

Физика

Научная статья

УДК 544.252.22:544.015.4

**ДИАГНОСТИКА ИНДУЦИРОВАННЫХ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ
ПЕРЕХОДОВ В ИЗОТРОПНУЮ ФАЗУ НЕМАТИЧЕСКОГО ЖИДКОГО
КРИСТАЛЛА С АЗОХРОМОФОРАМИ**

О. И. Соколовская^{1*}, В. Ю. Нестеров¹, Н. Д. Преснов¹, Л. А. Головань¹, О. Н. Карпов^{1,2},
Г. А. Шандрюк^{1,2}, О. А. Отмахова², А. С. Мерекалов², Р. В. Тальрозе^{1,2}

¹Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
физический факультет, Москва, Россия

²Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН, Москва, Россия

ИНФОРМАЦИЯ

История статьи:

Поступила 9.12.2024

Одобрена 14.01.2025

Принята 17.02.2025

Ключевые слова:

жидкие кристаллы,
азохромофоры,
E-Z переход,
пропускание
поляризованного
излучения

АННОТАЦИЯ

Исследованы индуцированные ультрафиолетовым излучением переходы в изотропную фазу нематического жидкого кристалла с внедренными в него молекулами азокромофоров протяженной и разветвленной структур. Время существования изотропной фазы по окончании действия ультрафиолетового излучения (УФ) определяется его экспозицией. Оно больше для жидкого кристалла с внедренным азокромофором разветвленной структуры, чем для системы с азокромофором протяженной структуры (1300 и 280 с, соответственно).

DOI:

10.18083/LCAppl.2025.1.90

EDN:

<https://elibrary.ru/dnbgd>

Для цитирования:

Соколовская О. И., Нестеров В. Ю., Преснов Н. Д., Головань Л. А., Карпов О. Н., Шандрюк Г. А., Отмахова О. А., Мерекалов А. С., Тальрозе Р. В. Диагностика индуцированных ультрафиолетовым излучением переходов в изотропную фазу нематического жидкого кристалла с азокромофорами // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2025. Т. 25, № 1. С. 90–98.

Physics

Original Article

**DIAGNOSTICS OF ULTRAVIOLET-INDUCED ISOTROPIC PHASE TRANSITIONS
IN NEMATIC LIQUID CRYSTAL WITH AZOCHROMOPHORE**

O. I. Sokolovskaya^{1*}, V. Yu. Nesterov¹, N. D. Presnov¹, L. A. Golovan¹, O. N. Karpov^{1,2},
G. A. Shandryuk^{1,2}, O. A. Otmakhova², A. C. Merekalov², R. V. Talroze^{1,2}

¹*Lomonosov Moscow State University, Department of Physics, Moscow, Russia*

²*A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis RAS, Moscow, Russia*

ARTICLE INFO:

ABSTRACT

Article history:

Received 9 December 2024

Approved 14 January 2025

Accepted 17 February 2025

The ultraviolet-induced transitions to isotropic phase in nematic liquid crystal doped with molecules of azochromophores of extended and branched structures have been studied. The lifetime of the isotropic phase is determined by the UV-radiation exposure. The lifetime is greater for the liquid crystal with azochromophore of a branched structure than for the mixture with azochromophore of an extended structure (1300 and 280 s, respectively).

Key words:

liquid crystal,
azochromophore,
E-Z transition,
polarized radiation
transmission

DOI:

10.18083/LCAppl.2025.1.90

EDN:

<https://elibrary.ru/dnbged>

For citation:

Sokolovskaya O. I., Nesterov V. Yu., Presnov N. D., Golovan L. A., Karpov O. N., Shandryuk G. A., Otmakhova O. A., Merekalov A. C., Talroze R. V. Diagnostics of ultraviolet-induced isotropic phase transitions in nematic liquid crystal with azochromophore. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2025, **25** (1), 90–98 (in Russ.).

Введение

Индукцированные ультрафиолетовым (УФ) излучением фазовые переходы «порядок–беспорядок» в жидких кристаллах (ЖК) с фотохромными добавками – хорошо известное явление, являющееся объектом немалого числа фундаментальных [1, 2] и прикладных исследований [3–5]. В качестве фотохромных добавок могут быть использованы азобензолы и их производные, которые известны своей способностью к обратимой фотоизомеризации [6, 7]. В случае ЖК с азохромоформной добавкой причиной его изотропизации является возбуждаемый УФ-излучением переход в азогруппах между Е- и Z-конфигурациями внедренных в ЖК-молекул. Протяженная Е-конфигурация способствует упорядоченному состоянию ЖК, тогда как разветвленная Z-конфигурация разрушает упорядоченность ЖК. Таким образом, существует механизм формирования пространственного перераспределения фазы жидкого кристалла посредством его ультрафиолетового облучения заданным образом.

Подобные гетерогенные среды являются перспективными в качестве перестраиваемых матриц для ансамблей квантовых точек (КТ). Известно, что при температуре выше температуры фазового перехода ЖК КТ хорошо растворяются в изотропной среде мезогенных молекул, а при температуре жидкокристаллической среды ниже температуры фазового перехода КТ становятся нерастворимыми в жидкокристаллическом веществе и стремятся к неконтролируемой агрегации [8]. Следовательно, если в ЖК-матрице, содержащей КТ, локально индуцировать фазовые переходы в изотропную фазу, то возможно ожидать контролируемой диффузии КТ из упорядоченных областей ЖК в изотропные. Таким образом, возможно создать упорядоченные массивы КТ с пространственным масштабом порядка длины видимого света [9, 10] и осуществить модуляцию фотолюминесценции УФ-излучением в ансамбле квантовых точек CdSe, диспергированных в нематическом жидком кристалле, содержащем фотохромы [11].

В связи с этим необходимо детально изучить процесс индуцированного УФ-излучением фазового перехода в жидкокристаллических средах, включая определение его временных характеристик. В недавно выполненной работе [12] были проведены измерения вариаций диэлектрической проницаемости композитных сред ЖК с азохро-

мофорами (АХ) под действием УФ-света. Однако, поскольку предполагается дальнейшее использование таких систем в качестве источников излучения, имеет смысл обеспечить контроль фазовых переходов оптическими методами. Целью настоящей статьи была демонстрация возможности такой диагностики по изменению пропускания поляризованного света.

Эксперимент

Нематическая ЖК-матрица, в соответствии с [13] представляла собой смесь, состоящую из 4'-пентил-4-цианоби-фенила (48,5 мас. %), 4'-пропокси-4-циано-бифенила (18,2 мас. %), 4'-амилокси-4-цианоби-фенила (17 мас. %), 4-этоксифенилового эфира транс-4-бутилциклогексанкарбоновой кислоты (10 мас. %) и 4-циано-4'-дифенилового эфира 4-транс-бутилциклогексанкарбоновой кислоты (6,3 мас. %). Температура просветления нематической фазы равна 64 °С [13]. В качестве добавок были использованы азобензолсодержащие молекулы АХ7 и АХ8, имеющие протяженную и разветвленную структуру [14], (см. врезку к рис. 1), с температурами плавления 131 и 64 °С соответственно, предоставленные для нашей работы Егоровым Ю.А. Массовая доля указанных молекул в базовой многокомпонентной системе цианобифенилов составляла 10 %. Данными системами были заполнены стеклянные оптические ячейки толщиной 5 мкм. Ячейки крепились на медной подложке, позволявшей осуществлять нагрев образцов в диапазоне от 20 до 90 °С, температура поддерживалась с точностью до 0,1 °С.

Для регистрации пропускания света через исследуемые образцы было использовано зондирующее поляризованное излучение He-Ne лазера с длиной волны 633 нм. Излучение, прошедшее через образец смеси ЖК с азохромоформом, отверстие в подложке и поляризатор, направление пропускания которого было перпендикулярно поляризации лазерного излучения, детектировалось фотодиодом ФД-7К. Благодаря сильной оптической анизотропии жидкокристаллической среды излучение проходит через поляризатор, однако переход исследуемых объектов в изотропную фазу приводит к практически полному падению пропускания. Ввиду гомеотропной ориентации молекул падение зондирующего излучения на ячейки осуществлялось под углом 45°.

При переходе образцов под действием температуры или освещения ультрафиолетовым излучением в изотропное состояние пропускание зондирующего излучения через систему значительно падает. Излучение He-Ne лазера механически прерывалось с частотой 2,8 кГц, сигнал фотодиода регистрировался фазочувствительным вольтметром SR 830. Автоматизация экспериментов была выполнена с использованием одноплатного компьютера. Для освещения исследуемых образцов был использован УФ диод с длиной волны 365 нм, излучение которого, проходя через фильтр УФС-3, фокусировалось с помощью коллиматора на исследуемом образце; световые пучки УФ-излучения и излучения He-Ne лазера полностью перекрывались в образце. УФ-излучение проходило через механический центральный затвор, открытие и закрытие которого позволяло менять время освещения исследуемых образцов. Интенсивность УФ-излучения на образце варьировалась от 0,1 до 0,4 Вт/см².

Для каждой смеси ЖК-АХ были измерены температуры перехода в изотропное состояние в отсутствие УФ-освещения, составляющие 83 и

58 °С соответственно. При освещении наблюдение фазовых переходов в смесях ЖК-АХ при их УФ-освещении наблюдалось при температурах на 5 и 10 °С ниже температуры просветления смесей.

Результаты и их обсуждение

Зависимости интенсивности излучения, прошедшего через образцы азохромофорсодержащего ЖК и поляризатор, от температуры приведены на рис. 1. При проведении измерений в условиях освещения УФ-облучение было непрерывным, при этом получаемый результат не зависел от мощности УФ-излучения в исследуемом диапазоне. Внедрение азохромофоров в ЖК существенно изменило температуры фазовых переходов. В случае АХ7 температура перехода мезофаза – изотропная фаза увеличилась на 19 °С, а при введении АХ8 – уменьшилась на 6 °С. Данные результаты согласуются с результатами работы [12].

Как видно из рис. 1, УФ-облучение значительно понижает температуру фазового перехода смеси.

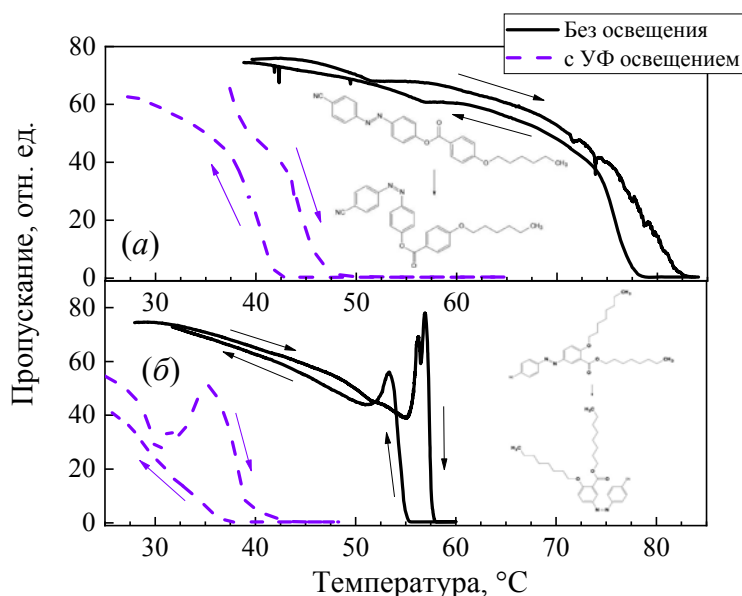


Рис. 1. Зависимость пропускания поляризованного зондирующего излучения от температуры для образцов ЖК с АХ: АХ7 (а); АХ8 (б) в отсутствие УФ-освещения (сплошная кривая) и при УФ-освещении (штриховая кривая).

На врезках представлена структура молекул АХ7 и АХ8 в Е- и Z-конфигурациях

Fig. 1. Temperature dependences of polarized probing radiation transmission for the liquid crystal mixtures with azochromophores: AX7 (a); AX8 (b) in the absence of UV illumination (solid curve) and under UV illumination (dashed curve). The insets show the structure of AX7 and AX8 molecules in E- and Z-configurations

Так, для ЖК с AX7 (рис. 1, а) при УФ-освещении в темноте переключение происходит при температуре 49,5 °С, в то время как для ЖК с AX8 (рис. 1, б) температура перехода в изотропную фазу при УФ-освещении понизилась до 44,5 °С. Для последней системы наблюдается немонотонное изменение прошедшего сигнала с ростом температуры, которое, возможно, связано с фазовым переходом смектик–нематик, происходящем в этом температурном диапазоне. Различие полученных зависимостей при нагреве и охлаждении связано, по-видимому, с тем, что восстановление пропускания занимает достаточно большой интервал времени.

Типичные временные зависимости пропускания для образца с AX8 приведены на рис. 2. Как можно видеть, УФ-освещение в течение недостаточного времени приводит к падению пропускания, при котором, однако, не достигается его минимальное значение, что не позволяет считать за-

вершенным процесс изотропизации ЖК. Для обеих исследованных ЖК-АХ смесей время существования изотропной фазы, которой соответствуют минимальные значения пропускания, возрастает с ростом продолжительности УФ-освещения пока не достигнет некоторого предельного значения, заметно различающегося для смесей с молекулами AX7 и AX8.

Различие спадов сигналов пропускания для различных интенсивностей демонстрирует существенную зависимость длительности процесса изотропизации от интенсивности УФ-освещения (рис. 2) и в наших условиях составляет около 40 с для ЖК-АХ7 и варьируется от 3,5 до 20 с для ЖК-АХ8. Отметим, что в выполненных в работе [12] измерениях, проведенных путем регистрации изменений диэлектрической проницаемости, наблюдается заметно меньшее время фазового перехода к изотропной среде.

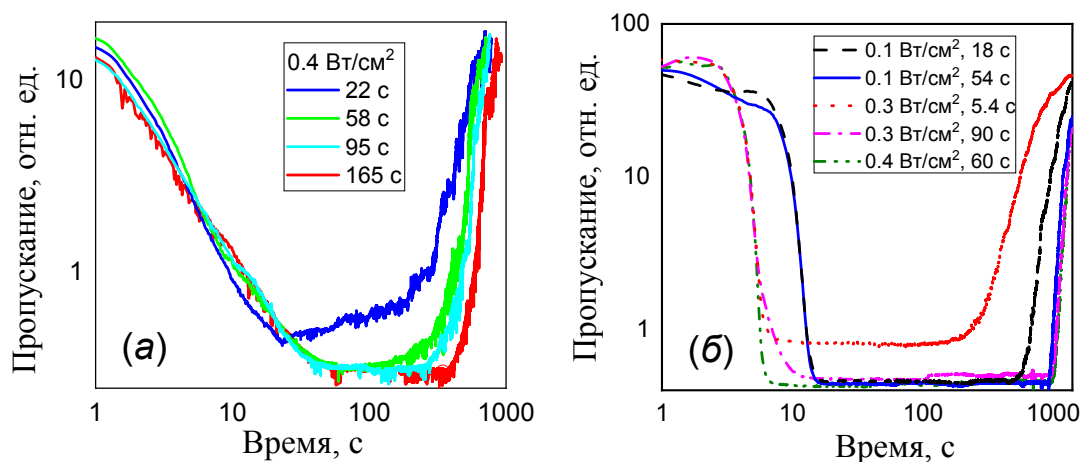


Рис. 2. Зависимости сигнала пропускания смеси ЖК с азохромофором AX7 при температуре 78 °С (а) и AX8 (б) от времени при температуре 48 °С при различных мощностях и временах засветки УФ-излучением. Началу освещения смеси ЖК с азохромофором УФ-излучением соответствует момент времени 1 с

Fig. 2. Time dependences of the transmission signal of the liquid crystal mixtures with azochromophores: AX7 at a temperature of 78 °С (а) and AX8 on time at a temperature of 48 °С (b) under UV irradiation of different power and duration. The beginning of UV illumination of liquid crystal mixture with azochromophore corresponds to a time of 1 s

На рисунке 3 представлены зависимости времени жизни изотропной фазы после окончания УФ-освещения для системы ЖК-АХ7 при температурах 73 и 78 °С. Принципиальное значение для осуществления фазовых переходов в ЖК-АХ может играть экспозиция, т.е. произведение интенсивности на время облучения. Полученные зависимости демонстрируют сначала рост времени

жизни изотропной фазы с ростом экспозиции, а затем, если экспозиция превышает определенную величину (около 5 Дж/см² для смеси ЖК-АХ7 при температуре 73 °С и интенсивности УФ-излучения 0,4 Вт/см²), время жизни изотропной фазы выходит на постоянное значение, не меняясь с увеличением экспозиции.

Максимально достижимое время жизни изотропной фазы после окончания УФ-освещения при температуре 73 °С составляет 290 ± 30 с (рис. 3, а), а для температуры ЖК 78 °С – 260 ± 30 с (рис. 3, б). Таким образом, максимальное время жизни изотропной фазы практически не зависит от температуры. Данный результат хорошо согласуется со временем жизни изотропной фазы после оконча-

ния УФ-освещения, полученным в работе [12] для аналогичных образцов, той же температуры и интенсивности УФ-облучения $0,3 \text{ мВт/см}^2$, которое составило 220 ± 30 с. Для температуры 73 °С величина экспозиции, при которой достигается изотропная фаза, зависит от интенсивности УФ-излучения, тогда как для температуры 78 °С зависимость от интенсивности слабая.

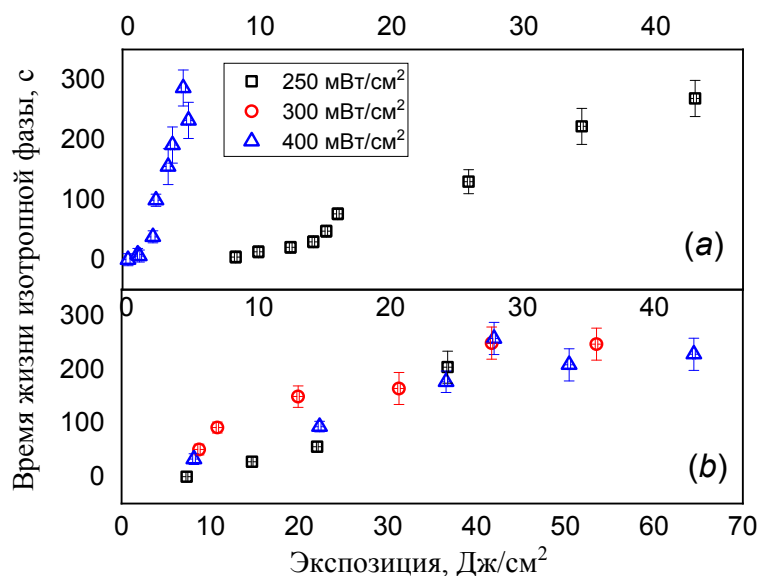


Рис. 3. Зависимость времени жизни изотропной фазы смеси ЖК с AX7 при температурах 73 °С (а) и 78 °С (б) от экспозиции УФ-излучения при разной интенсивности облучения

Fig. 3. The dependence of the isotropic phase lifetime of the liquid crystal mixture with AX7 at temperatures of 73 °C (a) and 78 °C (b) on UV radiation exposure at different irradiation intensities

Системы ЖК с внедренными молекулами AX8 отличаются заметно большим временем существования изотропной фазы после окончания УФ-облучения (рис. 4), чем в случае ЖК-AX7. Эта величина определяется экспозицией и не зависит от интенсивности УФ-излучения.

Выход зависимости времени жизни изотропной фазы от экспозиции на постоянное максимальное значение происходит при меньшей экспозиции, чем в случае ЖК-AX7: 5 Дж/см² при температуре 48 °С и 3 Дж/см² при температуре 53 °С, соответственно. Максимальные значения времени жизни изотропной фазы составляют 900 ± 50 и 1300 ± 50 с при температурах 48 и 53 °С, соответственно. Этот результат находится в качественном согласии с результатами работы [12], хотя и несколько превышает приведенные в ней при тех же условиях значения времени жизни изотропной фа-

зы, полученные в процессе изменения диэлектрической проницаемости среды.

Выявленные количественные различия в температурах фазового перехода и временах жизни изотропной фазы систем ЖК-AX7 и ЖК-AX8 возможно обосновать различием в характере взаимодействия молекул жидкого кристалла с молекулами азохромофоров, обладающими различными пространственными конфигурациями. Е-конфигурация AX7 имеет протяженный характер, а Е-конфигурация AX8 – разветвленная (врезки к рис. 1). Следовательно, добавление AX7, обладающего Е-конфигурацией, приводит к увеличению стабильности ЖК-фазы матрицы, что, по-видимому, связано с сильным межмолекулярным взаимодействием между ядрами молекул хромофора и структурно подобными ему молекулы ЖК-матрицы.

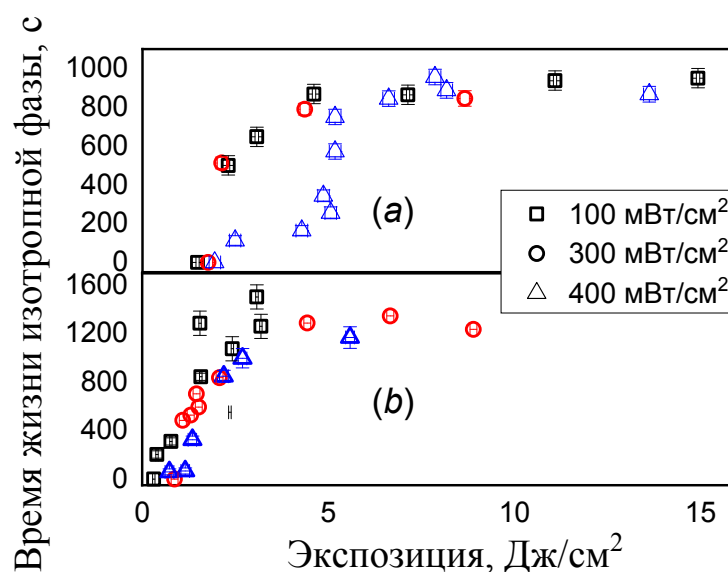


Рис. 4. Зависимость времени жизни изотропной фазы смеси ЖК с AX8 при температурах 48 °C (a) и 53 °C (b) от экспозиции УФ излучения при разной интенсивности облучения

Fig. 4. The dependence of the isotropic phase lifetime of liquid crystal mixture with AX8 at a temperature of 48 °C (a) and 53 °C (b) on UV radiation exposure at different irradiation intensities

Данный факт объясняет рост термостабильности ЖК при добавлении в него AX7 (рис. 2). AX7 в Z-конфигурации в разупорядоченной ЖК-матрице является нестабильной системой по сравнению с упорядоченной ЖК-матрицей с AX7 в E-конфигурации, и обратный Z-E переход молекул азохромофора является более вероятным, чем прямой E-Z переход. Как показано в [15], увеличение параметра порядка ЖК-системы приводит к уменьшению времени ее изотермической релаксации после фотоиндуцированного фазового перехода.

Что касается AX8, то его разветвленная E-конфигурация имеет более слабую связь с молекулами ЖК и ее добавление незначительно влияет на термические характеристики смеси. Данное свойство азохромофора также проявляется в том, что экспозиции УФ-излучением, необходимые для изотропизации системы ЖК-AX8 почти на порядок ниже, чем необходимые для изотропизации системы ЖК-AX7 (см. рис. 3 и 4). Таким образом, время жизни изотропной фазы в системе ЖК-AX7 значительно ниже, чем ЖК-AX8, и азохромофоры с разветвленной пространственной структурой являются более перспективными в качестве агентов локальной изотропизации ЖК.

Выводы

Таким образом, исследование индуцированных ультрафиолетовым освещением фазовых переходов нематического жидкого кристалла с внедренными азохромоформными молекулами различной структуры методом пропускания поляризованного света свидетельствует о возможности осуществить контролируемый переход в изотропную фазу в результате освещения ультрафиолетом.

Время существования изотропной фазы по окончании действия ультрафиолетовой засветки определяется экспозицией и может достичь предельных значений 290 с для ЖК-матрицы с азохромофором AX7 (с протяженной структурой молекулы) и 1300 с для композиции с азохромофором AX8 (с разветвленной структурой молекулы). Это открывает возможность создать двумерные структуры, состоящие из жидкокристаллических и изотропных областей, с помощью периодического ультрафиолетового освещения композиций ЖК с азохромофором разветвленной конфигурации с экспозицией 3 Дж/см² и с периодом около 20 мин. Можно полагать, что в случае внедрения в указанную ЖК-матрицу квантовых точек это позволит привести к их пространственному перераспределению, формируя источники лазерного излучения.

Благодарность: работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-19-00246). Авторы выражают благодарность проф. Безбородову В.С. (БГТУ Беларусь) и к.х.н. Егорову Ю.А. за предоставленные образцы жидкого кристалла и азохромофоров.

Acknowledgments: the work was carried out with financial support from the Russian Science Foundation (project No. 23-19-00246). The authors express their gratitude to Prof. V.S. Bezborodov (BSTU Belarus) and Ph.D. in Chemistry Yu.A. Egorov for providing samples of liquid crystal and azochromophores.

Список источников / References

1. Krishna Prasad S., Nair G.G., Hegde G., Sandhya K.L., Shankar Rao D.S., Lobo C.V., Yelamaggad C.V. Photoinduced effects in nematic liquid crystals. *Phase Transitions*, 2005, **78** (6), 443–455. DOI: 10.1080/01411590500185690.
2. Kosa T., Sukhomlinova L., Su L., Taheri B., White T.J., Bunning T.J. Light-induced liquid crystallinity. *Nature*, 2012, **485** (7398), 347–349. DOI: 10.1038/nature11122.
3. Bisoyi H.K., Li Q. Light-driven liquid crystalline materials: from photo-induced phase transitions and property modulations to applications. *Chem. Rev.*, 2016, **116** (240), 15089–15166. DOI: 10.1021/acs.chemrev.6b00415.
4. Zep A., Wojcik M.M., Lewandowski W., Sitkowska K., Prominski A., Mieczkowski J., Pocięcha D., Gorecka E. Phototunable liquid-crystalline phases made of nanoparticles. *Angew. Chemie Int. Ed.*, 2014, **53** (50), 13725–13728. DOI: 10.1002/anie.201407497.
5. Yuan K., Li F., Chen L., Li Y., Chen Y. Liquid crystal helps ZnO nanoparticles self-assemble for performance improvement of hybrid solar cells. *J. Phys. Chem. C*, 2012, **116** (10), 6332–6339. DOI: 10.1021/jp3004079.
6. Aronzon D., Levy E.P., Collings P.J., Chanishvili A., Chilaya G., Petriashvili G. Trans–cis isomerization of an azoxybenzene liquid crystal. *Liq. Cryst.*, 2007, **34** (6), 707–718. DOI: 10.1080/02678290701267480.
7. Jirón V., Wang H., Lavrentovich O.D. Photoisomerization dynamics of a light-sensitive chiral dopant in a nematic medium. *Liq. Cryst.*, 2024, **51** (6), 1064–1072. DOI: 10.1080/02678292.2023.2276842.
8. Osipov M.A., Gorkunov M.V. Nematic liquid crystals doped with nanoparticles: Phase behavior and dielectric properties. *Liquid Crystals with Nano and Microparticles*, 2017, Ch. 4, 135–175. DOI: 10.1142/9789814619264_0004.
9. Mohammadimasoudi M., Geiregat P., Van Acker F., Beeckman J., Hens Z., Aubert T., Neyts K. Quantum dot lasing from a waterproof and stretchable polymer film. *Light Sci. & Appl.*, 2022, **11**, 275. DOI: 10.1038/s41377-022-00960-z.
10. Chen L.-J., Lin J.-D., Lee C.-R. An optically stable and tunable quantum dot nanocrystal-embedded cholesteric liquid crystal composite laser. *J. Mater. Chem. C*, 2014, **2** (22), 4388–4394. DOI: 10.1039/C4TC00128A.
11. Satapathy P., Navyashree V., Santra P.K., Prasad S.K. Photoisomerization-driven photoluminescence modulation in CdSeS gradient quantum dot/liquid crystal nanocomposites. *ChemPhotoChem*, 2020, **4** (6), 413–419. DOI: 10.1002/cptc.201900293.
12. Merekalov A.S., Karpov O.N., Shandryuk G.A., Plotnikova A.S., Otmakhova O.A., Talroze R.V. The influence of the azo chromophore structure and quantum dots on the photoinduced phase transition in a nematic liquid crystal. *Liq. Cryst.*, 2024, 1–14. DOI: 10.1080/02678292.2024.2418897.
13. Карпов О. Н., Дериков Я. И., Финько А. В., Савельев А. И., Михалёнок С. Г., Кузьменок Н. М., Безбородов В. С., Тальрозе Р. В. Внедрение квантовых точек CdSe/ZnS в жидкокристаллическую матрицу // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2023. Т. 23, № 3. С. 23–35. DOI: 10.18083/LCAppl.2023.3.23. [Karpov O.N., Derikov Y.I., Finko A.V., Saveliev A.I., Mikhalyonok S.G., Kuzmenok N.M., Bezborodov V.S., Talroze R.V. Introduction of CdSe/ZnS quantum dots into a liquid-crystal matrix. *Opt. Spectrosc.*, 2023, **131**, 294–302. DOI: 10.1134/S0030400X23700042].
14. Шандрюк Г. А., Егоров Ю. А., Дериков Я. И., Безбородов В. С., Финько А. В., Головань Л. А., Тальрозе Р. В. Новые азохромофоровые добавки в смеси для управления фотоиндуцированным фазовым переходом // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2024. Т. 24, № 1. С. 5–21. [Shandryuk G.A., Egorov Yu.A., Derikov Ya.I., Bezborodov V.S., Finko A.V., Golovan L.A., Talroze R.V. New azochromophores as dopants to blend compositions for control of photoinduced phase transition. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2024, **24** (1), 5–21. (in Russ.). DOI: 10.18083/lcappl.2024.1.5].
15. Garcia-Amorós J., Finkelmann H., Velasco D. Role of the local order on the thermal cis-to-trans isomerisation kinetics of azo-dyes in nematic liquid crystals. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2011, **13** (23), 11233–11238. DOI: 10.1039/c1cp20280d.

Вклад авторов:

¹Соколовская О. И. – проведение измерений, обработка экспериментальных данных, написание текста статьи, подготовка иллюстраций.

²Нестеров В. С. – создание экспериментальной установки и проведение исследований, написание текста статьи.

³Преснов Н. Д. – автоматизация эксперимента и проведение измерений.

⁴Головань Л. А. – разработка концепции научной работы, консультация по вопросам планирования, методологии и реализации исследования, редактирование текста статьи.

⁵**Карпов О. Н.** – разработка методологии эксперимента, проектирование и сбор экспериментальной установки, обработка экспериментальных данных.

⁶**Шандрюк Г. Ф.** – разработка методологии эксперимента, редактирование текста статьи, подготовка иллюстраций.

⁷**Отмахова О. А.** – проведение исследований, подготовка иллюстраций.

⁸**Мерекалов А. С.** – разработка концепции научной работы, консультация по вопросам планирования, методологии и реализации исследования, редактирование текста статьи.

⁹**Тальрозе Р. В.** – разработка концепции научной работы, консультация по вопросам планирования, методологии и реализации исследования, редактирование текста статьи.

Contribution of the authors:

¹**Sokolovskaya O. I.** – conducting research, experimental data processing, article text writing, illustrations preparation.

²**Nesterov V. S.** – experimental setup building and conducting research, article text writing.

³**Presnov N. D.** – experiment automatization. and conducting measurements.

⁴**Golovan L. A.** – development of the concept of scientific work, consultation on planning, methodology and research implementation, editing the text of the article.

⁵**Karpov O. N.** – experimental setup design and building, experimental data processing.

⁶**Shandryuk G. F.** – development of experimental methodology, article text editing, illustrations preparation.

⁷**Otmakhova O. A.** – experimental data processing, preparing illustrations.

⁸**Merekalov A. S.** – development of the concept of scientific work, consultation on planning, methodology and research implementation, editing article text.

⁹**Talroze R. V.** – development of the concept of scientific work, consultation on planning, methodology and research implementation, editing article text.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interest

¹<https://orcid.org/0000-0001-8017-9984>

²<https://orcid.org/0009-0000-3232-7444>

³[orcid – omcymcmeyem](https://orcid.org/0000-0000-0000-0000)

⁴<https://orcid.org/0000-0002-6838-5395>

⁵<http://orcid.org/0000-0002-7314-7885>

⁶<https://orcid.org/0000-0003-4349-5296>

⁷<https://orcid.org/0009-0006-1259-8056>

⁸<https://orcid.org/0000-0002-8996-9568>

⁹<https://orcid.org/0000-0002-9151-5493>

Поступила 9.12.2024; одобрена 14.01.2025; принята 17.02.2025

Received 9.12.2024; approved 14.01.2025; accepted 17.02.2025