

07

Термооптическое переключение в одномерном фотонном кристалле

© В.А. Гуняков, В.П. Герасимов, С.А. Мысливец,
В.Г. Архипкин, С.Я. Ветров, Г.Н. Камаев,
А.В. Шабанов, В.Я. Зырянов, В.Ф. Шабанов

Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск
E-mail: gun@iph.krasn.ru
Красноярский государственный технический университет
Институт физики полупроводников, Новосибирск

Поступило в Редакцию 1 июня 2006 г.

Исследована температурная зависимость спектра пропускания одномерного мультислойного фотонного кристалла с дефектным слоем в центре структуры. В качестве дефекта использован гомеотропно ориентированный слой нематического жидкого кристалла 5ЦБ. Продемонстрирован спектральный сдвиг дефектных мод на 10 nm за счет изменения показателя преломления жидкого кристалла при нагреве до изотропной фазы. Сравнение экспериментальных данных с результатами численного анализа показало важность учета затухания дефектных мод.

PACS: 42.70.Df, 78.20.-e

Фотонные кристаллы (ФК) — структуры с пространственной модуляцией диэлектрических свойств на масштабе порядка длины волны электромагнитного излучения — вызывают все больший интерес исследователей в связи с перспективами их практического использования в различных областях оптоэлектроники и СВЧ-техники [1–5]. Наличие неоднородностей (дефектов) в периодической решетке приводит к локализации электромагнитной волны в дефектных модах с дискретными частотами, лежащими в запрещенных зонах невозмущенного ФК. Данное явление может быть использовано для создания узкополосных спектральных фильтров, низкопороговых лазеров, высокоэффективных нелинейно-оптических преобразователей и т. д. Существенно расширить функциональные возможности ФК можно при использовании высоколабильных материалов (например, жидких кристаллов) для формирования дефектов структуры. Богатое многообразие различных электро-,

магнито-, акусто- и термооптических эффектов, проявляющихся в жидких кристаллах (ЖК), позволяет разработать на их основе ряд принципиально новых элементов электронной техники с перестраиваемыми характеристиками [1,3–7]. Так, например, в работе [6] реализовано управление спектральными характеристиками одномерного ФК при переориентации дефектного ЖК-слоя электрическим полем. Температурные зависимости спектра пропускания двумерного оптического волновода с ФК-структурой, образованной цилиндрическими микропорами, изучались в [7].

В задачу настоящей работы входило исследование возможности термооптического метода управления спектром пропускания одномерных мультислойных ФК-структур с жидкокристаллическим дефектным слоем.

В качестве дефекта использован слой нематического жидкого кристалла (ЖК) 4-н-пентил-4'-цианобифенил (5ЦБ), имеющего последовательность фазовых переходов $K-22.5^{\circ}C-N-34^{\circ}C-I$ между твердокристаллическим, нематическим жидкокристаллическим и изотропно жидким состояниями. Изучена модификация спектра пропускания ФК, обусловленная изменением диэлектрических характеристик данного ЖК при вариации температуры, особенно в окрестности фазового перехода нематика в изотропную фазу, где наблюдается резкое изменение показателя преломления ЖК [8].

Вставка на рис. 1, *a* схематически показывает структуру исследуемого одномерного фотонного кристалла, содержащего дефектный слой в центре. В термостатируемой кювете два одинаковых мультислойных зеркала собирались в плоскопараллельную ячейку типа сэндвича. Каждое зеркало ячейки состоит из одиннадцати слоев двуокиси циркония (ZrO_2) с показателем преломления $n_1 = 2.04$ и толщиной $t_1 \simeq 55$ nm и десяти слоев двуокиси кремния (SiO_2) с показателем преломления $n_2 = 1.45$ и толщиной $t_2 \simeq 102$ nm, поочередно напыленных на поверхность стеклянной подложки. Здесь значения показателей преломления $n_{1,2}$ и далее для жидкого кристалла $n_{\perp,i}$ приведены для длины волны $\lambda = 589$ nm. Использовалась ячейка с зазором между зеркалами $L \simeq 5.8$ μ m, толщина зазора задавалась фторопластовыми прокладками. Затем после нагрева сэндвича до температуры $36^{\circ}C$ в зазор вводился ЖК в изотропном состоянии. Обнаружено, что граничащий с жидким кристаллом диэлектрический слой ZrO_2 задает однородную гомеотропную (перпендикулярную плоскости подложек) ориентацию

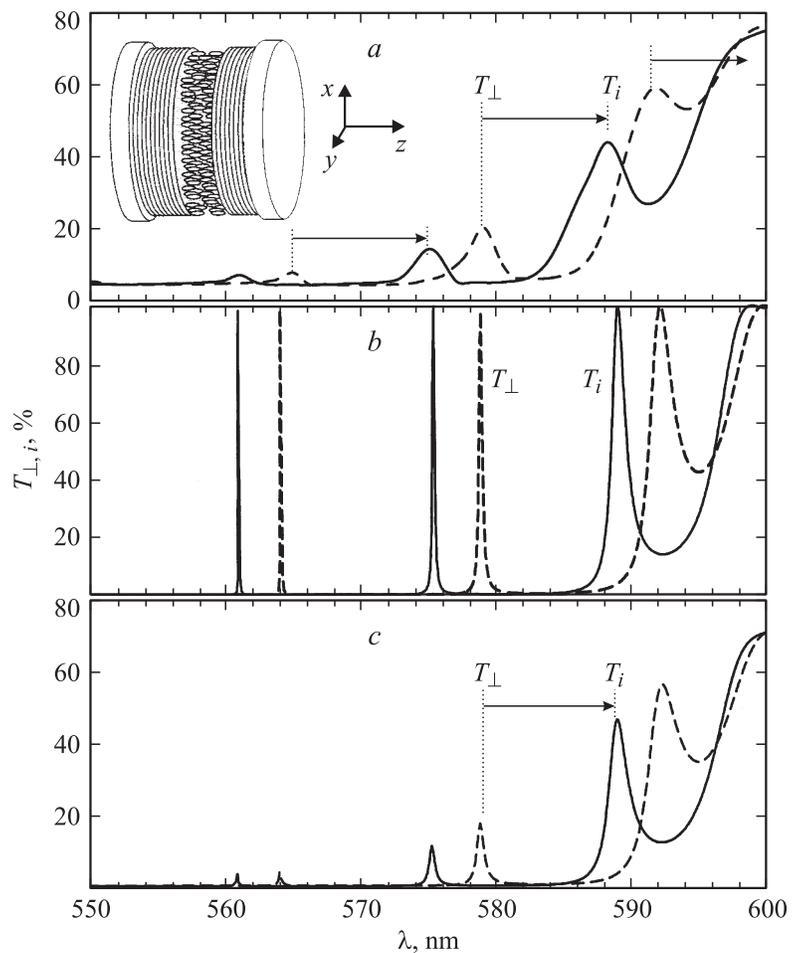


Рис. 1. Спектры пропускания фотонного кристалла с гомеотропно ориентированным жидкокристаллическим дефектным слоем: *a* — экспериментальные данные, *b* и *c* — результаты численного моделирования спектров, приведенных в верхней части рисунка без учета (*b*) и с учетом (*c*) потерь ($\text{Im } n_{\text{ZrO}_2, \text{SiO}_2} = 2 \cdot 10^{-3}$, $\text{Im } n_{\text{LC}} = 2.5 \cdot 10^{-4}$).

директора нематика, идентифицированную по соответствующим текстурным фигурам при коноскопическом наблюдении с использованием поляризационного микроскопа ПОЛАМ-Р113. Термостатированная кювета позволяла проводить измерения спектров пропускания ЖК с жидкокристаллическим дефектным слоем в диапазоне температур $20 \div 40^\circ\text{C}$ с точностью стабилизации $\pm 0.2^\circ\text{C}$.

Спектры пропускания регистрировались с помощью спектрометра КСВУ-23. При выбранных параметрах регистрации спектральное разрешение установки было не хуже 0.1 nm . Ячейка устанавливалась таким образом, чтобы свет падал нормально к поверхности зеркал. В такой схеме эксперимента при гомеотропной ориентации директора ЖК в дефектном слое измеряется перпендикулярная компонента T_\perp светопропускания.

Рассматриваемая ЖК-структура формирует первую запрещенную зону в спектре пропускания в диапазоне длин волн $460\text{--}595\text{ nm}$ с набором локализованных мод, положение которых определяется параметрами дефектного слоя и мультислойных диэлектрических покрытий зеркал. На рис. 1, *a* приведена экспериментально наблюдаемая вблизи длинноволнового края запрещенной зоны ЖК перпендикулярно поляризованная компонента спектра пропускания для нематической (T_\perp , пунктирная линия) и изотропной фазы (T_i , сплошная линия) 5ЦБ в окрестности фазового перехода нематик — изотропная жидкость, где происходит скачок показателя преломления ЖК от $n_\perp = 1.551$ до $n_i = 1.588$. Видно, что дефектные моды, соответствующие нематической фазе, при нагреве до изотропного состояния также скачком смещаются в длинноволновую область. При этом самая длинноволновая мода уходит за границу запрещенной зоны. Стрелки на рисунке указывают направления смещения дефектных мод с ростом температуры. Скачок длины волны наблюдаемых дефектных мод в точке фазового перехода составляет около 10 nm . Дефектные моды имеют максимальную амплитуду вблизи краев запрещенной зоны. В центре стоп-зоны светопропускание в дефектных модах падает до фонового.

Моделирование спектров пропускания фотонного кристалла с ЖК-дефектом осуществлялось с помощью метода рекуррентных соотношений [9], который также позволяет определить и распределение поля внутри ЖК. В расчетах предполагалось, что слева и справа рассматриваемая нами структура ограничена вакуумом ($n = 1$). Поле в произвольном j -м слое представим в виде суперпозиции бегущих

навстречу друг другу волн

$$E(z) = [A(z) \exp(is(z)z) + B(z) \exp(-is(z)z)], \quad (1)$$

где $s(z) = kn(z)$, $k = 2\pi/\lambda$. Разобьем все слои ФК на достаточно большое число M подслоев, таких, что в пределах каждого подслоя с номером m поле E_m можно считать постоянным. Из условий непрерывности электрической и магнитной составляющей полей на границе раздела подслоев с номерами m и $m + 1$ получаем систему уравнений:

$$A_m + B_m = g_{m+1}^{-1} A_{m+1} + g_{m+1} B_{m+1}, \quad (2)$$

$$s_m(A_m - B_m) = s_{m+1}(g_{m+1}^{-1} A_{m+1} - g_{m+1} B_{m+1}), \quad (3)$$

где $g_m = \exp(is_m t_m)$, t_m — толщина m -го подслоя. Уравнения (2) и (3) позволяют рассчитать амплитуду поля внутри каждого подслоя m и вычислить коэффициенты отражения и пропускания всей структуры в целом. Из этих уравнений нетрудно получить рекуррентные соотношения на амплитудные коэффициенты отражения $R_m = B_m/A_m$:

$$R_m = \frac{r_m + g_{m+1}^2 R_{m+1}}{1 + r_m g_{m+1}^2 R_{m+1}}, \quad (4)$$

которые связывают R_m и R_{m+1} в соседних подслоях. Здесь $r_m = (s_m - s_{m+1})/(s_m + s_{m+1})$. Используя уравнение (2), получаем выражение для A_m в произвольном подслое m :

$$A_{m+1} = A_m \frac{1 + R_m}{g_{m+1}^{-1} + g_{m+1} R_{m+1}}. \quad (5)$$

С помощью полученного рекуррентного соотношения (4) находим все R_m , начиная с правой границы ФК, с учетом граничного условия $R_{M+1} = 0$. Используя (5), находим все A_m , начиная с левой границы ФК. Затем находим амплитуду обратной волны $B_m = A_m R_m$. Коэффициенты пропускания, отражения и поглощения определяются соотношениями

$$T = |A_{M+1}/A_0|^2, \quad R = |B_0/A_0|^2 \quad \text{и} \quad A = 1 - T - R \quad (6)$$

соответственно. В расчетах учитывалась дисперсия показателей преломления всех компонентов рассматриваемой ФК структуры.

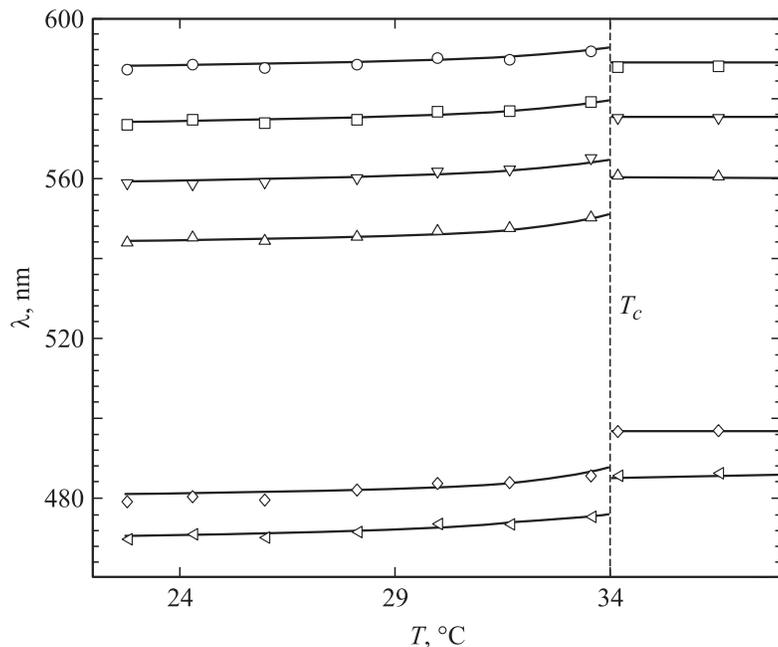


Рис. 2. Температурная зависимость длин волн, соответствующих максимумам пропускания дефектных мод. Символами обозначены экспериментальные точки; сплошной линией — зависимости, рассчитанные по формуле (6).

На рис. 1, *b* приведены рассчитанные спектры пропускания ФК-структуры с параметрами, соответствующими исследуемому образцу, которые, как видно, хорошо согласуются с экспериментальными данными по спектральному положению дефектных мод. В то же время следует отметить существенное отличие формы резонансных линий: амплитуда экспериментально наблюдаемых дефектных мод гораздо ниже, а их ширина заметно больше, чем для результатов расчета. Это может быть связано с особенностями реальной структуры ФК: флуктуациями толщин слоев, несовершенством поверхностей зеркал и пр. Кроме того, возможные неоднородности среды могут вызывать дополнительные потери из-за рассеяния света, ухудшающего добротность резонатора ФК. В первом приближении такого рода потери эффективно можно учесть

путем введения добавок в мнимую часть показателей преломления компонентов ФК-структуры, подбирая величину добавок из условия соответствия с экспериментом. На рис. 1, с приведены рассчитанные таким образом спектры пропускания ФК.

Рис. 2 показывает температурные зависимости длин волн наблюдаемых дефектных мод. Видно, что в пределах существования мезофазы с ростом температуры моды слабо сдвигаются в длинноволновую область спектра, что обусловлено сравнительно малым увеличением показателя преломления обыкновенной волны n_{\perp} [8]. В точке фазового перехода нематик–изотропная жидкость T_c наблюдается резкое „красное“ смещение всех пиков. При дальнейшем нагревании положение максимумов пропускания дефектных мод не меняется, поскольку в изотропной фазе показатель преломления ЖК остается практически постоянным. Видно хорошее согласие экспериментальных и рассчитанных спектральных положений пиков локализованных состояний во всей исследованной области температур.

Таким образом, в данной работе показано, что небольшое изменение показателя преломления дефектообразующего материала проявляется в существенной трансформации спектра пропускания одномерной фотонно-кристаллической структуры, что показывает принципиальную возможность использования наблюдаемого термооптического эффекта для создания различных элементов оптоэлектронной техники.

Работа выполнена при поддержке грантов: РНП.2.1.1.1814, РФФИ № 05-03-32852, Президиума РАН и ОФН РАН, интеграционного № 33 СО РАН.

Список литературы

- [1] *Ветров С.Я., Шабанов А.В.* // ЖЭТФ. 1992. Т. 101. С. 1341–1346.
- [2] *Joannopoulos J.D., Meade R.D., Winn J.N.* Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. Princeton, Princeton University Press, 1995. 137 p.
- [3] *Busch K., Wehrspohn R.B., Lölkes S. et al.* Photonic Crystals: Advances in Design, Fabrication, and Characterization. John Wiley & Sons, 2004. 354 p.
- [4] *Kitzerow H.* // Liquid Crystal Today. 2002. V. 11. P. 3–7.
- [5] *Шабанов В.Ф., Ветров С.Я., Шабанов А.В.* Оптика реальных фотонных кристаллов. Жидкокристаллические дефекты, неоднородности. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 240 с.

- [6] *Ozaki R., Ozaki M., Yoshino K.* // Electronics and Communications in Japan. Part 2. 2005. V. 88. N 4. P. 46–53.
- [7] *Schuller Ch., Reithmaier J.P., Zimmermann J.* // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 87. P. 121 105.
- [8] *Зырянов В.Я., Эпитейн В.Ш.* // ПТЭ. 1987. № 2. С. 164–166.
- [9] *Бушуев В.А., Прямиков А.Д.* // Квант. электрон. 2003. Т. 33 (6). С. 515–519.