Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2026. Т. 26, № 1. С. 73–82
Liquid Crystals and their Application. 2026. Vol. 26, № 1. P. 73–82
ISSN 1991–3966 (print), 2499–9644 (online), Journal homepage: http://nano.ivanovo.ac.ru/journal/ru/

Научная статья
УДК 535.012.21

ОБРАТИМАЯ ФОТОИНДУЦИРОВАННАЯ ОПТИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ АЗОКРАСИТЕЛЕЙ В ЦВЕТНЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ СТЕКЛАХ

В. М. Козенков[1], В. В. Беляев[2,3]*, В. А. Авдеенков[3,4], И. С. Чекулаев[5], А. А. Кудрейко[6], Д. Н. Чаусов[5]

[1]*АО «НПО «КРИПТЕН», г. Дубна, Московская обл., Россия*
[2]*Государственный университет просвещения, Москва, Россия*
[3]*Российский университет дружбы народов, Москва, Россия*
[4]*Московский университет «Синергия», Москва, Россия*
[5]*Институт общей физики РАН им. А. М. Прохорова, Москва, Россия*
[6]*Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия*

И Н Ф О Р М А Ц И Я

История статьи:
Поступила 17.10.2025
Одобрена 25.12.2025
Принята 12.01.2026

Ключевые слова:
фотоиндуцированная оптическая анизотропия, двулучепреломление, азокрасители, фотоориентация жидких кристаллов, органические стекла ТОСП, толстые слои, фотохимическая стабильность, фотохромизм, поляризационная оптика

А Н Н О Т А Ц И Я

Исследовано явление обратимой фотоиндуцированной оптической анизотропии в цветных органических стеклах марки ТОСП (техническое органическое стекло пластифицированное) толщиной 5 мм, изготовленных на основе пластифицированного дибутилфталатом полиметилметакрилата с включением азокрасителей – материалов, используемых для фотоориентации жидких кристаллов. Целью данной работы является выявление возможности формирования фотоиндуцированной оптической анизотропии в средах с толщиной, значительно превышающей длину волны видимого излучения. Эксперимент выполнен методом измерения кинетики двулучепреломления при облучении образцов поляризованным излучением ртутной лампы сверхвысокого давления ДРШ-250 и азотного лазера ЛГИ-21. Установлено, что в исследованных толстых слоях проявляется эффект фотоиндуцированной анизотропии, который характеризуется циклическим наведением и стиранием двулучепреломления при периодическом изменении ориентации плоскости поляризации света накачки. Показано, что кинетика фотоиндуцированного двулучепреломления различается для образцов с разными азокрасителями, что связано с особенностями их фотохимической стабильности и фотохромных свойств. Для стекол на основе фотохимически стабильных азокрасителей обнаружена возможность накопления оптической анизотропии с циклами облучения, что открывает перспективы создания объемных оптических элементов с трехмерным распределением поляризационных свойств. Результаты исследования имеют важное значение для разработки новых оптических и оптоэлектронных устройств, включая элементы поляризационной оптики, системы отображения информации и оптической защиты информации.

DOI:
10.18083/LCAppl.2026.1.73

EDN:
https://elibrary.ru/vbckba

Для цитирования:
Козенков В. М., Беляев В. В., Авдеенков В. А., Чекулаев И. С., Кудрейко А. А., Чаусов Д. Н. Обратимая фотоиндуцированная оптическая анизотропия азокрасителей в цветных органических стеклах // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2026. Т. 26, № 1. С. 73–82.

© Козенков В. М., Беляев В. В., Авдеенков В. А., Чекулаев И. С., Кудрейко А. А., Чаусов Д. Н., 2026
*Адрес для переписки: vv.belyaev@guppros.ru

Research Article

REVERSIBLE PHOTOINDUCED OPTICAL ANISOTROPY OF AZO DYES IN COLOURED ORGANIC GLASSES

V. M. Kozenkov[1], V. V. Belyaev[2,3]*, V. A. Avdeenkov[3,4],
I. S. Chekulaev[5], A. A. Kudreyko[6], D. N. Chausov[5]

[1]*JSC RPC KRYPTEN, Dubna, Moscow Region, Russia*
[2]*State University of Education, Moscow, Russia*
[3]*Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia*
[4]*Moscow University «Synergy», Moscow, Russia*
[5]*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*
[6]*Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia*

ARTICLE INFO:

Article history:
Received 17 October 2025
Approved 25 December 2025
Accepted 12 January 2026

Key words:
photoinduced optical anisotropy,
birefringence,
photoalignment of liquid crystals,
azo dyes,
organic glasses TOSP,
thick layers,
photochemical stability,
photochromism,
polarized optics

ABSTRACT

The phenomenon of reversible photoinduced optical anisotropy in colored organic glasses (TOSP brand mark) has been investigated. The glasses were manufactured on the basis of polymethylmethacrylate with azo dyes plasticized by dibutyl phthalate, their thickness was 5+ mm. Such materials are used for liquid crystal photoalignment. The objective of the investigation was to identify the possibility of forming photoinduced optical anisotropy in media, which thickness significantly exceeds the wavelength of visible radiation. Experimental studies were conducted by measuring the kinetics of birefringence under exposure to polarized radiation generated by a high-pressure mercury lamp and nitrogen laser LGI-21. It was found that the thick layers studied exhibit the effect of photoinduced anisotropy that is characterized by cyclic induction and erasure of birefringence when the polarization plane orientation of the activating radiation is periodically changed. The kinetics of photoinduced birefringence varies for samples with different azo dyes, which is related to the specific features of their photochemical stability and photochromic properties. For glasses based on photochemically stable azo dyes, the possibility of accumulating optical anisotropy with irradiation cycles was discovered, opening prospects for the development of bulk optical elements with three-dimensional distribution of polarization properties. The results obtained are of significant importance for the development of new optical and optoelectronic devices, including polarized optical elements, information display systems, and optical anti-counterfeiting protection.

DOI:
10.18083/LCAppl.2026.1.73

EDN:
https://elibrary.ru/vbckba

For citation:
Kozenkov V. M., Belyaev V. V., Avdeenkov V. A., Chekulaev I. S., Kudreyko A. A., Chausov D. N. Reversible photoinduced optical anisotropy of azo dyes in coloured organic glasses. *Liq. Cryst. and their Appl*., 2026, **26** (1), 73–82 (in Russ.).

© Kozenkov V. M., Belyaev V. V., Avdeenkov V. A., Chekulaev I. S., Kudreyko A. A., Chausov D. N., 2026
*Corresponding author: vv.belyaev@guppros.ru

Введение

Эффект объемной фотоориентации слоев жидких кристаллов (ЖК) впервые обнаружен в [1] и описан в [2]. Он основан на перестройке ориентационного упорядочения органических молекул при нанесении ориентанта на подложку для создания специальных анизотропных свойств на поверхности. Эти свойства подложки заключаются в формировании в ней искусственно фотоиндуцированной ориентационной молекулярной упорядоченности анизотропных органических веществ под действием поляризованного или не поляризованного, но направленного потока активирующего излучения, поглощаемого ими.

Наличие дипольного момента у молекул фотоориентанта позволяет бесконтактно формировать макроскопические пространственно-картинные ориентационные структуры молекул ЖК и их дальнего порядка (директора) в объеме ЖК вблизи границы раздела фаз [1, 2].

Такими анизотропными молекулами слоя фотоориентанта могут являться фотохимически стабильные и/или фотохромные азокрасители с двойной связью между атомами азота, испытывающей *цис-транс* переход под действием света.

Эффект фотоориентации ЖК является более широким вариантом открытого более 100 лет назад (1919 год) эффекта фотоиндуцированной оптической анизотропии (ФИА) в слоях с фоточувствительными анизотропными молекулами, претерпевающими мономолекулярные необратимые или обратимые (фотохромные) фотохимические реакции [3, 4]. Дальнейшего изучения требуют особенности этого эффекта, которые связаны с кинетикой изменения оптических свойств материала и его структуры. Это важно для понимания механизма фотоориентации ЖК и повышения характеристик ЖК-устройств отображения информации.

Эффект Вейгерта органических молекул с необратимыми фоточувствительными или фотохромными, например азопроизводными веществами, также известный как метод пассивной фотоселекции, описан в [4–8].

Сущность метода, являющегося следствием угловой селективности (*angular hole burning,* AHB), заключается в том, что резонансное поглощение оптического излучения фотохимически активной (чувствительной) анизотропной молекулой происходит с максимальной вероятностью **ε**, если направление длинной оси ее дипольного момента перехода $\boldsymbol{\mu}_{ge}$ на длине волны активирующего излучения совпадает с направлением электрического вектора световой волны **E**hν в соответствии с условием $\varepsilon \sim \mathrm{Cos}^2\theta$, где θ – угол между векторами **E**hν и $\boldsymbol{\mu}_{ge}$. При перпендикулярном взаимном направлении этих векторов вероятность поглощения света близка к нулю.

В связи с этим в отсутствие или при замедленном броуновском тепловом вращении в твердотельных неупорядоченных системах (при исходной беспорядочной ориентации анизотропных молекул в твердотельном состоянии) в слое молекул, однократно или многократно поглощающих кванты поляризованного оптического излучения с различной вероятностью, происходит долгоживущий во времени и пространстве отбор молекул по их пассивной ориентации – фотоселекции исходного вещества и продукта их фотохимических реакций.

При освещении поляризованным светом молекулы, например азокрасителей, с осью диполя, параллельной или имеющей проекцию, параллельную направлению поляризации света, склонны к изомеризации. В ходе многократных циклов изомеризации и релаксации молекулы ориентационно фотоселектируются [6] или даже фотохромно «переориентируются» [7].

При этом дихроизм и двойное лучепреломление в пленке могут наблюдаться при выстраивании группы молекул азопроизводных с N=N-связью. Она подвергается *цис-транс* переходу под воздействием света [7]. Со времени обнаружения оптической анизотропии она является широко распространенным физическим явлением [8]. Фотоиндуцированный дихроичный эффект обнаружен в более чем 450 из 1700 различных обследованных органических соединений (в основном азокрасителях, введенных в коллодий и желатин) [5]. Получаемое пространственно-картинное молекулярное ориентационное упорядочение в объеме среды зависит от энергии поглощенного излучения. Направление молекулярной ориентации определяется пространственно-картинным состоянием вектора поляризации и/или направлением распространения излучения в данной области [9].

При этом роль матрицы (наноокружения), прозрачной в спектральной области длин волн активации считалась до некоторой степени второстепенной. Последняя рассматривалась как сплошная среда с макроскопической вязкостью. Она учитывалась только в скорости протекания мономолекулярных фотохимических реакций и макроскопически

наблюдаемой величине, наведенной оптической анизотропии, а также в ее темновой (вращательной) релаксации. Такая фотохимическая трактовка механизма фотоиндуцированной (ФИА) в твердом теле являлась упрощенной.

В работах [10–13] предложен более широкий механизм явления Вейгерта в поглощающих конденсированных средах с учетом роли наноокружения.

Первоначально изотропные по своим макроскопически оптическим свойствам аморфные слои представляют собой неупорядоченную структуру, включающую систему случайно ориентированных элементарных ячеек (ЭЯ). В такой ЭЯ поглощающий хромофор и окружающие его молекулы растворителя, сегменты и боковые группы макромолекул и т.д. создают неоднородное (анизотропное) локальное электрическое поле, вызывающее их частичную взаимную ориентацию постоянных диполей и поляризацию. Следовательно, каждая ЭЯ характеризуется вектором напряженности локального электрического поля и дипольного момента. При этом имеется ряд энергетически выгодных положений (ориентаций) элементов элементарной ячейки (рис. 1) [11] с конфигурационными координатами θ_i и энергиями E_{ig}, причем для перехода из одного в другое состояние необходимо преодолеть потенциальный барьер U_i.

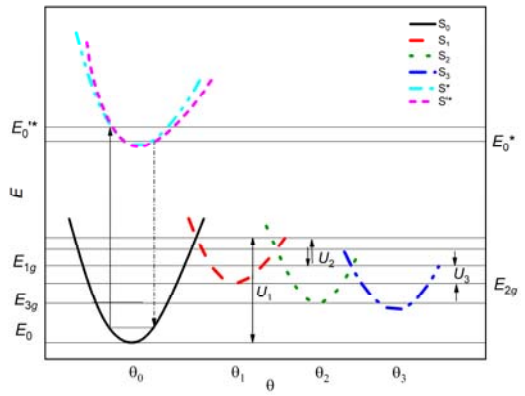


Рис. 1. Конфигурационная диаграмма исходного и метастабильных основных и возбужденных состояний ЭЯ в процессе многократного поглощения квантов поляризованного излучения. S_0 – основное и S_1, S_2, S_3, S^*, S'^* – возбужденные состояния молекул

Fig. 1. Configurational diagram of the initial, and metastable ground and excited states of the elementary cell during the process of multiple polarized photon absorption. S_0 represents the ground state and S_1, S_2, S_3, S*, S'* are excited states of the molecules

Слабые силы Ван-дер-Ваальса делают структуру ЭЯ твердого слоя подвижной и достаточно легко перестраивающейся при безызлучательной релаксации энергии поглощенных квантов излучения в нанообласть ЭЯ и в то же время остающейся в метастабильном состоянии при комнатной температуре при $kT<U_i$.

В [11] экспериментально обнаружен и, в отличие от метода формирования искусственных фотоанизотропных структур в слоях с фотохимически активными анизотропными веществами, предложен метод формирования таких структур в слоях фотохимически стабильных веществ. Такие ФАМ предложены на основе азокрасителей или других анизотропных веществ, фотохимически стабильных с квантовым выходом фотохимической реакции $\varphi = 0$ или «инертных» (с квантовым выходом $\varphi < 1$ или $\varphi << 1$). Этими веществами являются анизотропно поглощающие, но не люминесцирующие или слабо люминесцирующие вещества в твердотельном состоянии. Действительно, в случае низкого квантового выхода $\varphi << 1$ и малого времени облучения поляризованным излучением они могут рассматриваться как фотохимически стабильные. Многократное поглощение одной и той же молекулой фотохимически неактивных квантов происходит безызлучательная релаксация энергий этих поглощенных квантов в среду.

При этом, как следствие, за время такой релаксации энергии квантов излучения, под действием внутреннего электрического поля среды может происходить наномасштабное переориентирование и упорядочивание как самой поглотившей эти кванты молекулы, так и ее наноокружения, сохраняющееся при отключении возбуждающего излучения. В пределе это пространственно-картинное упорядочение стремится к направлению, ортогональному вектору поляризации поглощающего излучения. Качественно данные варианты эффекта Вейгерта были описаны в [11] с привлечением модифицированной четырехуровневой энергетической схемы, описывающей поведение системы «поглощающий хромофор-наноокружение» и модельной теории жидкого состояния Онзагера – Бетчера [14]. Более того, такая фотофизическая фотоиндуцированная анизотопия может быть получена не только при однофотонном, но и двухквантовом поглощении активирующего излучения.

Обнаружение ФИА в средах микронной толщины при двухфотонном поглощении [15] стимулировало вопрос о получении нового поколения искусственных анизотропных оптических элементов с компьютерно-заданным трехмерным пространственно-картинным распределением ориентаций оптических осей [7]. Анализ литературы показал, что работы по исследованию фоточувствительных материалов с эффектом ФИА в средах до миллиметровой толщины практически отсутствуют. На данном этапе развития техники разработка подобных анизотропно-объемных, например оптоволоконных и оптоэлектронных структур, может представлять практический интерес.

Следует также отметить, что первоначально эффект Вейгерта, или фотоиндуцированная оптическая анизотропия, проявлялись в средах с оптически анизотропными веществами, претерпевающими мономолекулярные фотохимические реакции деструкции или структурного преобразования при поглощении ими поляризованного излучения. Это справедливо как для каламитных ЖК, состоящих из стержнеобразных молекул, так и дискотических ЖК.

Совокупность сказанного позволяет выделить цель данной работы: поиск и исследование оптических структур, проявляющих эффект ФИА в средах с толщиной гораздо большей длин волн видимого спектра излучения.

Эксперимент

В данной работе приводятся результаты кинетических исследований фотоиндуцированного двулучепреломления (ДЛП), обнаруженного в выпускающихся отечественной промышленностью (ЗАО «Экструдер» (ООО «Дзержинское оргстекло») цветных органических стеклах марки ТОСП на основе пластифицированной дибутилфталатом полиметилметакрилатной (ПММА) матрицы с азокрасителем (ГОСТ 17622-72, ТУ 2216-271-05757591-20001).

Литые оргстекла изготавливаются методом блочной полимеризации путем заливки массы между твердотельными листами метилметакрилата с введенными в состав полимеризационной смеси анизотропными азокрасителями и пластификатором. С целью увеличения пластичности и других свойств в них могут быть введены и другие компоненты с последующей полимеризацией и отверждением. Толщина стекол составляла чуть более 5 мм. Температура размягчения составляла не менее 90 °С. Прозрачные и непрозрачные стекла широко применяются в станко-, самолето-, машино-, автомобиле- и приборостроении, а также в других отраслях оптоэлектронной промышленности.

Объекты и метод проведения экспериментов

В данной работе выполнены предварительные испытания промышленно выпускаемых отечественной промышленностью цветных пластифицированных органических стекол ТОСП миллиметровых толщин [16–19]. Двулучепреломление $\Delta n(t_{экс}) = n_o(t_{экс}) - n_e(t_{экс})$ характеризуется разностью фазовой задержки $\delta(t_{экс})$ между необыкновенным n_e и обыкновенным n_o лучами, где $t_{экс}$ – время облучения (экспозиции). Величина фазовой задержки выражается следующим образом:

$$\delta = 2\pi\Delta n\, L/\lambda, \qquad (3)$$

где L – толщина двулучепреломляющей среды и λ – длина волны измерительного света. Величина $\delta(t)$ определяется по величине светопропускания $T(t)$ образца, помещенного между скрещенными поляризаторами

$$T = sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right). \qquad (4)$$

Анализ результатов

На рисунке 2 представлены спектры поглощения трех типов образцов ТОСП: T_a, T_b и T_c на основе азокрасителей в видимой области спектра с главными максимумами поглощения при 498 нм, 510 нм и 430/690 нм, соответственно.

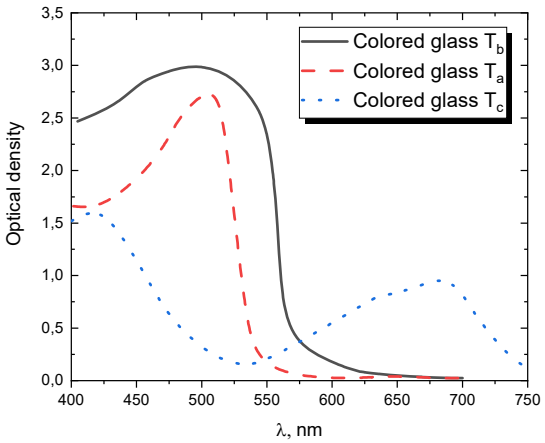


Рис. 2. Спектры поглощения образцов стекол

Fig. 2. Absorption spectra of glass samples

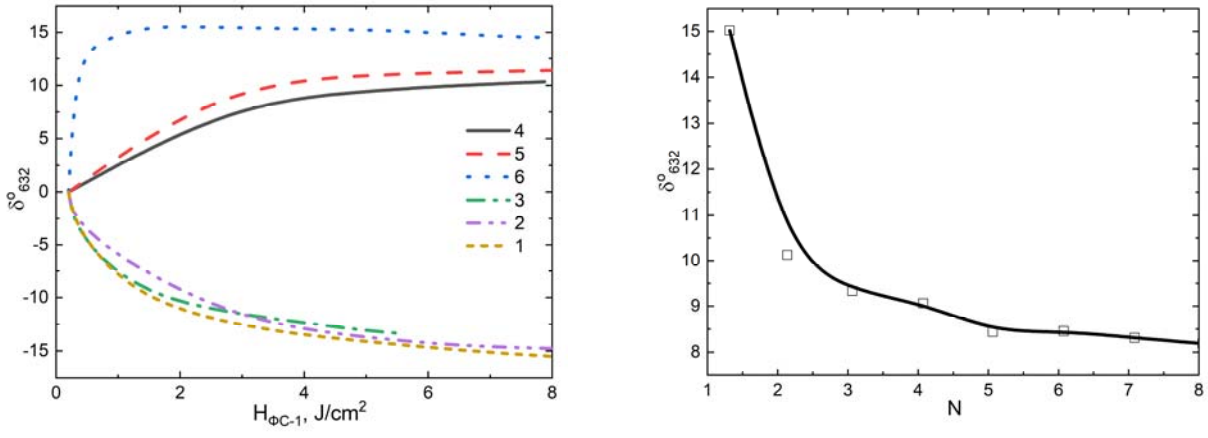
Циклические фрагменты молекул азокрасителей типичны для дискотических жидких кристаллов [20, 21]. Образец T_c имеет два максимума поглощения, поскольку в нем растворены два типа молекул N=N-связью.

Исходно изотропную прозрачную, не светорассеивающую аморфную микроструктуру полимерных пленок (в том числе стекла ТОСП) можно представить в виде исходно неупорядоченной структуры. Она представляет собой набор случайно ориентированных ЭЯ – сольватов, имеющих в своем составе полимерные молекулы и молекулы растворителя (пластификатора), сегменты и боковые группы полимерных макромолекул и т.д. Каждая из этих ячеек характеризуется определенным вектором напряженности локального электрического поля и дипольного момента $\boldsymbol{\mu}_{ge}$. В случае равномерного растворения в них в пределах 10–30 вес. % анизотропно поглощающих веществ (дихроиков) типа азокрасителей эта структура представляет собой набор случайно ориентированных элементарных ячеек двух видов:

1) не содержащих в своем составе поглощающие хромофоры, например в виде азокрасителей, и являющихся оптически пассивными для активирующего поляризованного излучения. Они не принимают участие в формировании ФИА, поскольку не поглощают это излучение;
2) содержащих в своем составе поглощающие хромофоры. Под действием пространственно неоднородного локального электрического поля **E**(x, y) происходят взаимная ориентация и упорядочение диполей наносреды и анизотропной молекулы с увеличением взаимного угла между волновым вектором световой волны и дипольным моментом красителя.

Облучение образца ТОСП формирует соответствующую структуру ФИА на поверхности и в объеме. Предварительные измерения с помощью полярископа-поляриметра ПКС-250 показали, что часть поверхности некоторых образцов находилась в оптически напряженном состоянии в объеме с небольшим пространственно-случайным распределением ДЛП. На рисунке 3 приведены результаты измерений кинетики ФИА. Исследованный образец ТОСП T_a лимонного цвета с узким спектром поглощения в видимой области спектра полностью объемно изотропен, поэтому его исходная фазовая задержка равна нулю. Облучение лампой ДРШ-250 со светофильтром ФС-1, прозрачным в области 340–460 нм и обеспечивающим пропускание спектральных линий в области 365, 405 и 436 нм, приводит к росту фазовой задержки. Плотность мощности поляризованного излучения при $\lambda = 405$ нм равна 13 мВт/см^2. Облучение производилось непрерывно в два этапа с периодическим изменением ориентации вектора поляризации **E** активирующего излучения $\alpha = +45°$ на $-45°$ с энергией экспонирования 12 Дж/см^2 на каждом из этапов.

Направление плоскости поляризации света накачки составляет 45° по отношению к направлению максимального пропускания поляризаторов. На втором этапе облучение производится излучением с углом поляризации $\alpha = -45°$.



a *b*

Рис. 3. a – Кинетические зависимости циклического фотонаведения, стирания и темновой релаксации двулучепреломления в образце ТОСП T_a; *b* – замедление фотостационарного состояния

Fig. 3. a – Kinetic dependences of cyclic photoinduced birefringence, erasure and dark relaxation of birefringence in T_a glass sample; *b* – delay of photostationary birefringent state versus the exposure cycle

Как следует из рис. 3, *а*, при первичном облучении (α = 45°) в образце наводится ДЛП, достигая максимального значения фазовой задержки $\delta = 16°$ при энергии экспозиции ~2 Дж/см^2, с последующим снижением по ходу дальнейшего облучения (кривая 6). Затем, при облучении с обратным углом поляризации при α = –45° (кривая 1) фазовая задержка падает до нуля при H ≅ 0,2 Дж/см^2 и меняет свой знак на противоположный, после чего стабилизируется на определенном уровне. При следующих циклах облучения, $N = 2,3, \ldots$ оптическая разность фаз меняет свой знак на противоположный при одной и той же энергии экспозиции, равной $H_{экс}$ ~ 0,2 Дж/см^2. Заметим, что фазовая задержка после каждого цикла достигает меньших фотостационарных значений (рис. 3, *b*). Спад фотостационарных состояний заканчивается приблизительно на восьмом цикле.

Результаты циклических изменений вектора поляризации при непрерывном циклическом облучении твердого образца азокрасителя в полимерной матрице позволяют сформулировать следующие гипотезы:

– в образце наблюдается фотохромная обратимая *транс* ↔ *цис*-фотоизомеризация;
– фотостационарное состояние определяется соотношением концентраций молекул в *цис-транс* состояниях и зависит от спектрального состава излучения накачки;
– спад величины наблюдаемого фотостационарного состояния обусловлен постепенным ориентационным молекулярным упорядочением как самого азокрасителя в обеих фотохромных формах, так и находящихся в их наноокружении фрагментов полимерной матрицы в направлении распространения света накачки.

Поляриметрические наблюдения оранжевого образца ТОСП T_b показали его оптическую однородность и изотропность. Измерение спектров поглощения исходно изотропного образца T_b и обученного поляризованным излучением лампы ДРШ-250 показало, что он проявляет свойство фотохимически стабильного красителя. Действительно, фрагменты спектров поглощения (рис. 4) показывают, что образец T_b просветляется для параллельной компоненты поляризации и затемняется для ортогональной компоненты. Такое просветление и затемнение спектра поглощения при облучении поляризованным излучением характерно для фотохимически стабильных веществ.

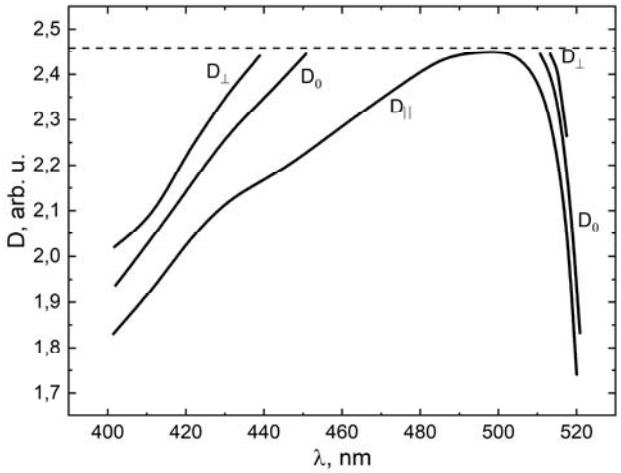


Рис. 4. Спектры поглощения образца ТОСП T_b до уровня D_0 и после облучения поляризованным излучением $D_\perp$ и $D_\parallel$

Fig. 4. Absorption spectra of the TOSP T_b sample recorded up to the D_0 level and after irradiation with polarized radiation $D_\perp$ and $D_\parallel$

Это подтверждается и циклической кинетикой фазовой задержки при наведении ДЛП в образце оргстекла T_b и ее темновой релаксацией. Циклы кинетики представлены на рис. 5, где кривые 1 и 3 соответствуют наведению, а кривые 2 и 4 – релаксации. Исходная фазовая задержка равна нулю. При облучении образца наводится ДЛП (кривая 1) и фазовая задержка достигает 5°. При прекращении облучения возникает темновая релаксация фазовой задержки до 1° (кривая 2). Нами выполнено еще два измерения, которые описываются кривыми 3 и 4. Здесь фазовая задержка с каждым циклом наводится быстрее, а ее значение возрастает. Кривая 4 показывает замедленную релаксацию с выходом на стабилизацию величины $\delta > 0$ в результате повторного наведения.

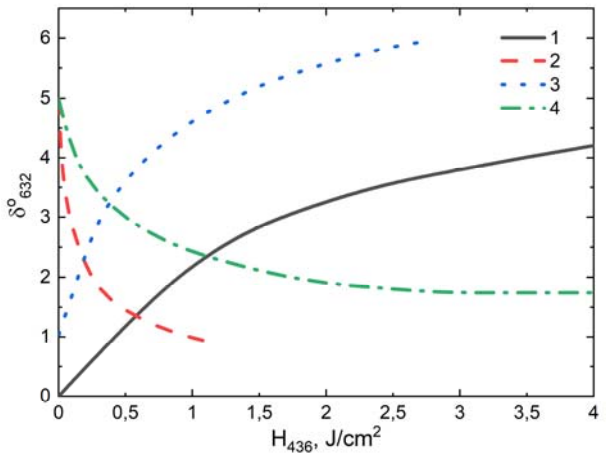


Рис. 5. Кинетика фотоиндуцированного двулучепреломления в образце ТОСП T_b: кривая 1 – первое наведение; кривая 2 – темновая релаксация после первого цикла; кривая 3 – второе наведение; кривая 4 – темновая релаксация после второго цикла

Fig. 5. Kinetics of photoinduced birefringence in the glass sample T_b: curve 1 – first induction; curve 2 – dark relaxation after the first cycle; curve 3 – second induction; curve 4 – dark relaxation after the second cycle

Результаты аналогичных измерений многократного цикличного «наведения – темновой релаксации» в образце T_b при температуре 24 ºС и использовании всего спектра лампы ДРШ-250 показаны на рис. 6.

После каждого облучения в течение нескольких минут осуществлялась темновая релаксация (на рис. 6 не показана). С увеличением циклов (кривые B – J), величина фотостационарного ДЛП постоянно возрастала. После одиннадцатого цикла, обозначенного кривой N, достигнутая величина ДЛП «стиралась» до нуля (кривая P) и возрастала при повторных циклах (см. кривые H и L на рис. 6), но уже с меньшей скоростью наведения.

Зависимость максимальной величины ДЛП от номера цикла «облучение – темновая релаксация» показана на рис. 7.

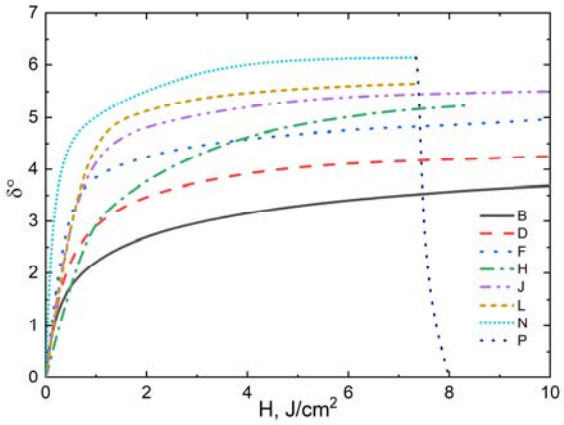


Рис. 6. Кинетика фотоиндуцированного двулучепреломления (ДЛП) в образце ТОСП T_b при многократных циклах облучения с длительной темновой релаксацией после каждого цикла. Латинскими литерами обозначены кривые для различных циклов:
B-J – последовательное наведение ДЛП в циклах 1-9, демонстрирующее рост фотостационарного значения; N – одиннадцатый цикл, после которого было произведено оптическое стирание; P – процесс оптического стирания наведенной анизотропии; H, L – повторные циклы наведения после стирания, показывающие восстановление эффекта с меньшей скоростью. Кривые демонстрируют эффект накопления ориентационного порядка в материале и возможность его последующей перезаписи.

Fig. 6. Kinetics of photoinduced birefringence (PIB) in the glass sample Tb under multiple irradiation cycles with long-term dark relaxation after each cycle. Latin letters indicate the curves for different cycles:
B-J – sequential PIB induction in cycles 1-9, showing an increase in the photostationary value; N – the eleventh cycle, after which optical erasure was performed; P – the process of optical erasure of the induced anisotropy; H, L – repeated induction cycles after erasure, demonstrating the recovery of the effect with a slower rate. The curves illustrate the accumulation of orientational order in the material and the possibility of subsequent recording.

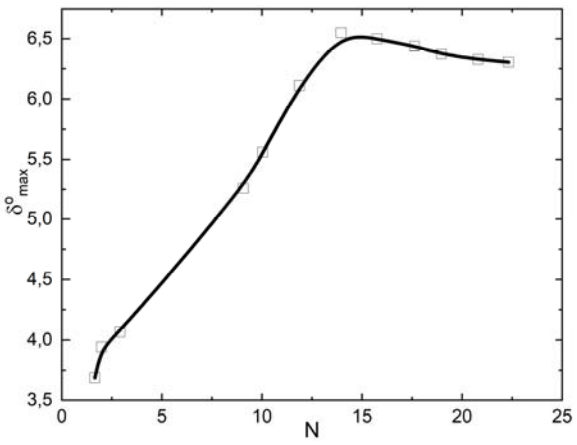


Рис. 7. Изменение величины насыщения фазовой задержки образца в зависимости от номера цикла «облучение – темновая релаксация»

Fig. 7. Dependence of the saturated value of birefringence versus the "exposure – dark relaxation" cycle number

Сравнительные исследования исходно изотропных и анизотропных областей образца T_c. (толщина 5 мм), что он изотропен, однако местами имеются пространственно-фазовые неоднородности ДЛП, которые связаны с напряженным состоянием при его изготовлении методом литья под давлением. Облучение выполнялось при температуре 24,5 °С в области прозрачности ПММА матрицы с помощью импульсного N_2 лазера ЛГИ - 21 с λ = 337 нм. Длительность импульса составляла 10 нс, частота повторения – 100 Гц. Усредненная плотность мощности в плоскости образца составляла около 6 мВт/см^2. Кинетика ДЛП измерялась на длине волны He-Ne лазера. Облучение осуществлялось в изотропных и напряженных областях образца.

Заключение

Исследовано формирование фотоиндуцированной оптической анизотропии в объемных фоточувствительных средах с толщинами слоев, значительно больших длин волны видимого спектра. В качестве таких объектов исследований были использованы цветные органические полимерные стекла марки ТОСП на основе азокрасителей. Установлено, что слои на основе фотохимически стабильных анизотропных веществ, особенно на основе двухфотонно индуцированной ФИА, пригодны для изготовления компьютерно-синтезированных пространственно-объемных картинных анизотропных оптических элементов с трехмерным распределением их поляризационных свойств в виде оптической оси.

Для создания картинно-объемных анизотропных структур могут использоваться материалы на основе исходно изотропных фотополимеризующихся мономерно-олигомерных композиций с анизотропными веществами, подобных тонкопленочным полимерным не пластифицированным слоям, особенно жидкокристаллические структуры на основе фотоизомеризующихся производных коричной кислоты. Для этих структур характерно протекание фототопохимической реакции $\{2+2\}$ циклоприсоединения типа ПВЦ. Для ее протекания необходимо тесное сближение двух непредельных фрагментов, что проявляется и в эффекте ФИА в них.

Благодарность: *работа выполнена при частичной поддержке Российского научного фонда, грант № 25-49-01022.*

Acknowledgments*: this work was partially supported by the Russian Science Foundation, grant No. 25-49-01022.*

Список литературы/References

1. Schadt M., Schmitt K., Kozenkov V., Chigrinov V. Surface-induced parallel alignment of liquid crystals by linearly polymerized photopolymers. *Jap. J. Appl. Phys*., 1992, **31**, 2155–2164. **DOI:** 10.1143/JJAP.31.2155.
2. Chigrinov V.G., Kozenkov V.M., Kwok H.S. Photoalignment of liquid crystalline materials: Physics and applications. Wiley, 2008. 248 p. **DOI:** 10.1002/9780470751800.
3. Weigert F. Über einen neuen effekt der strahlung in lichtempfindlichen schichten. *Verh. Dtsch. Phys. Ges*., 1919, **21**, 479–491, 615, 623. **DOI:** 10.1007/BF01496055.
4. Weigert F. Über einen neuen effekt der strahlung. *Z. Physik*, 1921, **5**, 410–427. **DOI**: 10.1007/BF01327678.
5. Kondo T. Uber den photoanisotropen effect (Weigert-effect) an Farbstoffen. *Z. Wiss. Photogr. Photophys. Photochem*. 1932, **31**, 153–167.
6. Borrelli N.F., Chodak J.B., Hares G.B. Optically induced anisotropy in photochromic glasses. *J. Appl. Phys.,* 1979, **50**, 5978–5987.
7. Blanche P.-A., Lemaire P.C., Dumont M., Fischer M. Photoinduced orientation of azo dye in various polymer matrices. *Opt. Lett.,* 1999, **24**, 1349–1351. **DOI:** 10.1364/OL.24.001349.
8. Nakamura H., Ishiyama T., Sato M., Tomida K., Aizawa M., Hisano K., Nakano W., Kubo S., Shishido A. Alignment patterning of polymer main chain by spatiotemporal photopolymerization: A strategy for

improved thermal stability. *Langmuir*, 2025, 41, 10552–10561. **DOI:** 10.1021/acs.langmuir.5c00624

9. Chigrinov V., Pikin S., Verevochnikov A., Kozenkov V., Khazimullin M., Ho J., Huang D.D., Kwok H.-S. Diffusion model of photoaligning in azo-dye layers. *Phys. Rev. E*, 2004, **69**, 061713. **DOI:**10.1103/PHYSREVE.69.061713.
10. Воробьев А. Х. Фотоселекция и фотоориентация // *Экспериментальные методы химии высоких энергий* / ред. М. Я. Мельников. М. : МГУ, 2009. Гл. 5. С. 369–437. [Vorobiev A.K. Photoselection and photoalignment. *Experimental methods of high energy chemistry* / Ed. M.Y. Melnikov. Moscow : State University Publishers, 2009, Ch. 5, 369–437 (in Russ.)].
11. Козенков В., Барачевский В. Органические фотоанизотропные материалы и их применение. // *Свойства светочувствительных материалов и их применение в голографии.* Л. : Наука, 1987. С. 89–96. [Kozenkov V., Barachevsky V. Organic photoanisotropic materials and their application. *Properties of light sensitive materials and their application in holography*. Leningrad : Nauka Publishers, 1987, 89–96 (in Russ.)].
12. Козенков В. М., Спахов А. А., Беляев В. В., Чаусов Д. Н., Чигринов В. Г. Спектральная фотосенсибилизация оптической анизотропии в твердотельных пленках поли (винилциннамата) // *Журнал технической физики.* 2018. Т. 88. С. 592–596. [Kozenkov V.M., Spakhov A.A., Belyaev V.V., Chausov D.N., Chigrinov V.G. Spectral photosensitization of optical anisotropy in solid-state poly(vinyl cinnamate) films. *J. Tech. Phys.,* 2018, **88**. 592–596 (in Russ)]. **DOI:** 10.21883/JTF.2018.04.45729.2263.
13. Chigrinov V.G., Kudreyko A.A., Kozenkov V.M. Kinetics of photoinduced phase retardation in azo dye layer. Liq. Cryst., 2022, **49** (10), 1376–1383. **DOI:** 10.1080/02678292.2022.2037766.
14. Бахшиев Н. Г. Спектроскопия межмолекулярных взаимодействий. Л., Наука, 1972. 263 с. [Bakhshiev N.G. Spectroscopy of intermolecular interactions. Leningrad: Nauka Publishers, 1972, 263 p. (in Russ.)].
15. Magnitskiy S.A., Nagorskiy N.M., Kozenkov V.M. Orientation of the AD-1 azo-dye molecules in solid nanostructured films upon the two-photon excitation. *Laser Phys.*, 2008, **18** (12), 1400–1410. **DOI:** 10.1134/S1054660X08120050.
16. Козенков В., Беляев В., Чаусов Д. Тонкопленочные поляризаторы на основе лиотропных жидких кристаллов и фотоанизотропных материалов: свойства и технологии // *Жидк. кристалл. и их практич. использ*. 2021. Т. 21, № 3. С. 6–25 [Kozenkov V.M., Belyaev V.V., Chausov D.N. Thin film polarizers based on lyotropic liquid crystals and photoanisotropic materials: properties and technologies. *Liq. Cryst. and their Appl.,* 2021, **21** (3), 6–25 (in Russ.)]. **DOI:** 10.18083/LCAppl.2021.3.6.
17. Kozenkov V.M., Belyaev V.V., Chausov D.N. Thin film polarizers: Properties and technologies. Part 1. *Optics and Spectroscopy,* 2022, **130** (6), 377–388. **DOI**:10.1134/S0030400X22070050.
18. Козенков В. М., Беляев В. В., Чаусов Д. Н. Тонкопленочные поляризаторы: свойства, технологии. I. Основные типы // *Жидк. кристалл. и их практич. использ*. 2021. Т. 21, № 2. С. 5–23. [Kozenkov V.M., Belyaev V.V., Chausov D.N. Thin film polarizers: properties and technologis. 1. Main types. *Liq. Cryst. and their Appl.,* 2021, **21** (2), 5–23 (in Russ.)]. **DOI:** 10.18083/LCAppl.2021.2.5.
19. Kozenkov V.M., Belyaev V.V., Chausov D.N. Thin film polarizers: Properties and technologies. Part 2: Lyotropic LC and photoanisotropic materials. *Opt. Spectrosc.,* 2022, **130** (6), 389–401. **DOI**: 10.1134/S0030400X22070062.
20. Manish Kumar and Sandeep Kumar. Liquid crystals in photovoltaics: a new generation of organic photovoltaics. *Nature Polymer Journal*, 2017, **49**, 85–111. **DOI**: 10.1038/pj.2016.109.
21. Sandeep Kumar. Discotic liquid crystal-nanoparticle hybrid systems. *Nature Asia Materials*, 2014, **6**, e82, **DOI**:10.1038/am.2013.75.

Вклад авторов:

*[1]**Козенков В. М.** – концепция работы, приготовление образцов.*
*[2]**Беляев В. В.** – консультация по вопросам методологии, написание текста статьи.*
*[3]**Авдеенков В. А.** – проведение исследований, подготовка иллюстраций.*
*[4]**Чекулаев И. С.** – проведение исследований, подготовка иллюстраций.*
*[5]**Кудрейко А. А.** – выполнение расчетных работ.*
*[6]**Чаусов Д. Н.** – консультация по вопросам методологии и реализации исследования, редактирование текста статьи.*

Contribution of the authors:

*[1]**Kozenkov V. M.** – concept of R&D, samples manufacturing*
*[2]**Belyaev V. V.** – consultation on methodology and implementation of the study, writing of the text of the article.*
*[3]**Avdeenkov V. A.** – conducting research, preparing illustrations.*
*[4]**Chekulaev I. S.** – conducting research, preparing illustrations.*
*[5]**Kudreyko A. A.**– conducting computation works.*
*[6]**Chausov D. N.** – consultation on methodology and implementation of the study, editing of the text of the article.*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interest.

[2]https://orcid.org/0000-0003-0553-9358
[3]https://orcid.org/0000-0002-4050-0910
[4]https://orcid.org/0000-0002-6636-5876
[5]https://orcid.org/0000-0001-7211-0741
[6]https://orcid.org/0000-0002-1287-6427

Поступила 17.10.2025, одобрена 25.12.2025, принята 12.01.2026
Received 17.10.2025, approved 25.12.2025, accepted 12.01.2026