Тимофеев^{a,c}

^aИнститут инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского федерального университета,
660041 Красноярск, Россия

^bИнститут физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО
РАН, 660036 Красноярск, Россия

^cЛаборатория нелинейной оптики и спектроскопии Сибирского федерального университета,
660041 Красноярск, Россия

*E-mail: MaksPyatnov@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.03.2017 г.

Проведен расчет спектра пропускания света через структуру, содержащую металлический слой и холестерический жидкий кристалл с индуцированным планарным дефектом. Показана возможность существования в такой системе локализованных состояний на границе металла и кристалла. Изучены спектры пропускания при различном положении дефекта в структуре.

DOI: 10.7868/S0030403417080207

В настоящее время в литературе уделяется большое внимание к исследованию поверхностных электромагнитных состояний в фотонно-кристаллических средах [1]. Это связано как с рядом интересных фундаментальных явлений, обнаруженных при изучении таких состояний, так и с их практическими применениями. Особым типом поверхностных локализованных электромагнитных состояний, при котором поле экспоненциально затухает по обе стороны от границы раздела, является оптическое таммовское состояние (ОТС) [2]. Такое состояние является оптическим аналогом таммовских связанных состояний электронов на поверхности кристалла. ОТС может возбуждаться при нормальном падении света между двумя различными фотонными кристаллами, имеющими перекрывающиеся запрещенные зоны [2, 3], или между фотонным кристаллом и средой с отрицательной диэлектрической проницаемостью [4, 5]. В случае возбуждения ОТС на границе с металлом его также называют таммовским плазмон-поляритоном. Экспериментально эти локализованные состояния проявляются в виде узкого резонанса в оптическом спектре пропускания или отражения образца [6]. Среди предложенных и реализованных применений ОТС от-

метим органические солнечные элементы [7], лазеры [8], сенсоры [9], поглотители [10].

Для практических применений очень часто важно иметь материалы, спектральными свойствами которых можно управлять. Одними из таких фотонно-кристаллических материалов являются холестерические жидкие кристаллы (ХЖК), которые представляют из себя хиральные органические структуры [11, 12]. ХЖК образованы сильно анизотропными молекулами вытянутой формы. Хиральность молекул приводит к повороту ориентации их длинных осей, в результате чего образуется пространственная спиральная структура. Изменяя температуру, давление, прикладываемые электромагнитные поля и механические напряжения, можно, например, менять шаг холестерической спирали и тем самым положение запрещенной зоны. ХЖК в отличие от скалярных фотонных кристаллов обладают селективным по отношению к поляризации дифракционным отражением. Так, для циркулярно поляризованного света, падающего вдоль оси спирали с тем же направлением поляризации, что и закрутка ХЖК, существует брэгговское отражение. Область брэгговского отражения находится в диапазоне длин волн между $\lambda_1 = pn_o$ и $\lambda_2 = pn_e$, где p – шаг спирали, n_o и n_e – обыкновенный и необыкновенный показатели преломления ХЖК. Свет с противоположной круговой поляризацией не испытывает дифракционного отражения.

¹ Международной оптический конгресс “Оптика – XXI век”, IX Международная конференция “Фундаментальные проблемы оптики” “ФПО-2016”, Санкт-Петербург, Россия, 17–21 октября 2016 г.

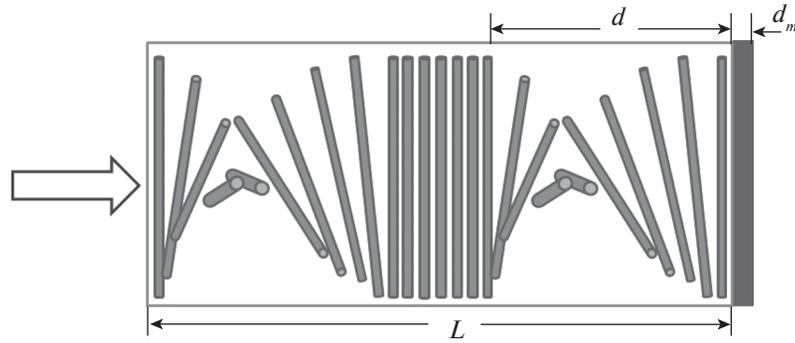


Рис. 1. Схематическое представление рассматриваемой структуры.

Ранее было показано [13–15], что получить ОТС, локализованное на границе ХЖК и металла, при нормальном падении затруднительно. Это связано с поляризационными особенностями отражения света от ХЖК и металла. Особенностью ХЖК является то, что отражается только свет с круговой поляризацией с тем же направлением, что и закрутка спирали. При этом после отражения свет сохраняет направление круговой поляризации. Свет противоположной круговой поляризации не испытывает дифракционного отражения. Металл, наоборот, отражает свет любой поляризации, но при отражении возникает разность фаз, что приводит к тому, что дифрагирующая (совпадающая с направлением закрутки спирали) для ХЖК поляризация становится недифрагирующей, и наоборот. В связи с описанными особенностями для локализации света между ХЖК и металлом в [13, 14] предложено использовать для сохранения поляризации света при отражении от металла фазоизменяющий элемент, внедренный между металлом и ХЖК. В качестве такого элемента была рассмотрена четвертьволновая фазовая пластинка. В [15] была рассмотрена структура, состоящая из металлического слоя и противоположно закрученных слоев ХЖК. ОТС, локализованное на границе ХЖК и анизотропного зеркала металлического типа, описано в [16]. Предложенные способы позволяют локализовать свет на основе сложных ХЖК-структур. В настоящей работе мы предлагаем новый способ локализации света между ХЖК и металлической пленкой. Особенностью предлагаемой модели является то, что по сути она состоит только из холлестерика и металла.

Ряд авторов [17–21] исследовали ХЖК-системы, представляющие собой ХЖК, содержащий анизотропный дефектный слой. В работе [21] авторами были сконструированы оптические ХЖК-ячейки с электродами, расположенными перпендикулярно оси спирали ХЖК. Используя такие ячейки, им удалось раскрутить спираль ХЖК в середине слоя, тем самым создав планар-

ный дефект. При помощи термоэлектрического эффекта в [18] была создана локальная деформация в середине одномерной периодической геликоидальной структуры.

На основе данных исследований мы рассмотрели структуру, состоящую из металлической пленки и ХЖК, содержащего планарный дефект (рис. 1). Толщина слоя ХЖК $L = 11$ мкм, шаг спирали $p = 0.4$ мкм, его обыкновенный и необыкновенный показатели преломления $n_o = 1.45$ и $n_e = 1.55$ соответственно. При данных параметрах запрещенная зона ХЖК находится между 580 и 620 нм. В центре слоя спираль ХЖК раскручена на длине 3 мкм, что аналогично тому, что там расположен полуволновой анизотропный дефект. Структура окружена средой с показателем преломления, равным усредненному показателю преломления ХЖК. Толщина металлической пленки $d_m = 50$ нм, ее диэлектрическая проницаемость была задана в виде приближения Друде:

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

где вклад ионного остова $\hbar\epsilon_0 = 5$, плазменная частота $\hbar\omega_p = 9$ эВ и величина, обратная времени релаксации, $\gamma = 0.02$ [22]. Данные параметры соответствуют серебру.

Изучение спектров пропускания и распределения интенсивности поля в структуре были проведены на основе матричного метода расчета слоистых анизотропных структур Берремана [23].

В работах [20, 21] было показано, что наличие в структуре ХЖК полуволнового дефектного слоя приводит к потере поляризационной зависимости дифракционного отражения. Это означает, что ХЖК начинает отражать свет любой поляризации, а не только циркулярно поляризованное излучение с направлением, совпадающим с закруткой спирали ХЖК. На рис. 2 приведен рассчитанный спектр пропускания света круговых поляризаций для рассматриваемой системы “ХЖК–полуволновой дефект–ХЖК–металл”. На

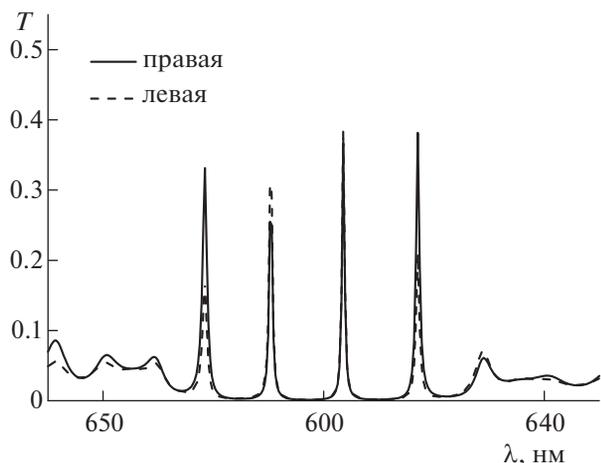


Рис. 2. Спектр пропускания структуры для круговых поляризаций падающего света.

частотах, соответствующих зоне брэгговского отражения кристалла, возникли несколько пиков пропускания. Отметим, что пики возникли для обеих круговых поляризаций.

Каждый пик на спектре соответствует локализованному состоянию. Рисунок 3 показывает распределение интенсивности электрического поля для правой круговой поляризации на длине волны 603.5 нм. Для остальных частот распределение поля выглядит аналогично. Большая часть поля локализована на границе металла и ХЖК. Затухание поля локализованной моды внутри металла обусловлено отрицательной диэлектрической проницаемостью металлической пленки, в то время как его затухание внутри ХЖК обусловлено брэгговским отражением. Заметим, что часть поля локализована на дефекте с максимумом в центре полуволнового слоя. Причина этого заключается в том, что изучаемую систему можно рассматривать как композицию нескольких резонаторов. Планарный дефект можно рассматривать как один из них.

Рассмотрим, как изменятся спектральные свойства структуры при варьировании положения планарного дефекта в ХЖК. Рассчитанный спектр пропускания в зависимости от положения дефекта относительно центра ХЖК показан на рис. 4. Из него видно, что спектр пропускания существенно зависит от положения дефекта в ХЖК. При уменьшении расстояния между дефектом и металлом резонансы постепенно пропадают. При увеличении расстояния пики уплотняются, и величина трансмиссии на их частотах растет. Причина этого заключается в том, что величина коэффициента отражения слоем ХЖК зависит от его толщины. При малых толщинах слоя ХЖК между металлом и дефектом большая часть света проходит сквозь этот слой, пройдя сквозь полу-

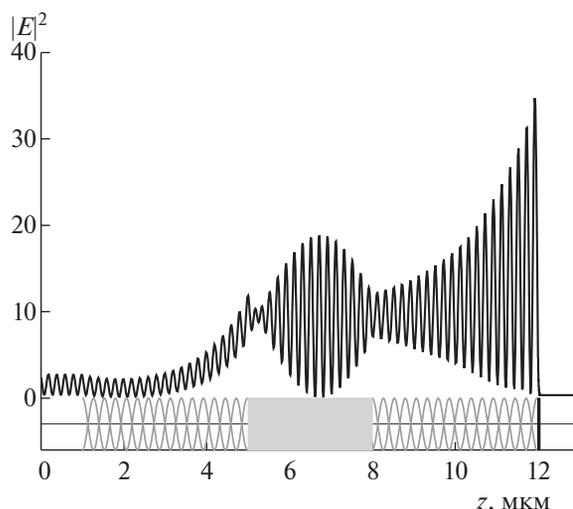


Рис. 3. Распределение интенсивности электрического поля для правой круговой поляризации падающего света для длины волны 603.5 нм.

волновой дефект, меняет свою поляризацию и выходит сквозь второй слой ХЖК. Таким образом, наибольшее влияние на величину локализации света имеет часть ХЖК, расположенная между дефектом и металлической пленкой.

Таким образом, продемонстрировано существование поверхностных электромагнитных состояний, локализованных в структуре, содержащей серебряную пленку и ХЖК с планарным полуволновым дефектом. Данный дефект может быть индуцирован, например, путем приложения внешнего электрического поля перпендикулярно оси спирали ХЖК. Установлено, что при такой геометрии свет любой поляризации падающей волны локализуется с максимумом интенсивности поля на границе металла и ХЖК. Различные

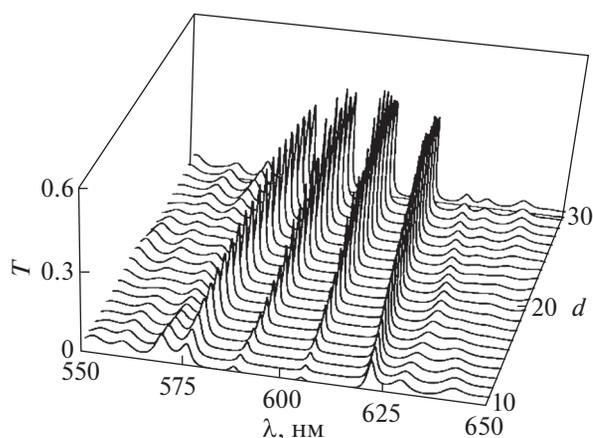


Рис. 4. Зависимость спектра пропускания для правой круговой поляризации от числа периодов d между дефектом и металлом.

эллиптичности волн, прошедших через ХЖК, и их поляризационные свойства приводят к различным коэффициентам пропускания для каждой поляризации. Показана существенная зависимость спектра пропускания рассматриваемой структуры от положения дефекта в ХЖК.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности в рамках научного проекта № 17-42-240464.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виноградов А.П., Дорофеев А.В., Мерзликин А.М., Лисянский А.А.* // УФН. 2010. Т. 180. № 3. С. 249; *Vinogradov A.P., Dorofeev A.V., Merzlikin A.M., Lisyanskiy A.A.* // Phys. Usp. 2010. V. 53. P. 243. doi 10.3367/UFNe.0180.201003b.0249
2. *Kavokin A.V., Shelykh I.A., Malpuech G.* // Phys. Rev. B. 2005. V. 72. P. 233102. doi 10.1103/PhysRevB.72.233102
3. *Goto T., Dorofeev A.V., Merzlikin A.M., Baryshev A.V., Vinogradov A.P., Inoue M., Lisyanskiy A.A., Granovsky A.B.* // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 101. P. 113902. doi 10.1103/PhysRevLett.101.113902
4. *Kaliteevski M., Iorsh I., Brand S., Abram R.A., Chamberlain J.M., Kavokin A.V., Shelykh I.A.* // Phys. Rev. B. 2007. V. 76. P. 165415.
5. *Ветров С.Я., Бикбаев Р.Г., Тимофеев И.В.* // ЖЭТФ. 2013. Т. 144. № 6(12). С. 1129; *Vetrov S.Y., Bikbaev R.G., Timofeev I.V.* // JETP. 2013. V. 117. №. 6. P. 988. doi 10.1134/S1063776113140185
6. *Sasin M.E., Seisyan R.P., Kaliteevski M.A., Brand S., Abram R.A., Chamberlain J.M., Egorov A.Yu., Vasil'ev A.P., Mikhrin V.S., Kavokin A.V.* // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 92. P. 251112. doi 10.1063/1.2952486
7. *Zhang X.-L., Song J.-F., Li X.-B., Feng J., Sun H.-B.* // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 101. P. 243901. doi 10.1063/1.4770316
8. *Symonds C., Lheureux G., Hugonin J.P., Greffet J.J., Laverdant J., Brucoli G., Lemaitre A., Senellart P., Bellessa J.* // Nano Lett. 2013. V. 13. P. 3179. doi 10.1021/nl401210b
9. *Auguie B., Fuertes M.C., Angelomé P.C., Abdala N.L., Soler Illia G.J.A.A., Fainstein A.* // ACS Photon. 2014. V. 1. P. 775. doi 10.1021/ph5001549
10. *Gong Y., Liu X., Lu H., Wang L., Wang G.* // Opt. Exp. 2011. V. 19. P. 18393. doi 10.1364/OE.19.018393
11. *Беляков В.А., Сонин А.С.* Оптика холестерических жидких кристаллов. М.: Наука, 1982. 360 с.
12. *Блинов Л.М.* Жидкие кристаллы: Структура и свойства. М.: Книжный дом "Либроком", 2013. 480 с.; *Blinov L.M.* Structure and Properties of Liquid Crystals. Dodrecht: Springer, 2011. 457 p.
13. *Vetrov S.Ya., Pyatnov M.V., Timofeev I.V.* // Opt. Lett. 2014. V. 39. P. 2743. doi 10.1364/OL.39.002743
14. *Vetrov S.Ya., Pyatnov M.V., Timofeev I.V.* // J. Opt. 2016. V. 18. P. 015103. doi 10.1088/2040-8978/18/1/015103
15. *Pyatnov M.V., Vetrov S.Ya., Timofeev I.V.* // Liq. Cryst. 2017. V. 44. P. 674. doi 10.1080/02678292.2016.1229055
16. *Тимофеев И.В., Ветров С.Я.* // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 104. № 6. С. 393; *Timofeev I.V., Vetrov S.Ya.* // JETP Lett. 2016. V. 104. P. 380. doi 10.1134/S0021364016180119
17. *Gevorgyan A.H., Haratyunyan M.Z.* // Phys. Rev. E. 2007. V. 76. P. 031701. doi 10.1103/PhysRevE.76.031701
18. *Hsiao Y., Wang H., Lee W.* // Opt. Express. 2014. V. 22. P. 3593. doi 10.1364/OE.22.003593
19. *Song H., Park B., Shin K.-C., Ohta T., Tsunoda Y., Hoshi H., Takanishi Y., Ishikawa K., Watanabe J., Nishimura S., Toyooka T., Zhu Z., Swager T.M., Takezoe H.* // Adv Mater. 2004. V. 16. P. 779. doi 10.1002/adma.200306360
20. *Mitov M.* // Adv. Mat. 2012. V. 24. №. 47. P. 6260. doi 10.1002/adma.201202913
21. *Алавердян Р.Б., Аллавердян К.Р., Геворгян А.А., Чулинггарян А.Д., Чилинггарян Ю.С.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. № 9. С. 85; *Alaverdyan R.B., Allakhverdyan K.R., Gevorgyan A.H., Chilingaryan A.D., Chilingaryan Yu.S.* // Tech. Phys. 2010. V. 55. P. 1317. doi 10.1134/S1063784210090148
22. *Johnson P.B., Christy R.W.* // Phys. Rev. B. 1972. V. 6. P. 4370. doi 10.1103/PhysRevB.6.4370
23. *Berreman D.W.* // J. Opt. Soc. Am. 1972. V. 62. P. 502. doi 10.1364/JOSA.62.000502