

УДК 538.958

**В. М. Козенков<sup>1</sup>, А. А. Спахов<sup>2</sup>, В. В. Беляев<sup>2,3</sup>, Д. Н. Чаусов<sup>2</sup>**

**ОБРАТИМАЯ ФОТОИНДУЦИРОВАННАЯ АНИЗОТРОПИЯ АЗОКСИБЕНЗОЛОВ  
В ЖК-ФАЗЕ И В ТВЕРДЫХ ПОЛИМЕРНЫХ РАСТВОРАХ**

<sup>1</sup> ОАО НПО «Криптен», ул. Приборостроителей, д. 2, 141981 Дубна, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный областной университет,  
учебно-научная лаборатория теоретической и прикладной нанотехнологии,  
ул. Радио, д. 10-а, 105005 Москва, Россия. E-mail: spakhov@mail.ru

<sup>3</sup> Российский университет дружбы народов,  
ул. Миклухо-Маклая, д. 6, 117198 Москва, Россия

*Исследованы кинетические особенности индуцированного фазового перехода нематик – изотропная жидкость в слоях ЖК-440Д на основе смеси азоксибензолов, при поглощении ими поляризованного или неполяризованного, но направленного излучения и обратного темнового процесса в них при отключении активирующего излучения. Измерены спектральные изменения ЖК-440Д, а также влияние длины волны активирующего излучения (365 и 405 нм) на изменение пропускания ЖК-ячейки (толщиной 10 мкм) с натертыми полимерными слоями в качестве ориентанта, размещенной между скрещенными поляризаторами. Одновременно измерялась кинетика изменения интенсивности светорассеяния на ней в области прозрачности ( $\lambda = 632,8$  нм) и анизотропии формируемой пространственной дифракционной картины в поперечном сечении зондирующего пучка. Показано, что голограммы, записанные в слоях твердых молекулярных растворов смеси ЖК-440Д (12 вес. %) в полиметилметакрилате с помощью He-Cd лазера ( $\lambda = 325$  нм), хранились несколько часов, тогда как в чистом ЖК-440Д они исчезали через несколько минут.*

**Ключевые слова:** жидкие кристаллы, двулучепреломление, анизотропия, дихроизм.

**DOI:** 10.18083/LCAppl.2016.1.29

**V. M. Kozenkov<sup>1</sup>, A. A. Spakhov<sup>2</sup>, V. V. Belyaev<sup>2,3</sup>, D. N. Chausov<sup>2</sup>**

**REVERSIBLE PHOTOINDUCED ANISOTROPY OF AZOXYBENZENES  
IN NEMATIC LIQUID CRYSTAL PHASE AND IN SOLID POLYMER SOLUTIONS**

<sup>1</sup> NPO «Kripten», 2 Priborostroiteley St., Dubna, 141981, Moscow Region, Russia

<sup>2</sup> Moscow Region State University, educational and research laboratory of theoretical and applied nanotechnology, 10-a Radio St., Moscow, 105005, Russia. E-mail: spakhov@mail.ru

<sup>3</sup> Peoples' Friendship University of Russia, 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russia

*Kinetic peculiarities of the induced phase transition "nematic-isotropic liquid" in the layers of ZhK-440D, based on a mixture of liquid crystal (LC) azoxybenzenes have been investigated. Different cases of the absorption of polarized or unpolarized radiation were realized. Spectral changes of ZhK-440D, as well as the influence of activating radiation wavelength (365 and 405 nm) on the change in the transmission of the LC cell (10  $\mu$ m thick) with rubbed polymer layers as orientants have been measured. At the same time the kinetics of changes in the intensity of light scattering in the transparency region ( $\lambda = 632.8$  nm) formed by the spatial anisotropy of the diffraction pattern in the cross section of the probe beam was measured. It was showed that the holograms*

recorded in layers of the solid molecular solutions of the ZhK-440D mixture (12 wt. %) in polymethyl metacrylate with the help of He-Cd laser ( $\lambda = 325$  nm) were stored for a few hours, whereas in the pure ZhK-440D they disappeared in a few minutes.

**Key words:** liquid crystals, birefringence, anisotropy, dichroism.

### Введение

Известно, что низкомолекулярные термотропные жидкие кристаллы (ЖК) чрезвычайно чувствительны к внешним, в том числе оптическим, воздействиям.

При активации в области прозрачности предсказана и обнаружена «гигантская» оптическая нелинейность нематических ЖК (НЖК) [1–6]. Она является оптическим аналогом электрического эффекта Фредерикса [3].

Фоторефрактивные эффекты и «гигантская» оптическая нелинейность обнаружены и при воздействии слабых световых потоков мощностью около  $0,1$  Вт/см<sup>2</sup> в собственной полосе поглощения молекул ЖК или примесных молекул, растворенных в нем. В этом случае нелинейно-оптические явления могут проявляться как через нагрев слоя или фотохимических изменений дипольных моментов оптических переходов и поляризуемостей самих ЖК-молекул или примесных молекул, так и через влияние оптически возбужденных состояний молекул на структуру ЖК [7–11].

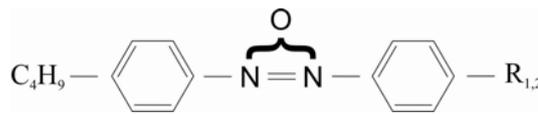
В [8] предполагается, что при оптическом возбуждении фотохимически стабильных примесных молекул светоиндуцированная переориентация директора  $L$  в поглощающих НЖК связана с изменением межмолекулярных сил диполь-дипольного взаимодействия. При этом важную роль играет ориентационная селективность их возбуждения, приводящая к асимметричному (относительно директора  $L$ ) ориентационному распределению возбужденных молекул. Следствием всего этого могут быть макроскопические изменения фазового состояния слоя.

В силу высокой чувствительности ЖК к внешним воздействиям фоторефрактивные явления в них представляют интерес в средствах оптической обработки информации, в том числе для записи изображений и поляризационных голограмм [12], получения динамических дифракционных решеток [13, 14], тепловых линз [15] и т. д. Однако механизмы данного явления при воздействии слабых световых полей не достаточно ясны.

В настоящей работе исследованы кинетические особенности обратимого фазового перехода нематик – изотропная жидкость в низкомолекулярном термотропном ЖК-440Д под действием слабых световых потоков, обнаруженного в [10]. Кроме того, исследовано фотоиндуцированное двулучепреломление (ДЛП) композиции ЖК-440Д в твердом изотропном полимерном растворе

### Методика эксперимента

В качестве объекта исследования использовался материал ЖК-440Д (производитель ГНЦ «НИОПиК» Россия), представляющий собой смесь производных азоксибензола общей формулы



где  $R_1 = \text{OCH}_3$  есть *n-n*-бутил-*n*-метоксиазоксибензол (БМАОБ, ЖК-434) и  $R_2 = \text{OSOC}_6\text{H}_{13}$  есть *n-n*-бутил-*p*-гептаноилоксиазоксибензол (БГОАБ, ЖК-439), взятых в соотношении 2:1. ЖК легирован ионной примесью тетрабутиламмония бромистого. ЖК-440Д имеет следующие физические характеристики [16, 17]: температурные области фазовых переходов  $T_{\text{C-I-N}} = 265,6$  К и  $T_{\text{NI}} = 344,4 - 345,5$  К, величина двулучепреломления в нематической фазе  $\Delta n = (n_e - n_o) = 0,24$ , где  $n_e = 1,784$  и  $n_o = 1,540$  при  $\lambda = 589$  нм.

Каждое из указанных веществ, в свою очередь, является смесью двух изомеров, различающихся положением кислорода при азоте относительно остальной части молекулы. В настоящей работе слой ЖК-440 или ЖК-440Д толщиной около 10 мкм заключался между стеклянными пластинами с тонкими ориентирующими слоями поливинилового спирта. Использовалась планарная или твист-структуры, полученные натиранием поверхности ориентанта во взаимно ортогональных направлениях по методу Шатллена [18].

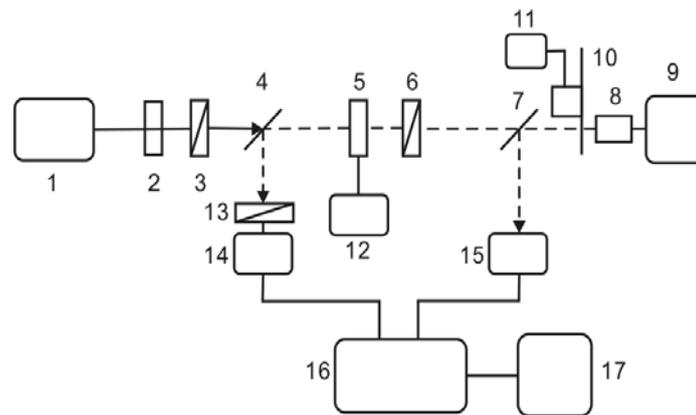


Рис. 1. Схема измерительной установки:

1 – источник возбуждающего излучения (лампа ДРШ-250); 2 – стеклянные светофильтры; 3, 6, 13 – Глау-Томпсон поляризаторы; 4, 7 – светоделительные зеркала; 5 – образец; 8 – монохроматор; 9 – зондирующий источник излучения (He-Ne лазер или галогенная лампа накаливания); 10 – модулятор; 11 – двигатель; 12 – термостат; 14, 15 – детекторы; 16 – усилитель; 17 – регистрирующее устройство

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки. Источником активирующего излучения 1 служила ртутная лампа ДРШ-250 со стеклянными светофильтрами 2, выделяющими отдельные спектральные линии и призмой Глау-Томпсона 3 для получения линейно поляризованного излучения. Измерение фотоиндуцированных изменений производили при комнатной температуре в области прозрачности ЖК непосредственно в процессе фотоактивации образца 5 на длине волны He-Ne лазера 9 ( $\lambda_{\text{изм}} = 632,8$  нм). Последний размещался между поляризаторами 6 и 13 таким образом, что направление длинных осей молекул ЖК (директор  $L$  на передней поверхности ячейки 5 со стороны активирующего излучения 1 совпадал с направлением вектора поляризации падающего измерительного пучка 9. Плотность мощности активирующего излучения в плоскости расположения образца составляла порядка  $1-2$  мВт/см<sup>2</sup>.

Доменная микроструктура в облучаемой области наблюдалась с помощью поляризационного микроскопа МИН-8. Одновременно там же исследовалась пространственная структура рассеянного на ней излучения He-Ne лазера 9.

### Результаты и их обсуждение

*Исследование ячеек ЖК-440 в нематическом состоянии*

На рис. 2 приведен длинноволновый край спектра поглощения необлученной ЖК-ячейки ЖКМ-440Д в исходно нематическом состоянии без

поляризаторов (кр. 1) и между скрещенных поляризаторов (кр. 2,3) до (кр. 2) и после (кр. 3) частичного облучения неполяризованным УФ-излучением.

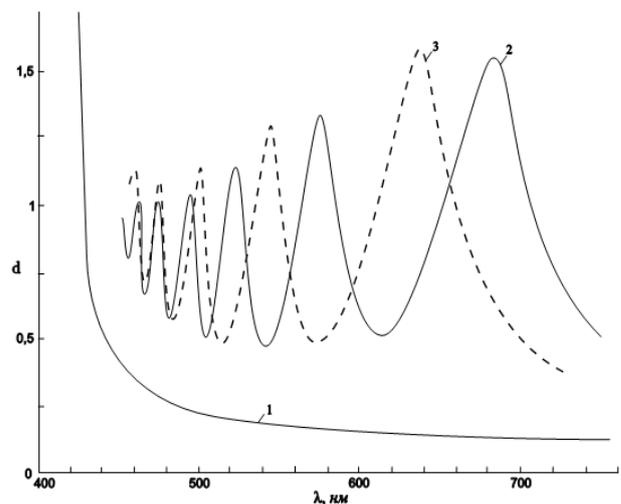


Рис. 2. Длинноволновая область спектра поглощения необлученной ячейки с ЖК-440Д

Наблюдаемые осцилляции обусловлены в основном нарушением «волноводного» условия Могена  $\lambda_{\text{изм}} \ll 4(n_e - n_o) d$ , где  $d$  – толщина ЖК-слоя, а  $\lambda_{\text{изм}}$  – длина волны зондирующего (измерительного) излучения.

Ячейка теряет оптическую активность при воздействии УФ-излучения ( $\lambda_{\text{УФ}} = 365$  нм) с переходом в изотропное состояние, что проявляется в коротковолновом сдвиге и деформации осцилляций кривой поглощения системы «параллельные поляризаторы – слой НЖК». Спектры поглощения ЖК-ячейки, переведенной в изотропное состояние при термическом и оптическом воздействии, несколько различаются.

С течением времени (порядка десятков часов) исходное состояние ЖКЯ восстанавливается.

Кинетика перехода в изотропное состояние ЖК-440Д (пропускания ( $T_{632}$ ) системы скрещенных поляризаторов) в зависимости от энергии активирующего излучения приведены на рис. 3 для различных длин волн ( $\lambda_{\text{акт}} = 365$  нм и 405 нм), (кр. 1 и 2).  $T_{632} = \sin^2(\pi \Delta n d / \lambda_{\text{изм}})$ , где  $\Delta n = n_e - n_o$  – величина ДЛП, усредненная по толщине слоя  $d$ , а  $n_o$  и  $n_e$  – показатели преломления слоя для обыкновенного и необыкновенного лучей.

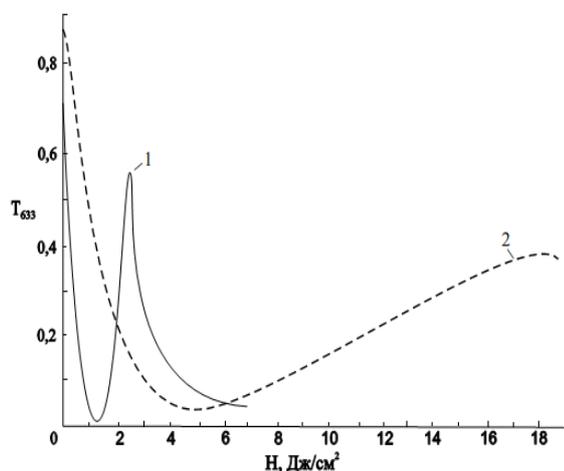


Рис. 3. Кинетика изменения пропускания ( $T_{632}$ ) системы скрещенных поляризаторов с ячейкой ЖК-440Д от энергии облучения ( $H$ ) для различных длин волн экспонирования:

$$1 - \lambda_{\text{акт}} = 365 \text{ нм}, P_{365} = 1,1 \text{ мВт/см}^2$$

$$2 - \lambda_{\text{акт}} = 405 \text{ нм}, P_{405} = 2,5 \text{ мВт/см}^2$$

Аналогичная зависимость для параллельных поляризаторов приведена на рис. 4 (кр. 1) при активации на  $\lambda_{\text{акт}} = 365$  нм.

В отсутствие активирующего излучения и в первые минуты облучения слой НЖК почти прозрачен и однороден (рис. 4, кр.1). Небольшое рассеяние может быть обусловлено беспорядочными тепловыми колебаниями больших групп молекул, что приводит к микролокальным изменениям молекулярной ориентации (флуктуации директора  $\mathbf{L}$ ) и градиентам показателя преломления в этих местах. Возникшая под действием активирующего излучения переориентация молекул ЖК проявляется в виде изменения пропускания в параллельных поляризаторах (рис. 4, кр. 1). При наблюдении в поляризационный микроскоп облученные участки ячейки выглядят слабо окрашенными в красный и зеленый цвета.

Дальнейшее экспонирование до некоторого порогового значения приводит к резкому возрастанию рассеяния света (рис. 4, кр. 1 и рис. 5, кр. 1) с последующим просветлением до уровня большего, чем в исходном нематическом состоянии.

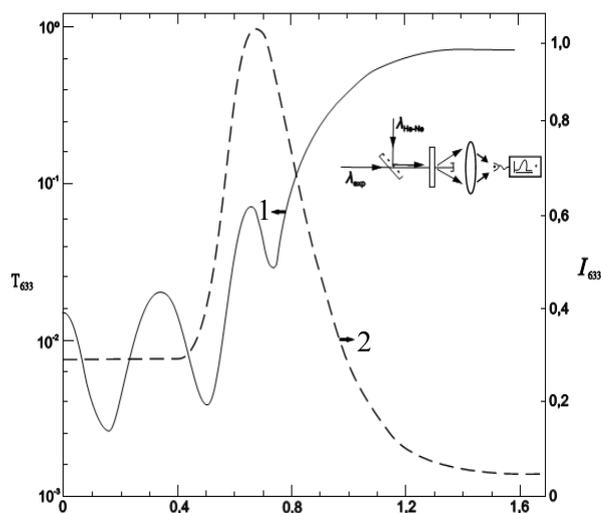


Рис. 4. Кинетика изменения пропускания ячейки с ЖК-440Д между параллельных поляризаторов (кр. 1) и светорассеяния (кр. 2) на ней в процессе облучения неполяризованным УФ-излучением:  $\lambda_{\text{акт}} = 365$  нм;  $P_{365} = 1,1$  мВт/см<sup>2</sup>;  $t = 19$  °С. На сноске схематически представлена методика измерения

Эволюция такого изменения в различные промежутки времени приведена на рис. 6.

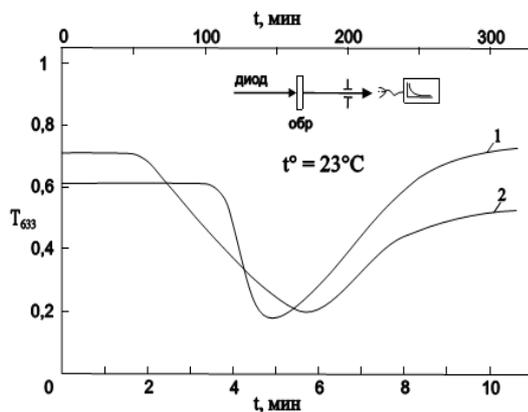


Рис. 5. Кинетика фотоиндуцированного светорассеяния в ячейке на основе ЖК-440Д (кр. 1) и его темновой релаксации после отключения излучения (кр. 2):  $\lambda_{\text{акт}} = 365 \text{ нм}$ ;  $P_{365} = 1,1 \text{ мВт/см}^2$ ;  $t = 23 \text{ }^\circ\text{C}$ . На вставке схематически представлена методика измерения

Первоначально следы светорассеяния появляются в виде узкой полосы, перпендикулярной направлению натирания передней (облучаемой) поверхности ЖКЯ. Это рассеяние обусловлено зародышами изотропной фазы, формирующимися в виде «капелек» микрометровых размеров, распо-

ложенных в бороздках на поверхности стороны ячейки, обращенной к источнику активирующего УФ-излучения, сильно поглощаемого ЖК-материалом. В дальнейшем появляется диффузное гало рассеяния в ортогональном направлении, обусловленное формированием изотропных «капелек» на противоположной стороне ячейки, переходящее в интенсивное кольцеобразное рассеяние в виде конуса и переходящее в прозрачное изотропное состояние без рассеяния.

Наблюдение под микроскопом показало, что дифракция в виде узкой полосы идет на мелких зародышах изотропной фазы, преимущественно распределенных вдоль бороздок направлений ориентирующей поверхности. Стимулированная активирующим излучением изотропная структура является метастабильной и со временем разрушается с переходом снова через светорассеяние (рис. 5, кр. 2) в исходную *твист*-структуру. Время подобного релаксационного процесса зависит от температуры и энергии активации и составляет от нескольких минут до нескольких часов, причем переход может быть ускорен не только нагревом слоя, но и его охлаждением до  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ .

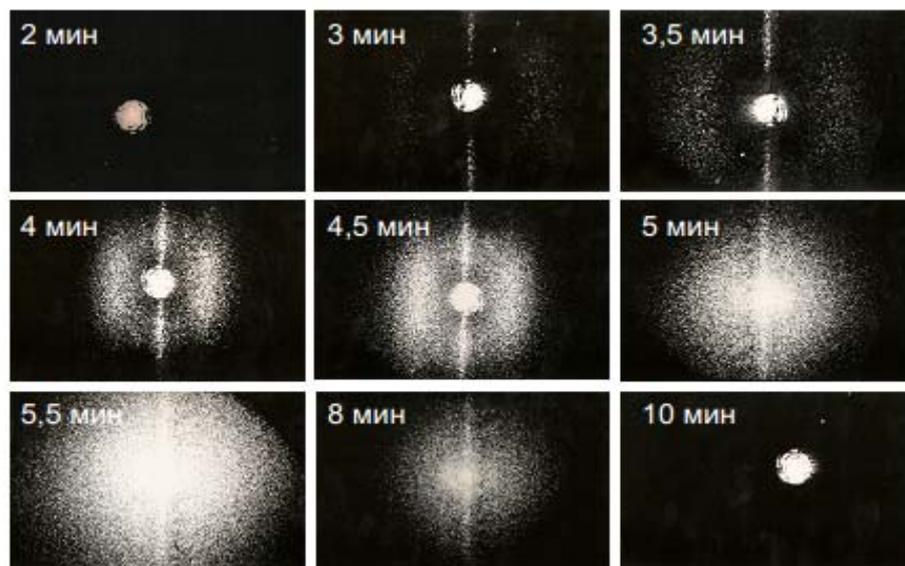


Рис. 6. Эволюция структуры дифракционной картины рассеянного на ячейке с ЖКМ-440Д когерентного излучения He-Ne лазера в процессе ее облучения УФ-излучением, измеренная в различные промежутки времени

Одной из причин таких обратимых фотоиндуцированных переходов нематик – изотропная жидкость может быть фотохимия азоксианизолов. Данные вещества могут претерпевать обратимую (фотохромную) *транс* ↔ *цис* фотоизомеризацию [19–21], приводящую к формированию конфигурации, характеризующейся новыми значениями постоянных дипольных моментов и анизотропных поляризуемостей индивидуальных молекул, и влияющих на параметр порядка всего слоя.

Другой возможностью является механизм внутримолекулярной перегруппировки атомов под действием света, состоящий в перемещении атома кислорода между атомами азота или его включение между соседними атомами водорода и углерода ароматического кольца в *орто*-положении. В результате подобных фотохромных процессов может изменяться изомерный (химический) состав смеси, влияющий на температурный интервал нематической фазы и оптические характеристики ЖК-слоя. Однако необычность поведения темновой релаксации (возможность перехода в НЖК-состояния не только нагревом, но и охлаждением, характерное микроскопическое поведение при прямом и обратном процессе) позволяет считать, что роль поверхностно адсорбированных молекул ЖК-440 высока [22, 23]. При этом можно предположить, что данные поверхностно адсорбированные молекулы достаточно фотохимически стабильные, а фазовый переход нематик – изотропная жидкость происходит за счет случайной переориентации адсорбированных ЖК-молекул при поглощении и безызлучательной релаксации квантов активирующего излучения и, как следствие, переходе данной неориентированной поверхностной структуры в объем ЖК-слоя. Постепенно в изотропном растворе появляются сферолиты, которые сливаются в сплошные анизотропные области.

Представляет интерес эффект восстановления исходной нематической фазы после снятия воздействия неполяризованного излучения. Повидимому, ориентация, созданная при течении, оказывает влияние на весь объем раствора (даже при толщине порядка 1 мм), препятствуя его ориентации в поле и обуславливая возврат в исходное состояние после снятия поля.

При отсутствии напряжения и его малых значениях образец прозрачен и пропускает пучок света без рассеяния. Дальнейшее увеличение напряжения до некоторого порогового значения

приводит к резкому рассеянию пучка света в виде узкой полосы, перпендикулярной главной оптической оси. Затем полоса распадалась на последовательность пятен вдоль того же направления. Одновременное микроскопическое наблюдение поверхности ЖК показало, что она состоит из чередующихся светлых и темных параллельных полос.

Возможной причиной эффектов возникновения и формирования слоистой структуры, возникающей при достижении порогового напряжения, а также первоначального резкого падения интенсивности пучка естественного света без разложения его в спектр является отражение и рассеяние света на данной структуре в момент ее формирования. При этом в пленке образуется градиент показателя преломления в результате влияния поля на расположение спонтанно ориентированных областей молекул, обладающих значительным суммарным дипольным моментом. Рост напряжения выше пороговой величины приводит к увеличению интенсивности света.

Один из механизмов этого явления заключается в образовании чечевицеобразных и клинообразных зародышей слоев на дефектах подложки. Размер зародышей изменяется от самых маленьких до более крупных, расположенных ближе к границе с нематиком. Вдали от границы нематика видны мелкие зародыши, быстро исчезающие при включении осветителя или при повышении температуры. Зародыши движутся, растут, достигая некоторых критических размеров, соединяются друг с другом и, наконец, сливаются с остальной массой мезофазы.

Наличие электрического поля при наложении 20–30 вольт вызывает коагуляцию частиц во всей полосе, занятой каплями. В результате их слияния образуется масса нематика, имеющая другую окраску. В скрещенных поляризаторах видны границы раздела между нематиком, образовавшимся в поле, нематиком в отсутствие поля и изотропной фазой. В электрическом поле рост образования нематической фазы ускоряется. Турбулентное движение вещества сопровождается сильным рассеянием света.

Необычность поведения темновой релаксации (возможность перехода в НЖК-состояния не только при нагреве, но и при охлаждении, характерное микроскопическое поведение при прямом и обратном процессе, позволяет считать, что роль поверхностно адсорбированных молекул

высока. При этом можно предположить, что данные ЖКМ являются достаточно фотохимически стабильными (устойчивыми), а фазовый переход происходит за счет случайной переориентации адсорбированных молекул при поглощении активирующего излучения и, как следствие, перехода данной неориентированной структуры в объем слоя.

#### Исследование изотропных полимерных пленок с растворенным в них ЖК-440

Исследована фотоиндуцированная анизотропия тонких (порядка 15 мкм) твердых пленок полиметилметакрилата с растворенным в них на молекулярном уровне ЖКМ-440 (12 вес. %). Они полностью прозрачны в видимой области спектра и поглощают излучение с  $\lambda \leq 480$  нм.

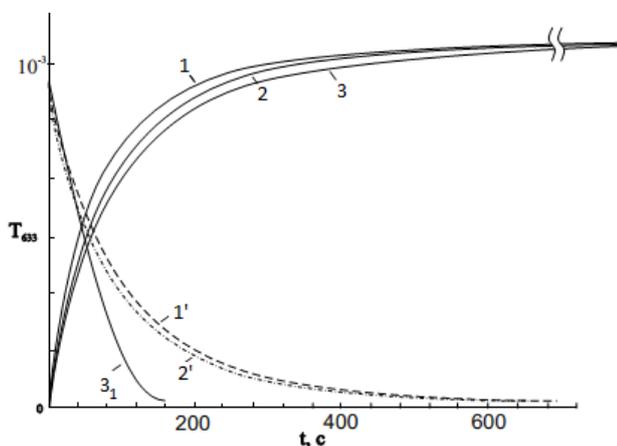


Рис. 7. Кинетика циклического наведения (кр. 1, 2 и 3), темновой релаксации (кр. 1', 2'), оптического стирания (кр. 3<sub>1</sub>) ДЛП в твердотельной пленке полимерного раствора ПММА с ЖК-440 (12 вес. %). Толщина слоя 15 мкм;  $\lambda_{акт} = 365$  нм;  $P_{365} = 1,1$  мВт/см<sup>2</sup>;  $t = 18$  °С

Такие пленки при действии поляризованного излучения (длина волны активации 365 нм) проявляют фотоиндуцированное двулучепреломление при 632,8 нм, которое непрерывно растет до наступления фотостационарного состояния при длительном облучении (рис. 7, кр. 1). Из-за пластифицирующего действия ЖКМ-440 оно сохраняется порядка 20 мин при отключении поляризованного излучения. Однако ДЛП наводится вновь при повторном облучении, причем после проведения по крайней мере 10 циклов не замечается каких-либо следов «усталости» при оптическом наведении и темновой вращательной релаксации (рис. 7). Это указывает на то, что

молекулы ЖК-440 в полимерной матрице фотохимически стабильны.

Осуществлена запись полутонковых изображений на ЖК-440 с большим числом градаций (рис. 8).



Рис. 8. Фотография полутонкового изображения, записанного в слое ЖК-440Д

Для получения полной физической картины обнаруженных явлений необходимо провести ряд дополнительных исследований, в частности таких как выяснение поляризационной картины в поперечном сечении рассеянного излучения и ее сравнительной структуры при ориентации ЖК на анизотропно фотоструктурированных поверхностях без микрорельефа, впервые обнаруженных в 1990 г. В. Козенковым и названным впоследствии методом фотоориентации [24].

#### Заключение

Впервые осуществлена запись полутонковых изображений на ЖК с большим числом градаций.

Предложен механизм фотохимических процессов в слоях ЖК, приводящих к образованию в слое продуктов реакции, влияющих на ориентационный порядок ЖК как целого.

Обнаружено, что эффект фотоиндуцированного двулучепреломления в слое смеси ЖК сохраняется в течение десятков часов, тогда как голографические ДР с периодом около 5 мкм, записанные в таком слое, исчезают через несколько секунд.

Обратимый фазовый переход нематик — изотропная жидкость ЖК-ячейки на основе смеси производных азоксибензола с механической ориентацией ЖК одновременно сопровождается обратимым эффектом фотоиндуцированного светорассеяния.

Исходно изотропные пленки полиметилметакрилата с растворенной в них на молекулярном уровне смесью производных азоксибензола

проявляют обратимый эффект фотоиндуцированного двулучепреломления.

Для получения полной физической картины обнаруженных явлений необходимо провести ряд дополнительных исследований, в частности таких как выяснение поляризационной картины в поперечном сечении рассеянного излучения и ее сравнительной структуры при ориентации ЖК на анизотропно фотоструктурированных поверхностях без микрорельефа, впервые полученных методом фотоориентации.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 15-37-20441, грант № 14-07-31327, грант № 14-47-03608 и Министерства образования Московской области, стипендия Президента Российской Федерации СП-2767.2015.5.*

#### Список литературы / References

1. Аракелян С. М., Чилингарян Ю. С. Нелинейная оптика жидких кристаллов. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1984. 360 с. [Arakelyan S.M., Chilingaryan Y.S. Nonlinear optics of liquid crystals. M: Science, Home edition of Physical and Mathematical Literature, 1984, 360 p. (in Russian)].
2. Золотко А. С. Оптическая анизотропия жидких кристаллов: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва, 2015. 218 с. [Zolot'ko A.S. Optical anisotropy of liquid crystals: Doctoral Thesis (Phys. Mathem.). Moscow, 2015. 218 p. (in Russian)].
3. Herman R.M., Serinko R.J. Nonlinear-optical processes in nematic liquid crystals near Freedericksz transition. *Phys. Rev. A.*, 1979, **19**, 1757–1769.
4. Зельдович Б. Я., Пилипецкий Н. Ф., Сухов А. В., Табирян Н. В. Гигантская оптическая нелинейность в мезофазе НЖК // *Письма в ЖЭТФ*. 1980. Т. 31, № 5. С. 287–292 [Zel'dovich B.Ya., Pilipetskiy N.F., Sukhov A.V., Tabiryan N.V. Giant optical nonlinearity in the mesophase of nematic liquid crystal (NLC). *JETP Letters*, 1980, **31** (5), 263–267].
5. Золотко А. С., Китаева В. Ф., Кроо Н., Соболев Н. Н., Чиллаг Л. Влияние поля световой волны на нематическую фазу жидкого кристалла ОЦБФ // *Письма в ЖЭТФ*. 1980. Т. 32, № 2. С. 170–174 [Zolot'ko A.S., Kitaeva V.F., Kroo N., Sobolev N.N., Chillag L. The effect of an optical field on the nematic phase of a liquid crystal OCBP. *JETP Lett.*, 1980, **32** (2), 158–162].
6. Зельдович Б. Я., Табирян Н. В. Ориентационная оптическая нелинейность ЖК // *УФН*. 1985. Т. 147, вып. 4. С. 633–674 [Zel'dovich B.Ya., Tabiryan N.V. Orientational optical nonlinearity of liquid crystals. *Soviet Physics Uspekhi*, 1985, **28** (12), 1059–1083. DOI: 10.1070/PU1985v028n12ABEH003985].
7. Tabiryan N.V., Sukhov A.V., Zel'dovich B.Ya. Orientational optical nonlinearity of LCs. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 1986, **136**, 1–139.
8. Janossy I., Lloyd A.D., Wherrett B.S. Anomalous optical Freedericksz transition in an absorbing liquid crystal. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 1990, **179** (1), 1–12. DOI: 10.1080/00268949008055354
9. Janossy I., Csillag L., Lloyd A.D. Temperature dependence of the optical Freedericksz transition in dyed nematic liquid crystals. *Phys. Rev. A.*, 1991, **44**, 8410–8413.
10. Janossy I., Lloyd A.D. Low-power optical reorientation in dyed nematics. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 1991, **202**, 77–84.
11. Janossy I., Kosa T. Influence of anthraquinone dyes on optical reorientation of nematics liquid crystals. *Opt. Lett.*, 1992, **17**, 1183–1185.
12. Козенков В. М., Катышев Е. Г., Минченко Н. Е., Шулев Ю. В., Барачевский В. А. Оптическая запись изображений в слоях жидких кристаллов // IV Всесоюзная конференция «Бессеребряные и необычные фотографические процессы»: Тез. докл. Черноголовка (Суздаль), 1984. Т. 1, ч. 2. С. 290–291 [Kozenkov V.M., Katyshev E.G., Minchenko N.E., Shulev Yu.V., Barachevskiy V.A. Optical recording of images in layers of liquid crystals. All-Union Conference "Non-silver photographic processes and unusual": Abstracts. Chernogolovka (Suzdal), 1984, **1** (2), 290–291 (in Russian)].
13. Одулов С. Г., Резников Ю. А., Сарбей О. Г., Соскин М. С., Фролова Е. К., Хижняк А. И. Динамические голографические решетки в мезофазе нематического жидкого кристалла // *Укр. физ. журн.* 1980. Т. 25, № 11. С. 1922–1924 [Odulov S.G., Reznikov Yu.A., Sarbey O.G., Soskin M.S., Frolova E.K., Khizhnyak A.I. Dynamic holographic gratings in the mesophase NLC. *Ukr. J. Phys.*, 1980, **25** (11), 1922–1924 (in Russian)].
14. Одулов С. Г., Резников Ю. А., Соскин М. С., Хижняк А. И. Поляризационная запись динамических голографических решеток в мезофазе жидкого кристалла МББА // *ДАН СССР*. 1982. Т. 263, № 3. С. 598–601 [Odulov S.G., Reznikov Yu.A., Soskin M.S., Khizhnyak A.I. Recording dynamic polarization holographic gratings in the mesophase liquid crystal MBBA. *Soviet Physics Doklady*, 1982, **263** (3), 598–601 (in Russian)].
15. Stapert H.R., Vertegen E.J.K., del Valle S., van der Zande B.M.I., Lub J., Stallinga S. Photo replicated anisotropic liquid-crystalline lenses for aberration control and dual-layer readout of optical disks. *Adv. Funct. Mater.*, 2003, **13** (9), 732–738. DOI: 10.1002/adfm.200304385.

16. Барник М. И., Блинов Л. М., Гребенкин М. Ф., Пикин С. А., Чигринов В. Г. ЭГД неустойчивость в нематических жидких кристаллах // *ЖЭТФ*. 1975. Т. 69, вып. 3. С. 1080–1087 [Barnik M.I., Blinov L.M., Grebenkin M.F., Pikin S.A., Chigrinov V.G. Electrohydrodynamic instability in nematic liquid crystals. *JETP*, 1975, **42** (3), 550–553].
17. Барник М. И., Беляев С. В., Гребенкин М. Ф., Румянцев В. И., Селиверстов В. А., Цветков В. А. Электрические, оптические и вязкоупругие свойства жидкокристаллической смеси азоксисоединений // *Кристаллография*. 1978. Т. 23. С. 805–810 [Barnik M.I., Belyaev S.V., Grebenkin M.F., Rummyantsev V.I., Seliverstov V.A., Tsvetkov V.A. Electrical, optical and viscoelastic properties of the azoxy liquid crystal mixture. *Kristallografiya = Soviet Physics. Crystallography*, 1978, **23**, 805–810 (in Russian)].
18. Цветков В. Н., Рюмцев Е. И., Коломиец И. П., Ковшик А. П., Ганцева Н. Л. Анизотропия молярной рефракции жидкокристаллических п,п'-диалкоксиазоксибензолов // *Оптика и спектроскопия*. 1973. Т. 35. С. 880–883 [Tsvetkov V.N., Ruyumtsev E.I., Kolomiets I.P., Kovshik A.P., Gantseva N.L. Molar refraction anisotropy of liquid crystal of n, n'-dialkoxiazoxibenzenes. *Optika i spektroskopiya = Optics and Spectroscopy*, 1973, **35**, 880–883 (in Russian)].
19. Aronzon D., Levy E.P., Collings P.J., Chanishvili A., Chilaya G., Petriashvili G. *Trans-cis* isomerization of an azoxybenzene liquid crystal. *Liquid Crystals*, 2007, **34**, 707–718.
20. Вистинь Л. К. Новое электроструктурное явление в жидких кристаллах нематического типа // *ДАН СССР*. 1970. Т. 194. С. 1318–1321 [Vistin' L.K. New electro structural phenomenon in nematic liquid crystals. *DAN SSSR = Reports of the Academy of Sciences of the USSR*, 1970, **194**, 1318–1321 (in Russian)].
21. Теренин А. Н. Фотоника молекул красителей и родственных органических соединений. Л.: Наука, 1967. 616 с. [Terenin A.N. Photonics dye molecules and related organic compounds. Leningrad: Science, 1967, 616 p. (in Russian)].
22. Fedorenko D., Ouskova E., Reshetnyak V., Reznikov Yu. Evolution of light-induced anchoring in dye-doped nematics: Experiment and model. *Phys. Rev. E*, 2006, **73**, 031701(8). DOI: 10.1103/PhysRevE.73.031701.
23. Fedorenko D., Slyusarenko K., Ouskova E., Reshetnyak V., KiRyong Ha., Karapinar R., Reznikov Yu. Light-induced gliding of the easy orientation axis of a dye-doped nematic liquid crystal. *Phys. Rev. E*, 2008, **77**, 061705(9). DOI: 10.1103/PhysRevE.77.061705.
24. Дядюша А. В., Козенков В. М., Марусий Т. Я., Хижняк А. И. Свойства слоев НЖК, планарно ориентированных анизотропной поверхностью без микрорельефа // Тезисы 11 Всесоюзного семинара «Оптика жидких кристаллов». Красноярск, 1990. С. 130. [Dyadyusha A.V., Kozenkov V.M., Marusiy T.Ya., Khizhnyak A.I. Layer Properties NLC planar oriented anisotropic surface without microrelief. 11 All-Union Workshop «Optics of liquid crystals». Krasnoyarsk, 1990. P. 130 (in Russian)].

Поступила в редакцию 27.08.2015 г.  
Received 27 August, 2015