

Краткие сообщения
УДК 532.783

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МУЛЬТИСЛОЙНЫХ ФОТОННЫХ СТРУКТУР С ВКЛЮЧЕНИЕМ ЗАКРУЧЕННЫХ НЕМАТИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ

В. А. Гуняков^{1*}, И. В. Тимофеев^{1,2}, В. С. Сутормин^{1,2}, М. Н. Крахалев^{1,2}, А. М. Паршин^{1,2}, В. Я. Зырянов¹

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

²*Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия*

ИНФОРМАЦИЯ

История статьи:

Поступила 29.09.2021

Одобрена 25.10.2021

Принята 29.10.2021

Ключевые слова:

жидкий кристалл,
закрученный нематик,
мультислойная фотонная
структура,
электрогидродинамическая
неустойчивость,
резонатор Фабри-Перо,
поляризованные оптические
моды,
геометрическая фаза

АННОТАЦИЯ

Представлен краткий обзор работ по изучению оптических и спектральных свойств мультислойных фотонных структур с включением закрученных нематических компонентов. Обсуждаются наиболее важные результаты исследований по управлению поляризованными оптическими модами в таких структурах за счет переориентации жидкокристаллического слоя.

DOI:
10.18083/LCAppl.2022.1.94

Для цитирования:

Гуняков В. А., Тимофеев И. В., Сутормин В. С., Крахалев М. Н., Паршин А. М., Зырянов В. Я. Оптические свойства мультислойных фотонных структур с включением закрученных нематических компонентов // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2022. Т. 22, № 1. С. 94–99.

*Автор для переписки: gun@iph.krasn.ru

© Гуняков В. А., Тимофеев И. В., Сутормин В. С., Крахалев М. Н., Паршин А. М., Зырянов В. Я., 2022

Brief messages

**OPTICAL PROPERTIES OF MULTILAYER PHOTON STRUCTURES
CONTAINING TWISTED NEMATIC COMPONENTS**

V. A. Gunyakov^{1*}, I. V. Timofeev^{1,2}, V. S. Sutormin^{1,2}, M. N. Krakhalev^{1,2}, A. M. Parshin^{1,2}, V. Ya. Zyryanov¹

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

²*Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia*

ARTICLE INFO:

ABSTRACT

Article history:

Received 29 September 2021

Approved 25 October 2021

Accepted 29 October 2021

A brief review of studies on the optical and spectral properties of multilayer photonic structures with the inclusion of twisted nematic components is presented. The most important research results on controlling of polarized optical modes in such structures due to the reorientation of liquid crystal layer are discussed.

Key words:

liquid crystal,
twisted nematic,
multilayer photonic structure,
electrohydrodynamic instability,
Fabry-Pérot cavity,
polarized optical modes,
geometric phase

DOI:

10.18083/LCAppl.2022.1.94

For citation:

Gunyakov V. A., Timofeev I. V., Sutormin V. S., Krakhalev M. N., Parshin A. M., Zyryanov V. Ya. Optical properties of multilayer photon structures containing twisted nematic components. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2022, **22** (1), 94–99 (in Russ.).

*Corresponding author: gun@iph.krasn.ru

© Gunyakov V. A., Timofeev I. V., Sutormin V. S., Krakhalev M. N., Parshin A. M., Zyryanov V. Ya., 2022

Введение

На сегодня накоплено достаточно много знаний о распространении оптических волн в структурно-хиральных средах – это анизотропные среды, оптическая ось которых закручивается в пространстве так, что нарушается зеркальная симметрия. Например, жидкокристаллическая (ЖК) твист-ячейка обладает хиральностью. Ряд новых явлений проявляется в случае, когда оптическая волна перестает распространяться и локализуется в такой

среде [1]. Нами была предложена и реализована общая схема локализации света в хиральной структуре для управления спектром и поляризацией излучения. Был изучен резонатор Фабри-Перо, состоящий из двух многослойных зеркал (рис. 1). Помещенный между зеркалами каламитный нематик закручивался при помощи различных ориентаций директора на границах слоя [2–7], под действием магнитного поля [8] либо вследствие электрогидроконвективных потоков [9].

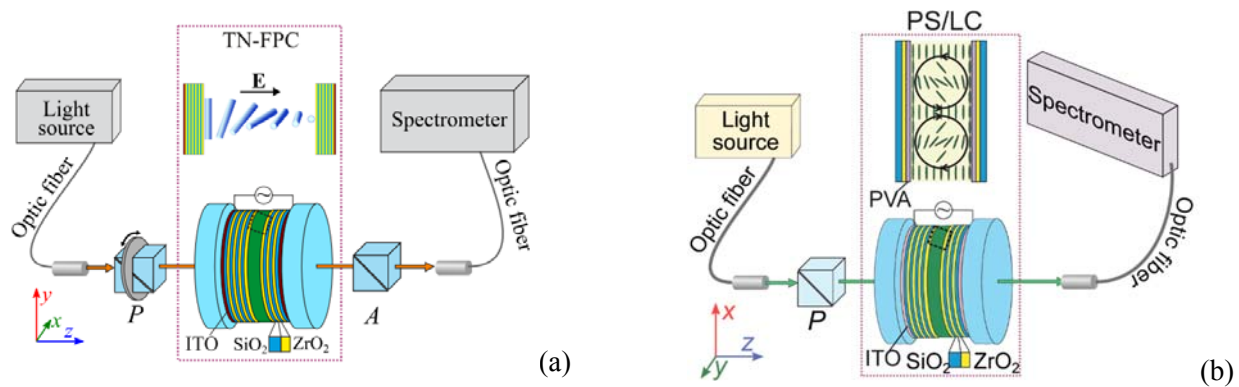


Рис. 1. Схемы экспериментальной установки. Многослойные зеркала ZrO_2/SiO_2 в твист-нематическом резонаторе Фабри-Перо (TN-FPC) сформированы на прозрачных подложках с ITO-электродами: *a* – полость заполнена закрученным нематическим ЖК 5ЦБ, возмущенным приложенным напряжением (вставка сверху). Поляризатор *P* и анализатор *A* являются призмами Глана [5], *b* – конвективные аномальные роллы в нематическом слое (вставка сверху). Вихревой поток нематика обозначен круговыми стрелками [9]. Директор в центре аномального ролла выходит из плоскости течения *xz*

Fig. 1. A schematic view of experimental setups. The ZrO_2/SiO_2 multilayer mirrors of the twist-nematic Fabry-Pérot cavity (TN-FPC) are formed on the transparent substrates with ITO-electrodes: *a* – the cavity is filled with the 5CB twisted-nematic LC disturbed by applied voltage (inset on the top). Polarizer *P* and analyzer *A* are Glan prisms [5], *b* – the convective abnormal rolls in nematic layer (inset on the top). Vortex flow of the nematic is indicated by circular arrows [9]. The director at the center of abnormal rolls is out of the *xz* flow plane

Вращение и обмен поляризаций

Локализованная в твист-резонаторе стоячая волна образуется из двух встречных бегущих волн. Ввиду закручивания директора *o*- и *e*-волны связываются между собой и образуют эллиптически поляризованные собственные твист-волны: *to*, *te*. Зеркала резонатора создают связь между *to*-, *te*-волнами через изменение знака эллиптичности при отражении. Эта связь приводит к третьему классу собственных волн – резонаторным *ro*-, *re*-волнам. Это локализованные в резонаторе стоячие волны. Они имеют переменную эллиптическую поляризацию. Пучности и узлы такой волны в центре нематика

нивелируются [2]. В частности, две встречные волны одинаковой круговой поляризации совсем не образуют узлов. Этим объясняется смена числа узлов (номера моды) при квазипересечении мод (рис. 2) [5].

На зеркалах резонатора поляризация *ro*-, *re*-мод линейна и не изменяется при отражении. В общем случае данная поляризация отклоняется от направлений вдоль и поперек оптической оси. В точке квазипересечения отклонение достигает 45 градусов и поляризации мод меняются местами, происходит переход *ro*- и *re*-мод друг в друга (рис. 2) [6, 7].

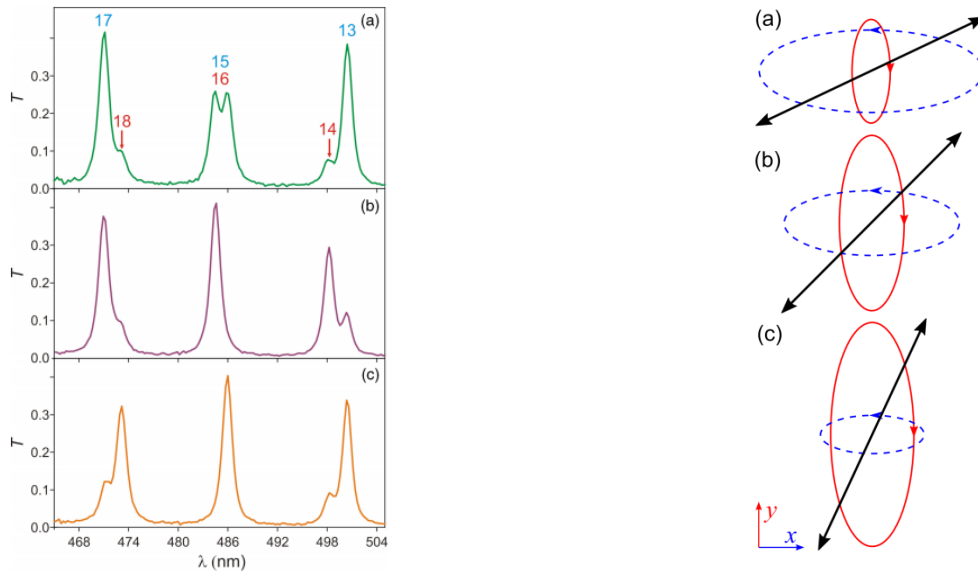


Рис. 2. Левая панель: выравнивание интенсивностей пиков пропускания с помощью напряжения, квазипересечение вблизи ro -моды (484,5 нм), индуцированное напряжением $U = 1$ В без поляризатора P , при наличии анализатора A с ориентацией (a) 0° , (b) $+45^\circ$, (c) -45° . И вертикальная, и горизонтальная оси в (a)–(c) имеют одинаковый масштаб [5]. Правая панель: преобразование связанных эллиптически поляризованных мод to (пунктирные линии) и te (сплошные линии) при полевом переходе ($a \rightarrow b \rightarrow c$) через спектральную точку максимума Гуча-Тарри. Директор нематика n на входном зеркале упорядочен параллельно оси y , свет распространяется вдоль оси z , а двойные стрелки показывают ориентацию плоскости линейной поляризации ro -моды: угол ξ относительно оси y равен (a) 65° , (b) 45° , (c) 25° [6, 7]

Fig. 2. Left panel: equalization of the transmission peak intensities by voltage, avoided crossing phenomenon in the vicinity of the ro -mode (484.5 nm) induced by a voltage of $U = 1$ V without polarizer P at the analyzer A orientations of (a) 0° , (b) $+45^\circ$, and (c) -45° . Both vertical and horizontal axes in (a)–(c) are exactly at the same scale [5]. Right panel: transformation of the coupled elliptically polarized to (dashed lines) and te (solid lines) modes at the field-effect transition ($a \rightarrow b \rightarrow c$) through the Gooch-Tarry maximum spectral point. The nematic director n on the input mirror is aligned parallel to the y -axes, light propagates along the z -axes, and reciprocal arrows show the orientation of the linear polarization plane of the ro -mode: the angle ξ relative to the y -axes is (a) 65° , (b) 45° , and (c) 25° [6, 7]

Геометрическая фаза

Закручивание нематика вызывает аномальный спектральный сдвиг поляризованных оптических мод. Для ro -мод как в теории [3], так и в эксперименте [4] наблюдается синий сдвиг. По мере закручивания слоя сдвигается фаза собственной волны, покидающей закрученный слой. Следовательно, изменяется эффективный показатель преломления, измеряемый через оптическую длину резонатора. Значит, эффективный показатель преломления твист-нематика оказывается меньше, чем обыкновенный показатель преломления незакрученного нематика. Для re -мод наблюдается красный сдвиг [8] с эффективным показателем преломления больше, чем необыкновенный показатель

преломления незакрученного нематика. Для объяснения аномалии рассматривается траектория поляризации ro -, re - волн на сфере Пуанкаре – сферическая трохоида. Она описывает траекторию точки, жестко связанной с конусом, катящимся по плоскости экватора сферы Пуанкаре. Поэтому формулу сдвига фазы можно трактовать как теорему Пифагора для сложения ортогональных компонент угловой скорости конуса. Параллельное перенесение геометрического объекта на искривленной поверхности приводит к повороту объекта вокруг собственной оси. Классическим примером служит маятник Фуко, плоскость качания которого поворачивается по мере суточного вращения Земли. Так же и параллельное перенесение состояния поляризации вдоль искривленной поверхности сферы

Пуанкаре приводит к набегу фазы состояния, который называется геометрической фазой. Причем здесь работает исключительно неадиабатическая фаза Ааронова-Анандана, соответствующая эллиптичности собственных волн. Этот малый вклад геометрической фазы следует отличать от геометрической фазы в нулевом порядке адиабатического приближения, которая дает сбой фазы на π в ячейке, закрученной на π радиан. Геометрическая фаза – это глобальная характеристика всего слоя твист-нематика целиком, а не локального тензора диэлектрической проницаемости. Поэтому аномалия объясняется ошибочностью предубеждения о том, что эффективный показатель преломления – это локальный отклик материала, равный квадрату корню из диэлектрической проницаемости. Достоверность измерений подтверждается количественно. В соответствии с теорией величина измеренного спектрального сдвига пропорциональна третьей степени длины волны.

Аномальные роллы

В работе [9] исследованы собственные моды фотонной структуры, включающей в качестве дефекта слой хирального нематического ЖК. Хиральность конфигурации поля директора индуцирована электрогидродинамической неустойчивостью в нематике, формирующей диссипативную пространственно-периодическую структуру в виде аномальных роллов (рис. 1, *b*). Нарушение адиабатического характера распространения света в закрученном нематике приводит к ряду особенностей поведения *ro*-мод фотонной структуры. В частности, факт плавного затухания этих мод с ростом управляющего напряжения объяснен наличием перекрестных по поляризациям потерь, возникающих при усиливающемся рассеянии света на дифракционной решетке, образованной системой аномальных роллов в дефектном слое. С другой стороны, хиральность ЖК проявилась также в виде монотонного смещения *ro*-мод в коротковолновую область спектра. Численное моделирование спектров пропускания фотонной структуры с учетом структурной хиральности нематического слоя показало, что причиной наблюдаемого аномального смещения мод является возникновение дополнительного вклада геометрической фазы в общий фазовый набег, приобретаемый за один проход циркулирующей в дефектном слое волны.

Заключение

В серии работ [2–9] исследован резонатор Фабри-Перо, содержащий закрученный нематик. Обнаружена линейная поляризация собственных мод резонатора и эффект обмена поляризаций при квазипересечении поляризованных мод. Показано, что этот эффект можно использовать для создания ротатора плоскости поляризации при помощи электрического напряжения или магнитного поля. Второй эффект – аномальный спектральный сдвиг мод при закручивании нематика, объяснен как проявление неадиабатической геометрической фазы. Предлагается использовать его для прецизионного измерения параметров жидкого кристалла: показателя преломления, коэффициентов упругости и вязкости.

Список источников / References

1. Ветров С. Я., Тимофеев И. В., Шабанов В. Ф. Локализованные моды в хиральных фотонных структурах // *УФН*. 2020. Т. 190, № 1. С. 37–62. [Vetrov S. Ya., Timofeev I. V., Shabanov V. F. Localized modes in chiral photonic structures. *Uspekhi Fiz. Nauk*, 2020, **63** (1), 33–56].
2. Timofeev I. V., Lin Y.-T., Gulyakov V. A., Myslivets S. A., Arkhipkin V. G., Vetrov S. Y., Lee W., Zyryanov V. Y. Voltage-induced defect mode coupling in a one-dimensional photonic crystal with a twisted-nematic defect layer. *Phys. Rev. E*. 2012, **85** (1), 011705 (1–7).
3. Тимофеев И. В., Ветров С. Я. Спектральное проявление эффективного показателя преломления в хиральной оптической среде, помещенной в резонатор Фабри-Перо с анизотропными зеркалами // *Известия РАН. Сер. физическая*. 2014. Т. 78, № 12. С. 1593–1597. [Timofeev I. V., Vetrov S. Y. Spectral manifestation of an effective refraction index in a chiral optical medium inside a Fabry-Pérot resonator with anisotropic mirrors. *Bull. Russ. Academy of Sciences. Physics*, 2014, **78** (12), 1308–1312].
4. Timofeev I. V., Gulyakov V. A., Sutormin V. S., Myslivets S. A., Arkhipkin V. G., Vetrov S. Y., Lee W., Zyryanov V. Y. Geometric phase and *o*-mode blueshift in a chiral anisotropic medium inside a Fabry-Pérot cavity. *Phys. Rev. E*, 2015, **92** (5), 052504 (1–14).
5. Gulyakov V. A., Timofeev I. V., Krakhalev M. N., Zyryanov V. Y. Polarization exchange of optical eigenmode pair in twisted-nematic Fabry-Pérot resonator. *Phys. Rev. E*, 2017, **96** (2), 022711 (1–5).
6. Gulyakov V. A., Timofeev I. V., Krakhalev M. N., Lee W., Zyryanov V. Ya. Electric field-controlled transformation of the eigenmodes in a twisted-nematic Fabry-Pérot cavity. *Sci. Rep.*, 2018, **8**, 16869 (1–9).

7. Gunyakov V.A., Timofeev I.V., Krakhalev M.N., Sutormin V., Lee W., Zyryanov V.Ya. Linear polarization rotation by a twisted-nematic Fabry-Pérot cavity. *Abstr. 27th International Liquid Crystal Conference (ILCC 2018)*, Kyoto, Japan, 22–27 July 2018. P4-C1-21.
8. Gunyakov V.A., Parshin A.M., Timofeev I.V., Zyryanov V.Ya. Eigenmodes in a photonic structure with a torsion-deformed nematic liquid crystal exposed to a magnetic field. *Phys. Rev. E*, 2020, **102** (4), 042701 (1–7).
9. Gunyakov V.A., Krakhalev M.N., Timofeev I.V., Zyryanov V.Ya., Shabanov V.F. Optical modes of multilayered photonic structure containing nematic layer with abnormal electroconvective rolls. *Opt. Mater.*, 2020, **100**, 109630 (1–6).

Вклад авторов:

¹**Гуныков В. А.** – исследование хиральных фотонных структур с включением закрученных различными способами нематических ЖК; написание исходного текста статьи.

²**Тимофеев И. В.** – расчет конфигурации поля директора и спектральных характеристик хиральных фотонных структур с включением закрученных различными способами нематических ЖК; написание исходного текста статьи.

³**Сутормин В. С.** – исследование спектрального проявления геометрической фазы в фотонной структуре при структурном превращении гибрида – твист, индуцированном электроуправляемой ионной модификацией граничных условий.

⁴**Крахалев М. Н.** – исследование электроуправляемой трансформации спектров собственных мод фотонных структур в условиях твист-эффекта и электроконвективной неустойчивости типа аномальных роллов.

⁵**Паршин А. М.** – исследование поведения собственных мод фотонной структуры с закрученным магнитным полем нематиком (магнитный T-эффект).

⁶**Зырянов В. Я.** – научное руководство; концепция исследования.

Contributions of the authors:

¹**Gunyakov V.A.** – study of chiral photonic structures with the inclusion of nematic liquid crystals twisted in various ways; writing the source text of the article.

²**Timofeev I.V.** – calculation of the director field configuration and spectral characteristics of chiral photonic structures with the inclusion of nematic liquid crystals twisted in various ways; writing the original text of the article.

³**Sutormin V.S.** – investigation of the spectral manifestation of the geometric phase in the photonic structure during the structural transformation of the hybrid - twist, induced by the electrically controlled ionic modification of the boundary conditions.

⁴**Krakhalev M.N.** – study of the electrically controlled transformation of the spectra of eigenmodes of photonic structures under the conditions of the twist effect and electroconvective instability such as abnormal rolls.

⁵**Parshin A.M.** – investigation of the behavior of eigenmodes of a photonic structure with a nematic twisted magnetic field (magnetic T-effect).

⁶**Zyryanov V.Ya.** – scientific leadership; research concept.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

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

²<https://orcid.org/0000-0002-6558-5607>

³<https://orcid.org/0000-0003-4695-5569>

⁴<https://orcid.org/0000-0003-3519-9497>

⁵<https://orcid.org/0000-0002-5731-0523>

⁶<https://orcid.org/0000-0001-7373-3342>

Поступила 29.09.2021, одобрена 25.10.2021, принята 29.10.2021
Received 29.09.2021, approved 25.10.2021, accepted 29.10.2021