

Физика

Краткое сообщение
УДК 532.783

АНОМАЛЬНЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ СДВИГ ДЕФЕКТНЫХ МОД МУЛЬТИСЛОЙНОЙ ФОТОННОЙ СТРУКТУРЫ С ГИБРИДНО-УПОРЯДОЧЕННЫМ ХОЛЕСТЕРИКОМ

В. А. Гуняков^{1*}, В. С. Сутормин^{1,2}, А. С. Зуев^{1,2}, И. В. Тимофеев^{1,2}, В. Я. Зырянов¹

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

²*Институт инженерной физики и радиоэлектроники, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия*

ИНФОРМАЦИЯ

История статьи:

Поступила 23.07.2024

Одобрена 9.08.2024

Принята 16.08.2024

Ключевые слова:

хиральная фотонная структура,
гибридно-упорядоченный холестерик,
дефектная мода,
аномальный спектральный сдвиг,
геометрическая фаза

АННОТАЦИЯ

Исследованы изменения поляризационных и спектральных свойств мультислойной фотонной структуры с включением гибридно-упорядоченного холестерика в качестве дефекта, индуцированные переменным электрическим полем. Экспериментально определена величина аномального синего сдвига *o*-мод, соответствующего максимально достижимому вкладу неадиабатической геометрической фазы в общий фазовый набег, приобретаемый циркулирующей в резонаторе световой волной.

DOI:

10.18083/LCApp1.2024.3.94

Для цитирования:

Гуняков В. А., Сутормин В. С., Зуев А. С., Тимофеев И. В., Зырянов В. Я. Аномальный спектральный сдвиг дефектных мод мультислойной фотонной структуры с гибридно-упорядоченным холестериком // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2024. Т. 24, № 3. С. 94–99.

Physics

Brief Communication

**ANOMALOUS SPECTRAL SHIFT OF DEFECT MODES OF MULTILAYER PHOTONIC
STRUCTURE WITH HYBRID-ALIGNED CHOLESTERIC**

V. A. Gunyakov^{1*}, V. S. Sutormin^{1,2}, A. S. Zuev^{1,2}, I. V. Timofeev^{1,2}, V. Ya. Zyryanov¹

¹*Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia*

²*Institute of Engineering Physics and Radio Electronics, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia*

ARTICLE INFO:

Article history:

Received 23 July 2024

Approved 9 August 2024

Accepted 16 August 2024

Key words:

chiral photonic structure,
hybrid-aligned cholesteric,
defect mode,
anomalous spectral shift,
geometric phase

ABSTRACT

The electrically induced changes in the polarized and spectral properties of a multilayer photonic structure with a hybrid-aligned cholesteric embedded as a defect have been investigated. The value of anomalous blue shift of *o*-modes corresponding to the maximum obtainable contribution of the non-adiabatic geometric phase to the total phase incursion acquired by the light wave circulating in the resonator has been experimentally determined.

DOI:

10.18083/LCAppl.2024.3.94

For citation:

Gunyakov V. A., Sutormin V. S., Zuev A. S., Timofeev I. V., Zyryanov V. Ya. Anomalous spectral shift of defect modes of multilayer photonic structure with hybrid-aligned cholesteric. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2024, **24** (3), 94–99 (in Russ.).

Введение

Мультислойные фотонные структуры (ФС) типа резонаторов Фабри–Перо на основе брэгговских зеркал с включением анизотропных хиральных сред являются уникальными электрооптическими материалами для создания функциональных элементов в устройствах фотоники [1]. Перспективны структуры, содержащие в качестве дефектного слоя гибридно-упорядоченный холестерический жидкий кристалл (ЖК) [2], легко управляемый электрическим полем. Для резонатора с асимметричными граничными условиями на зеркалах в слое холестерика формируется конфигурация, которая характеризуется, кроме закручивания директора в спиральную структуру, его наклоном от небольшого угла на зеркале с тангенциальными условиями ориентации ЖК практически до 90° на зеркале с нормальными граничными условиями. Локализация волн в хиральных ФС, в том числе и для ФС с гибридно-упорядоченным холестериком, требует учета геометрической фазы (ГФ), вклад которой проявляется в виде сопровождающего спиральную конфигурацию директора аномального сдвига спектрального положения дефектных мод. Раскручивая спираль электрическим полем, можно управлять вкладом ГФ.

Эксперимент

Объектом исследования являлась мульти-слойная ФС Sub/H(LH)⁵–HAC–(HL)⁵H/Sub: здесь Sub – подложки с ITO электродами на внутренних сторонах; зеркала образованы чередующимися слоями оксидов ZrO₂ ($n_H = 2,05$, $d_H = 63$ нм) и SiO₂ ($n_L = 1,45$, $d_L = 82$ нм). При числе бислоев LH и HL, равном пяти, в интервале 425–625 нм спектра пропускания формируется фотонная запрещенная зона (ФЗЗ). Наличие дефекта приводит к возникновению в ФЗЗ локализованных на этом дефекте оптических мод. В качестве дефекта использовался гибридно-упорядоченный холестерик (*hybrid-aligned cholesteric* – HAC) – смесь нематического ЖК 4-н-

пентил-4'-цианобифенил (5ЦБ) и хиральной добавки холестерилацетат (ХЗ) в весовом соотношении 1:0,01. Толщина дефекта $d = 7,3$ мкм и равновесный шаг холестерической спирали $p = 16$ мкм дают соотношение $d/p \sim 0,45$. Нанесенные на зеркала ориентанты поливиниловый спирт (PVA) и додецилсульфат натрия (SDS) задавали тангенциальные и нормальные граничные условия для холестерика на входном и выходном зеркале, соответственно. Модификация спектра дефектных мод, сопровождающая изменение конфигурации директора при раскручивании спирали электрическим полем частотой 1 кГц, исследовалась при температуре 23 °С с использованием спектрометра HR4000 Ocean Optics.

Результаты и их обсуждение

В исходном состоянии конфигурация директора холестерика является гибридно-упорядоченной структурой, для которой, кроме закручивания директора с общим углом поворота $\phi \sim 118^\circ$, одновременно происходит его наклон от 0° на входном зеркале до 90° на выходном зеркале (рис. 1, *a*). Распределения углов ориентации директора ЖК-смеси внутри дефектного слоя ФС рассчитаны в рамках минимизации энергии упругих деформаций поля директора при асимметричных граничных условиях. Приложенное напряжение $U = 7$ В раскручивает холестерическую спираль, что приводит к формированию квазигомеотропной конфигурации (рис. 1, *b*). Как следует из представленных на рисунке микрофотографий текстур ФС, полученных на микроскопе в скрещенных поляризаторах, структурные превращения в холестерике модифицируют его оптический отклик. Так, в отсутствии напряжения оптическая текстура (рис. 1, *a*) демонстрирует характерное для хиральных сред поведение: не происходит полного затемнения текстуры при вращении образца на предметном столике микроскопа.

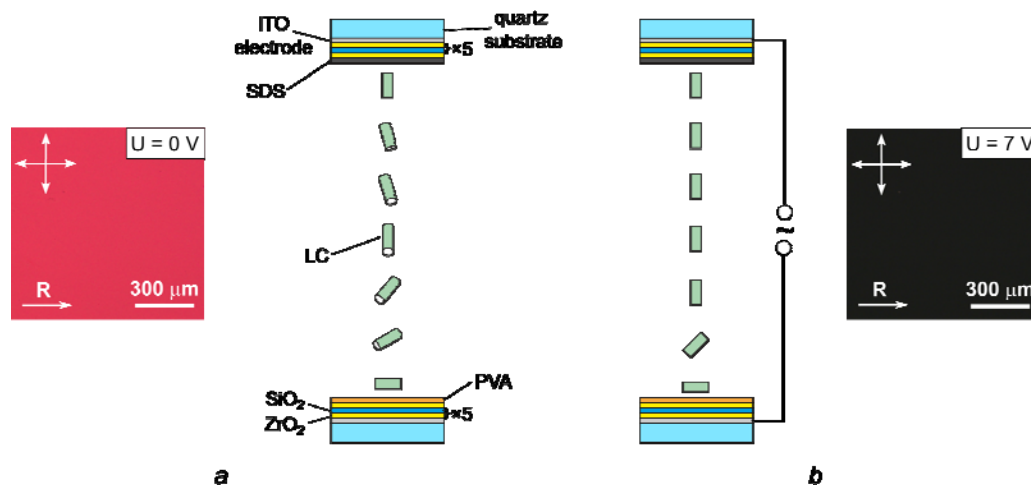


Рис. 1. Конфигурации директора холестерической смеси $n(r)$ и соответствующие оптические текстуры исследуемой ФС в скрещенных поляризаторах: a – гибридно-упорядоченный холестерик ($U = 0$ В); b – индуцированная полем квазигомеотропная конфигурация ($U = 7$ В). На микрофотографиях двойными стрелками обозначены направления поляризатора и анализатора, стрелка R указывает направление натирания слоя PVA на входном зеркале резонатора, задающее ось легкого ориентирования, вдоль которой направлен поверхностный директор n_s

Fig. 1. Director configurations of the cholesteric mixture $n(r)$ and corresponding optical textures of the investigated photonic structure in the crossed polarizers: a – hybrid-aligned cholesteric ($U = 0$ V); b – electrically induced quasi-homeotropic configuration ($U = 7$ V). On the microphotographs the directions of polarizer and analyzer are marked by double arrows; the arrow R indicates the rubbing direction of PVA layer on the cavity input mirror specifying the easy axis orientation along which the surface director n_s is aligned

В свою очередь, при напряжении 7 В наблюдается полное погасание сигнала, как это представлено на фотографии текстуры (рис. 1, b). Это означает, что возмущение хиральной структуры холестерика электрическим полем приводит к потере закручивающей способности. Поляризованные спектры пропускания ФС измерялись для случая, когда электрический вектор E падающей волны направлен ортогонально поверхностному директору n_s . Тогда в исходном состоянии в резонаторе возбуждается T_0 -компонента (спектр дефектных o -мод), имеющая сложный вид. В частности, в коротковолновой области наблюдается поляризационное смешивание мод, при котором на пики пропускания, отвечающие обыкновенным волнам (o -модам), накладываются пики-спутники меньшей интенсивности, отвечающие необыкновенным волнам (e -модам). Наличие спутников в спектре характерно для хиральных резонаторов и свидетельствует об эллиптической поляризации мод

внутри таких структур. При этом поляризация мод на зеркалах остается строго линейной, но обязательно направлена вдоль или поперек вектора n_s . Максимальное поляризационное смешивание наблюдается в окрестности спектральных точек квазипересечения o - и e -мод, обусловленного их связью. Наряду с этим в длинноволновом крыле ФЗЗ наблюдается серия одиночных пиков (рис. 2, пунктирная кривая), которым отвечает «чистая» поляризация o -мод вдоль вектора E . Тем не менее и эти моды, как показывает расчет в рамках метода 4×4 трансфер-матрицы Берремана [3], эллиптически поляризованы в объеме в результате нарушения адиабатического распространения циркулирующей в резонаторе световой волны. В силу этого в исходном состоянии ФС в спектральное положение o -мод заложен дополнительный вклад в виде их аномального смещения в синюю область спектра, обусловленного набегом неадиабатической геометрической фазы в общий фазовый набег.

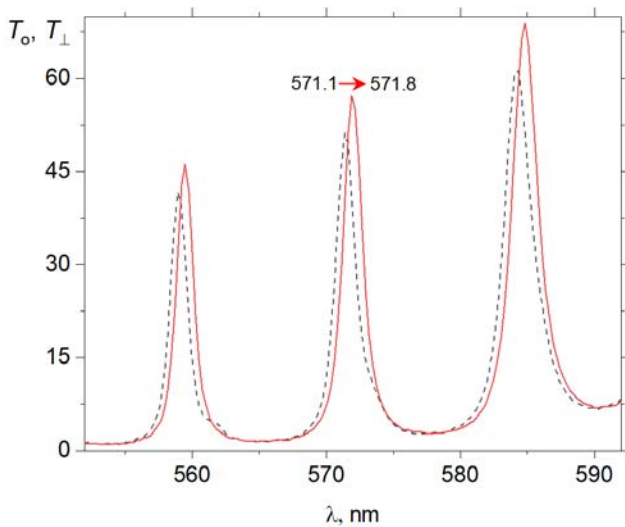


Рис. 2. Экспериментально измеренные спектры o -мод ФС с гибридно-упорядоченным холестериком в длинноволновой области ФЗЗ в исходном состоянии (пунктирная кривая – T_o -компонента) и при напряжении $U = 7$ В (сплошная кривая – T_{\perp} -компонента). Красное смещение резонансных пиков (\rightarrow) позволяет определить величину аномального сдвига o -мод $\sim 0,7$ нм, соответствующего максимально достижимому вкладу геометрической фазы в общий фазовый набег

Fig. 2. Experimentally measured spectra of o -modes of the photonic structure with a hybrid-aligned cholesteric in a long-wavelength area of the photonic band gap in the initial state (T_o -component is marked by the dashed curve) and under applied voltage $U = 7$ V (T_{\perp} -component is marked by the solid curve). The red shift of the resonance peaks (\rightarrow) makes it possible to determine the value of o -modes anomalous shift approximately equal to 0,7 nm which corresponds to the maximum obtainable contribution of the geometric phase in the total phase incursion

Этот вклад следует определить как отношение геометрической фазы, приобретаемой волной за один проход резонатора, к динамической фазе за такой же проход, пропорциональной оптической длине пути в эквивалентном незакрученном слое. Напряжение $U = 7$ В раскручивает холестерик, формируя квазигомеотропную конфигурацию. В этом случае возмущенная полем структура с малым преднаклоном директора на входе становится эквивалентна гомеотропной конфигурации, и вошедший в резонатор луч, линейно поляризо-

ванный поперек n_s , сохраняет свою линейность как в объеме, так и на зеркалах. При этом сателлиты исчезают в пределах всей ФЗЗ и спектр мод оказывается составленным из одиночных хорошо разрешенных пиков. Кроме того, пики оказываются смещенными в красную область в среднем на величину $\sim 0,7$ нм, возвращаясь в свою ординарную позицию, отвечающую T_{\perp} -компоненте поляризованного спектра (рис. 2, сплошная кривая). Это свидетельствует о полном занулении вклада ГФ. Следует отметить, что беспороговый характер структурных превращений в гибридно-упорядоченном холестерике, индуцированных электрическим полем, дает возможность плавного регулирования этого вклада.

Выводы

Проведено исследование трансформации поляризационных и спектральных свойств хиральной ФС, индуцированной электрическим полем. В качестве дефекта служил гибридно-упорядоченный холестерик, составленный из смеси нематического ЖК 4-н-пентил-4'-цианобифенил и хиральной добавки холестерилацетат. В отсутствии напряжения в исходном состоянии ориентация директора имела спиральную конфигурацию. При этом спектральное положение дефектных o -мод хиральной структуры содержало вклад в виде аномального сдвига в синюю область спектра, обусловленного набегом геометрической фазы. Обнаружено, что модификация структуры смеси полем приводила к квазигомеотропной ориентации холестерика и, соответственно, красному смещению o -мод до их ординарных позиций в спектре, свойственных незакрученным структурам. Таким образом, нами продемонстрирована возможность управления вкладом геометрической фазы от нуля до максимально достижимой величины, присущей исследуемой хиральной ФС.

Благодарность: работа выполнена в рамках научной тематики Государственного задания Федерального исследовательского центра КНЦ СО РАН.

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of scientific topics of the State assignment of the Federal Research Center KSC SB RAS.

Список источников / References

1. Ветров С. Я., Тимофеев И. В., Шабанов, В. Ф. Локализованные моды в хиральных фотонных структурах // *УФН*. 2020. Т. 190. С. 37–62. [Vetrov S.Ya., Timofeev I.V., Shabanov V.F. Localized modes in chiral photonic structures. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 2020, **63**, 33–56. DOI: 10.3367/UFNe.2018.11.038490].
2. Gunyakov V.A., Sutormin V.S., Timofeev I.V., Shabanov V.F., Zyryanov V.Ya. Anomalous spectral shift of o-modes in multilayer photonic structure induced by homeotropic–homeoplanar transition in chiral–nematic defect layer. *Photonics*, 2023, **10**, 959. DOI: 10.3390/photonics10090959.
3. Berreman D.W. Optics in stratified and anisotropic media: 4×4 -matrix formulation. *J. Opt. Soc. Am.*, 1972, **62**, 502–510. DOI: 10.1364/JOSA.62.000502.

Вклад авторов:

- ¹Гуняков В. А. – проведение исследований, написание текста статьи.
²Сутормин В. С. – проведение исследований, редактирование текста статьи.
³Зуев А. С. – проведение исследований, редактирование текста статьи.
⁴Тимофеев И.В. – концепция исследования, редактирование текста статьи.
⁵Зырянов В. Я. – научное руководство, редактирование текста статьи.

Contribution of the authors:

- ¹Gunyakov V. A. – conducting research, writing the text of the article.
²Sutormin V. S. – conducting research, editing the text of the article.
³Zuev A. S. – conducting research, editing the text of the article.
⁴Timofeev I. V. – research concept, editing the text of the article.
⁵Zyryanov V. Ya. – scientific leadership, editing the text of the article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interest.

¹<https://orcid.org/0000-0002-2222-8642>

²<https://orcid.org/0000-0003-4695-5569>

⁴<https://orcid.org/0000-0002-6558-5607>

⁵<https://orcid.org/0000-0001-7373-3342>

Поступила 23.07.2024; одобрена 20.08.2024; принята 25.08.2024
Received 23.07.2024; approved 20.08.2024; accepted 25.08.2024