

УДК 539.6, 532.783.544.4

Г. М. Жаркова¹, В. П. Фомичев¹, О. Ю. Подъячева²

**ФОРМИРОВАНИЕ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ПОЛИМЕРНО-ДИСПЕРСНЫХ
НЕМАТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ, ДОПИРОВАННЫХ АЗОТСОДЕРЖАЩИМИ
УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ**

¹Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича,
ул. Институтская, 4/1, 630090 Новосибирск, Россия. E-mail: zharkova@itam.ns.ru

²Институт катализа им. Г. К. Борескова,
пр-т Акад. Лаврентьева, 5, 630090 Новосибирск, Россия

В работе представлены результаты исследований влияния слабых магнитных полей при формировании полимерно-дисперсных нематических жидких кристаллов, допированных азотсодержащими углеродными нанотрубками. Получены данные по влиянию концентрации азотсодержащих нанотрубок и силы магнитного поля на электрооптические характеристики пленок. Показано, что присутствие в азотсодержащих нанотрубках примесей железа (до 4 вес. %) при формировании пленки в слабом магнитном поле (до 0,13 Тл) увеличивает светопропускание пленки ~ в 2 раза (до 77 %), при этом время оптического отклика снижается также в 2 раза (до 5,1 мс).

Ключевые слова: полимерно-дисперсные жидкие кристаллы, углеродные нанотрубки, магнитное поле.

DOI: 10.18083/LCAppl.2019.3.51

G. M. Zharkova¹, V. P. Fomichev¹, O. Yu. Podyacheva²

**FORMATION OF POLYMER-DISPERSED NEMATIC LIQUID CRYSTALS DOPED
BY NITROGEN-CONTAINING CARBON NANOTUBES IN MAGNETIC FIELD**

¹Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics,
4/1 Institutskaya St., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: zharkova@itam.ns.ru

²Boreskov Institute of Catalysis,
5 Acad. Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia

The paper presents results on the influence of weak magnetic fields at the formation of polymer-dispersed nematic liquid crystals doped with nitrogen-containing carbon nanotubes. The effect of the concentration of nitrogen-containing nanotubes and the magnetic field strength on electro-optical characteristics of films is described. It is shown that the presence of iron impurities (up to 4 wt. %) in nitrogen-containing carbon nanotubes during film formation in a weak magnetic field (up to 0.13 T) increases light transmission of film by 2 times (till 77 %), while the optical response time decreases also by 2 times (till 5,1 ms).

Key words: polymer-dispersed liquid crystals, carbon nanotubes, magnetic field.

Введение

Разработка новых полимерно-жидкокристаллических композитов (PDLC) на основе нематических жидких кристаллов с управляемыми функциональными свойствами представляет интерес при создании современных устройств для фотоники и сенсорной техники. PDLC представляют собой полимерные пленки, содержащие капли нематических жидких кристаллов [1–2]. И хотя при капсулировании жидких кристаллов (ЖК) в полимерную матрицу их основные оптические свойства сохраняются, существует проблема повышения управляющих полей, изменения времени оптического отклика, снижения контраста при переориентации молекул жидких кристаллов в полимерной матрице в электрическом поле по сравнению с чистыми жидкими кристаллами.

Функциональные параметры PDLC определяются как свойствами полимера и жидких кристаллов, так и исходной ориентацией нематических жидких кристаллов (НЖК) в полимерной матрице. Поэтому разработка новых материалов для отображения оптической информации ведется по двум направлениям: разработка новых жидкокристаллических составов и совершенствование технологий формирования PDLC, определяющих ориентацию жидких кристаллов в пленках.

Разработка композитных материалов на основе известных НЖК, модифицированных различными нанодобавками, является перспективным методом при создании новых материалов, который по сравнению с традиционным химическим синтезом новых жидких кристаллов является менее трудоемким и более дешевым способом [3]. В последние годы появилось большое число работ, посвященных допированию полимерно-дисперсных жидких кристаллов различными наночастицами: неорганическими и органическими. Неорганические наночастицы, введенные в состав PDLC, изменяют физические свойства жидких кристаллов и полимерной матрицы, что влияет на их электрооптические свойства [4–9].

Особый интерес представляют углеродные наноматериалы различной структуры, такие как углеродные нановолокна, одностенные или многостенные нанотрубки [10–11]. Известно, что углеродные нанотрубки, подобно жидким кристаллам, обладают анизотропными физическими свойствами. Введение в состав PDLC простых или химически модифицированных нанотрубок приводит к

уменьшению порогового напряжения и напряжения насыщения пленок по сравнению с материалом без добавки [12–15]. Связано это с тем, что углеродные нанотрубки могут усиливать электрическое поле, уменьшая удельное сопротивление среды и увеличивая емкость элементов.

Увеличение порогового напряжения и порога насыщения PDLC по сравнению с чистыми жидкими кристаллами объясняется сильным взаимодействием кристаллов и полимера на границе их раздела, а также исходной ориентацией кристаллов в пленке. Необходимо затратить определенную энергию, чтобы преодолеть их взаимодействие. Существуют методы, позволяющие изменять ориентацию ЖК на границе подложки, на которую они нанесены [16–18]. Для изменения исходной ориентации жидких кристаллов на поверхности подложки применяются метод натирания, ориентирующие химические добавки или фотоориентация. Предложено также использовать магнитное поле при формировании пленок [19–20]. При формировании PDLC ориентация оптических осей капель НЖК неоднородная, и чтобы их упорядочить, пленки PDLC формируют в магнитных полях. Исследование влияния слабых магнитных полей разной направленности на характеристики PDLC выполнено в [21]. Показано, что формирование пленок в магнитном поле разной направленности приводит к изменению текстуры жидких кристаллов в каплях полимерной матрицы и изменению их электрооптических свойств. Получено, что пленки, сформированные в магнитных полях, характеризуются незначительным повышением порогового напряжения и светопропускания, а также понижением времен оптического отклика по сравнению с образцом, сформированным без поля.

Чтобы усилить влияние магнитного поля на ориентацию жидких кристаллов, в состав композиции вводятся частицы, характеризующиеся высокой магнитной восприимчивостью. Выполнено большое количество исследований, посвященных исследованию дисперсий НЖК, содержащих различные ферромагнитные частицы [22]. Обзор выполненных исследований приводится в [23]. Под влиянием внешнего магнитного поля дипольные моменты магнитных наночастиц ориентируются вдоль силовых линий магнитного поля. Благодаря механической связи между ЖК и магнитными частицами происходит также переориентация и жидких кристаллов.

Допирование нематиков магнитными частицами приводит к сильному изменению их свойств: увеличиваются двойное лучепреломление и диэлектрическая анизотропия. В результате такие дисперсии приобретают чувствительность к магнитным полям. И хотя физика взаимодействия ферромагнитных наночастиц с НЖК понятна, то поведение их в более сложной среде, PDLC, остается не до конца исследованным. Связано это с неизвестными данными о смешиваемости всех составляющих компонентов друг с другом, ролью размера частиц, их агрегированием.

Нами ранее были исследованы пленки PDLC, допированные азотсодержащими углеродными нанотрубками (N-МУНТ). Введение азота в структуру нанотрубок облегчало их смешиваемость с раствором НЖК и полимера, что приводило к улучшению функциональных характеристик пленок, сформированных на их основе [14, 24]. Особенностью углеродных наноматериалов, в том числе и N-МУНТ, выращенных на Fe-содержащих катализаторах, является присутствие в них остаточного железа, обладающего магнитными свойствами. Следовательно, можно предположить, что пленки, содержащие эти добавки, также будут обладать повышенными магнитными свойствами и магнитным полем можно управлять ориентацией НЖК в пленке. Целью настоящей работы было исследование влияния слабых магнитных полей на формирование и свойства PDLC, допированных азот-содержащими углеродными нанотрубками.

Материалы и техника эксперимента

В работе исследовались пленки полимерно-дисперсных жидких кристаллов, сформированных на основе НЖК, поливинилацетата (ПВА – $n_e = 1,717$), многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ), N-МУНТ и органических растворителей (ацетон, толуол). В качестве НЖК использовался 4-*n*-пентил-4-цианобифенил (5CB) фирмы MERC, показатели преломления которого при комнатной температуре равны $n_e = 1,717$, $n_o = 1,531$, диэлектрическая анизотропия $\epsilon > 0$.

Исследование синтезированных углеродных нанотрубок проводилось методами электронной микроскопии (микроскоп JEM-2010 JEOL), рентгенофазового анализа (дифрактометр HZG-4), рентгенофлуоресцентной спектроскопии (анализатор ARL PERFORM'X с Rh анодом рентгеновской трубки) и рентгеновской электронной спектроскопии, РФЭС (фотоэлектронный спектрометр KRATOS Analytical).

Светопропускание пленок в электрическом поле измерялось на специальной установке. В качестве источника света использовался полупроводниковый лазер KLM-650/80, фотоприемник ФЭУ-83, а для фиксации подаваемого на образец электрического поля и одновременной регистрации оптического отклика – двухканальный осциллограф «Tektronix» TDS1012B. На образец подавался импульс электрического поля с генератора импульсов Г5-56. При анализе осциллограмм измерялись пороговые напряжения, времена включения ($\tau_{\text{вкл}}$) и выключения ($\tau_{\text{выкл}}$), соответствующие 0,1 от величины максимального пропускания света пленкой при подаче электрического импульса и его отключения. Полное время отклика образца равно сумме $\tau_{\text{вкл}} + \tau_{\text{выкл}}$.

Для ориентации НЖК в PDLC использовались постоянные синтетические магниты, изготовленные с применением неодима. Магниты были выполнены в виде пластинок размером 205x60x10 мм и 40x16x4 мм. На рис. 1 представлены два магнита, использованные в работе. Рабочая зона для формирования пленки выбиралась в центре плоскости магнитов диаметром 5 мм. На рисунке она помечена как РЗ. В этой области измерялась величина магнитной индукции B с помощью датчиков Холла. У большого магнита (рис. 1, а) в рабочей зоне $B = 0,13$ Тл. Второй магнит был собран из четырех пластинок с размером плоскости 40x16 мм, соединенных между собой магнитным притяжением (рис. 1, б). Это увеличивало величину магнитной индукции в РЗ до значения $B = 0,34$ Тл. Напряженность магнитного поля оставалась практически постоянной в РЗ на расстоянии до 4 мм от поверхности магнитов.

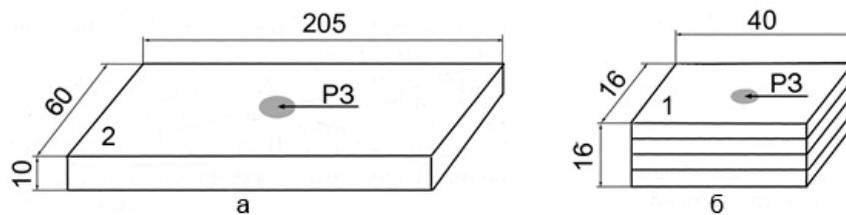


Рис. 1. Постоянные магниты (размеры, мм)

Fig. 1. Permanent magnets (dimensions, mm)

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Описание углеродных нанотрубок

Многостенные углеродные нанотрубки и азотсодержащие углеродные нанотрубки были синтезированы разложением этилен или этиленаммиачной смеси на $\text{Fe-Ni-Al}_2\text{O}_3$ (62 % Fe-8 % Ni-30 % Al_2O_3) катализаторе, соответственно [25]. Рентгенофазовый анализ показал, что катализатор представляет собой смесь фаз металлического железа, шпинели $(\text{Fe, Ni}) [\text{Fe, Al}]_2\text{O}_4$ с параметром ячейки $a = 0,8272$ нм и металлического сплава $\gamma - (\text{Fe, Ni})$, при этом основной фазой является металлическое железо.

Синтезированные МУНТ и N-МУНТ обраба-

тывались в концентрированной соляной кислоте при комнатной температуре, а затем в 2М растворе соляной кислоты при 100 °С для удаления частиц катализатора. Исследование отмытых образцов рентгеноспектральным флуоресцентным методом показало наличие остаточного железа в количестве 1 вес. % в МУНТ и 4 вес. % в N-МУНТ вследствие капсулирования частиц катализатора внутри трубок (рис. 2). Межплоскостное расстояние в капсулированных частицах $\sim 0,2$ нм, определенное с помощью Фурье-дифрактограмм, можно отнести к фазе как металлического железа, так и карбида железа Fe_3C , который может образовываться в ходе роста трубок в результате растворения углерода в железе. Содержание азота в N-МУНТ по данным РФЭС составляло 5,9 вес. %.

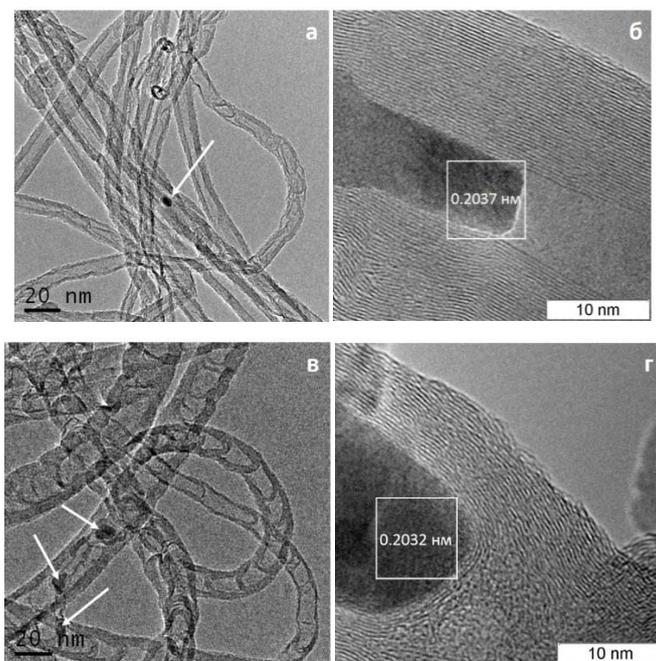


Рис. 2. Микрофотографии МУНТ (а, б) и N-МУНТ (в, г). Стрелками обозначены капсулированные частицы катализатора роста трубок

Fig. 2. TEM images of MWCNTs (a, b) and N-MWCNTs (v, g). Arrows indicate encapsulated catalyst particles

Согласно просвечивающей электронной микроскопии МУНТ формируются преимущественно по типу коаксиально-цилиндрической упаковки графитовых слоев, а N-МУНТ представляют собой бамбукоподобные трубки, состоящие из многостенных трубок с регулярными внутренними многослойными перегородками.

Приготовление образцов полимерно-дисперсных пленок и исследование их электрооптических свойств

Для изготовления образцов готовили 10 %-ный рабочий раствор МУНТ/N-МУНТ-растворитель (ацетон-толуол 1:1). Методика подробно описана в [14, 24]. Наиболее устойчивые суспензии формировались при концентрации углеродных нанотрубок ниже 0,05 вес. %. Формирование пленки НЖК-полимер-МУНТ/N-МУНТ осуществляли путем фазового разделения состава НЖК-полимер-МУНТ/N-МУНТ-растворитель при испарении органического растворителя. Приготовленный раствор выливался на стеклянную подложку с токопроводящим покрытием. Чтобы сформировать образец с одинаковой исходной ориентацией молекул НЖК в плоскости пленки или придать им направленность с небольшим углом отклонения от поверхности

пленки, высушивание пленки проводили в магнитном поле ортогональной направленности относительно поверхности образца.

Исследовано светопропускание PDLC пленок, отличающихся составом и способом формирования образцов. Выполнено сравнение характеристик пленок, содержащих N-МУНТ при разном содержании углеродной добавки (от 0,01 до 0,05 вес. %) по отношению к содержанию в пленке жидкого кристалла, а также сравнение пленок с МУНТ и N-МУНТ. Применялись разные способы формирования пленки: без применения магнитного поля и в магнитных полях разной интенсивности.

На рисунке 3 приведено сравнение электрооптических характеристик пленок, содержащих добавку МУНТ (рис. 3, кривая 1) или N-МУНТ (рис. 3, кривая 2). Добавка N-МУНТ приводит к заметному повышению интенсивности пропускания света в электрическом поле и снижению порогового напряжения по сравнению с МУНТ. По всей видимости, это происходит из-за лучшей совместимости азотсодержащих углеродных нанотрубок с полимерно-жидкокристаллической смесью благодаря их более высокой влагоемкости и дефектности структуры [24, 25].

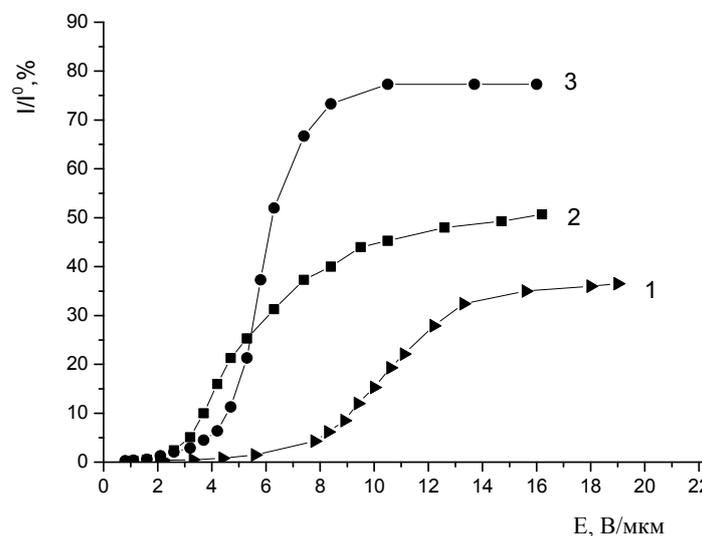


Рис. 3. Зависимость светопропускания света пленками PDLC от типа введенной добавки и напряженности электрического поля: 1 – МУНТ (0,05 %) и 2 – N-МУНТ (0,05 %) (пленки, сформированные в отсутствие магнитного поля); 3 – N-МУНТ (0,05 %) (пленка, сформированная в магнитном поле, 0,13 Тл)

Fig. 3. The dependence of light transmission of PDLC films on additive type and electric field strength: 1 – MWCNTs (0,05 %) and 2 – N-MWCNTs (0,05 %) (films were formed in the absence of magnetic field); 3 – N-MWCNTs (0,05 %) (film was formed in the magnetic field of 0,13 T)

Использование магнитного поля для формирования пленки приводит к значительному увеличению интенсивности пропускания света с 45 до 77 %, при этом пороговое напряжение несколько увеличивается. Наблюдаемый эффект, несомненно, связан с магнитными свойствами остаточных примесей железа, содержащихся в N-МУНТ. Углеродные нанотрубки вследствие присутствия в них железа, обладающего высокой диамагнитной восприимчивостью, выстраиваются вдоль силовых линий приложенного магнитного поля, увлекая за собой молекулы НЖК, тем самым улучшая их па-

раметр порядка. Вместе с тем остаточная намагниченность препятствует дальнейшей переориентации молекул НЖК в электрическом поле, что и приводит к увеличению порогового напряжения.

Увеличение концентрации добавки сопровождается снижением интенсивности пропускания света и повышением порогового напряжения (рис. 4, а). С увеличением напряженности магнитного поля эта закономерность сохраняется (рис. 4, б). Причем общий уровень интенсивности прошедшего света несколько снижается.

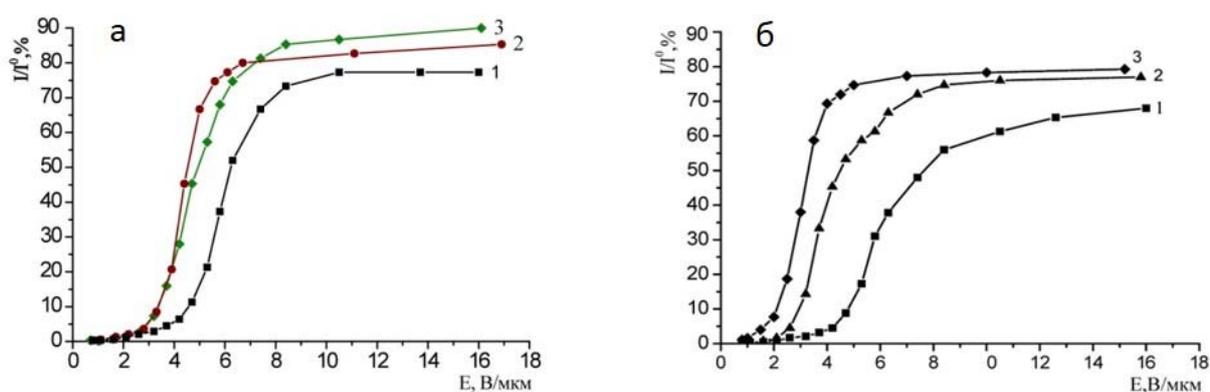


Рис. 4. Влияние концентрации добавки N-МУНТ на светопропускание пленок от напряженности электрического поля: 1 – 0,05 %; 2 – 0,029 %; 3 – 0,01 % N-МУНТ. Пленки сформированы в магнитном поле: а – 0,13 Тл и б – 0,34 Тл

Fig. 4. The effect of N-MWCNTs additive concentration and electric field strength on film light transmission. Concentration of N-MWCNTs: 1 – 0,05; 2 – 0,029; 3 – 0,01 %. The films were formed in magnetic field of: а – 0,13 T and б – 0,34 T

Наличие Fe-содержащих соединений в виде металлического железа или карбида железа в МУНТ и N-МУНТ делают их ферромагнитными материалами. Причем N-МУНТ содержат железа в четыре раза больше, чем МУНТ. Из этого следует, что магнитные свойства N-МУНТ должны быть сильнее выражены, чем МУНТ. Соответственно, пленки, содержащие N-МУНТ и сформированные в магнитном поле, показывают более высокий уровень просветления в электрическом поле по сравнению с пленками с МУНТ. Происходит это вследствие улучшенной исходной ориентации молекул НЖК в полимерных капсулах пленки. Вместе с тем пороговые напряжения пленок несколько повышаются. Можно предположить, что в пленках сохраняется остаточный магнетизм, который затрудняет дальнейшую переориентацию жидких кристаллов вдоль вектора напряженности электрического поля.

Существенным моментом является то, что наибольший эффект в просветлении наблюдается при низкой концентрации добавки и меньшей величине магнитного поля. При более высоком уровне магнитного поля молекулы НЖК начинают ориентироваться перпендикулярно поверхности пленки. Пленки становятся частично пропускающими свет и при переключении в электрическом поле в полностью прозрачное состояние их контраст уменьшается.

Кроме того, пленки, сформированные в магнитном поле, демонстрируют меньшие значения времен оптического отклика (табл.). Из таблицы следует, что присутствие в пленке примесей железа вызывает снижение времени оптического отклика пленки на электрический импульс и наибольшее снижение наблюдается в пленках с повышенным содержанием железа.

Таблица. Сравнение времен отклика пленок разного состава, сформированных в отсутствие и присутствии магнитного поля

Table. Comparison of response times of different films formed in the absence and presence of a magnetic field

Тип добавки	Условия формирования пленки	$\tau_{\text{вкл}} + \tau_{\text{выкл}}$, мс
0,05 % МУНТ N = 0 вес. %, Fe = 1 вес. %	Без магнита	14
	В магнитном поле 0,13 Тл	11,8
	В магнитном поле 0,34 Тл	12,1
0,05 % N-МУНТ N = 5,9 вес. %, Fe = 4 вес. %	Без магнита	9,7
	В магнитном поле 0,13 Тл	5,1
	В магнитном поле 0,34 Тл	6,3

Заключение

В работе выполнены исследования влияния слабых магнитных полей на формирование пленочных полимерно-дисперсных нематических жидких кристаллов, допированных азот-содержащими углеродными нанотрубками. В составе углеродных нанотрубок присутствуют примеси железа, что придает сформированным пленкам ферромагнитные свойства. Наличие железа оказывает влияние на исходную текстуру НЖК в полимерной матрице и на их электрооптические свойства при формировании полимерно-жидкокристаллических пленок в магнитном поле. Увеличение концентрации добавки приводит к снижению интенсивности пропускания света и повышению порогового напряжения (рис. 4, а). С увеличением напряженности магнитного поля эта закономерность сохраняется (рис. 4, б).

Показано, что интенсивность пропускания пленок, пороговые напряжения и времена оптического отклика зависят от концентрации присутствующего железа и силы магнитного поля, в котором они формируются. Пропускание пленок, содержащих 4 вес. % железа (с добавками азотсодержащих углеродных нанотрубок) и сформированных в магнитных полях порядка 0,13 Тл, увеличивается до 77 % по сравнению с пленками, содержащими 1 вес. % железа (с добавками углеродных нанотрубок без азота). Одновременно эти пленки характеризуются пониженными временами оптического отклика, достигающими 5,1 мс. Однако наличие остаточного магнетизма в пленках увеличивает пороговое поле переориентации молекул НЖК в электрическом поле до 9 В/мкм. Исследования по совершенствованию магнитного метода формирования полимерно-жидкокристаллических пленок продолжаются в отношении временной стабильности обнаруженных эффектов.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы фундаментальных исследований СО РАН «Междисциплинарные интеграционные исследования» на 2018–2020 гг.

Список литературы / References

1. Жаркова Г. М., Сонин А. С. Жидкокристаллические композиты. Новосибирск : Наука, 1994. 214 с. [Zharkova G.M., Sonin A.S. Liquid crystal composites. Novosibirsk : Nauka, 1994, 214 p. (in Russ.)].
2. Drzaic P.S. Liquid crystal dispersion. Singapore : World Scientific, 1995, 430 p.
3. Liquid crystals with nano and microparticles / edited by Jan P.F. Lagerwall and Giusy Scalia. Singapore, World Scientific, 2017, 920 p.
4. Yaroshchuk O.V., Dolgov L.O., Kiselev A.D. Electro-optics and structural peculiarities of liquid crystal-nanoparticle-polymer composites. *Physical Review E*, 2005, **72**, 051715.
5. Zhdanov K.R., Romanenko A.I., Zharkova G.M., Suslyayev V.I., Zhuravlev V.A. Dielectric permittivity of polymer composites with encapsulated liquid crystals in strong electric fields. *Russian Physics Journal*, 2013, **56** (8), 48–53.
6. Жданов Л. Р., Романенко А. И., Жаркова Г. М. Влияние диэлектрических наночастиц окислов титана, иттрия и кремния на электрооптические характеристики полимерно-дисперсных жидких кристаллов // *Изв. вузов. Сер. Физика*. 2015. Т. 58, № 9. С. 78–83. [Zhdanov L.R., Romanenko A.I., Zharkova G.M. The effect of dielectric nanoparticles of titanium, yttrium and silicon oxides on the electro-optical characteristics of polymer-dispersed liquid crystals. *Izv. universities. Ser. Physics*, 2015, **58** (9), 78–83. (in Russ.)].
7. Жаркова Г. М., Зобов К. В., Романов Н. А., Сызранцев В. В., Бардаханов С. П. Полимерно-жидкокристаллические композиты, допированные нанопорошками неорганических оксидов // *Российские нанотехнологии*. 2015. Т. 10, № 5–6. С. 37–40. [Zharkova G.M., Zobov K.V., Romanov N.A., Syzrantsev V.V., Bardakhonov S.P. Polymer-liquid crystal composites, doped with inorganic oxide nanoparticles // *Russian Nanotechnology*. 2015. T. 10, No 5–6. P. 37–40.]

- hkanov S.P. Polymer-liquid crystal composites doped with nanopowders of inorganic oxides. *Russian Nanotechnologies*, 2015, **10** (5–6), 37–40. (in Russ.).
8. Zobov K.V., Zharkova G.M., Syzrantsev V.V. Effect of dopant nanoparticles on the orientation process in polymer-dispersed liquid crystals. *EPL*, 2016, **113**, 24001-p1-p5. DOI: 10.1209/0295-5075/113/24001.
 9. Жаркова Г. М., Осипов В. В., Платонов В. В., Подкин А. В., Стрельцов С. А. Исследование влияния наночастиц оксида иттрия, легированных церием и неодимом, на электрооптику полимерно-жидкокристаллических композитов // *Изв. вузов. Сер. Физика*, 2016. Т. 59, № 8. С. 153–158. [Zharkova G.M., Strel'tsov S.A., Osipov V.V., Platonov V.V., Podkin A.V. Investigation of the Effect of Yttrium Oxide Nanoparticles Doped with Cerium and Neodymium on Electro-Optics of Liquid Crystal Polymer Composites. *Russian Physics Journal*, 2016, **59** (8), 1295–1301].
 10. Lagerwall J.P.F., Scalia G. Carbon nanotubes in liquid crystals. *J. Mater. Chem.*, 2008, **18** (25), 2890–2898. DOI: 10.1039/b802707b.
 11. Dierking I., Scalia G., Morales P. Liquid crystal–carbon nanotube dispersions. *J. Appl. Phys.*, 2005, **97** (4), 044309-1–044309-5. DOI: 10.1063/1.1850606.
 12. De Filpo G., Siprova S., Chidichimo G., Mashin A.I., Nicoletta F.P., Cupelli D. Alignment of single-walled carbon nanotubes in polymer dispersed liquid crystals. *Liquid Crystals*, 2012, **39** (3), 359–364.
 13. Жаркова Г. М., Стрельцов С. А., Подъячева О. Ю., Квон Р. И., Исмагилов З. Р. Полимерно-дисперсные жидкие кристаллы, допированные углеродными нановолокнами // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2013. Вып. 3. С. 53–62. [Zharkova G.M., Strel'sov S.A., Podyacheva O.Yu., Kvon R.I., Ismagilov Z.R. Polymer dispersed liquid crystals doped by carbon nanofibers. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2013, 3, 53–62. (in Russ.)].
 14. Подъячева О. Ю., Матус Е. В., Субоч А. Н., Жаркова Г. М. Оптические свойства полимерно-дисперсных жидкокристаллических композитов, допированных углеродными нанотрубками // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2018. Т. 18, № 3. С. 53–58. [Podyacheva O.Yu., Matus E.V., Suboch A.N., Zharkova G.M. Optical properties of polymer dispersed liquid crystalline composites doped by carbon nanotubes. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2018, **18** (3), 53–58. (in Russ.). DOI: 10.18083/LCAppl.2018.3.53].
 15. Jong Wu, Hui Cao, Manyu Duan, Erli Li, Huihui Wang, Zhou Yang. Effects of chemically modified multiwall carbon nanotubes on electro-optical properties of PDLC films. *Liquid Crystals*, 2018, **45** (7), 1–19.
 16. Матвеев В. Н., Кирсанов Е. А. Поверхностные явления в жидких кристаллах. М.: Изд-во МГУ, 1991. 272 с. [Matveenko V.N., Kirsanov E.A. Surface phenomena in liquid crystals. M.: Publishing House of Moscow State University, 1991, 272 p. (in Russ.)].
 17. Chigrinov V., Kozinkov V., Kwon H.S. Photoalignment of liquid crystalline materials. John Wiley@ Sons, 2006, 232 p.
 18. Yarovshuk O., Reznikov Y. Photoalignment of liquid crystals: basics and current trends. *Journal of Materials Chemistry*, 2012, **22**, 286–300.
 19. Margerum J.D., Lackner A.M., Ramos E., Lim K-C., Smith W. H. Jr. Effects of off-state alignment in polymer dispersed liquid crystals. *Liquid Crystals*, 1989, **5** (5), 1477–1487. DOI: 10.1080/02678298908027785.
 20. Назаров В. Г., Паршин А. М. Равновесные структуры в каплях нематика, капсулированных полимером по растворной технологии в магнитном поле // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2007. Вып. 3. С. 92–99. [Nazarov V.G., Parshin A.M. Equilibrium structures in nematic droplets encapsulated by polymer using the solution technique combined with magnetic field. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2007, 3, 92–99. (in Russ.)].
 21. Жаркова Г. М., Фомичев В. П. Светопропускание полимерно-дисперсных жидких кристаллов сформированных в слабых магнитных полях // *Сибирский физический журнал*. 2018. Т. 13, № 3. С. 47–54. [Zharkova G.M., Fomichev V.P. Light transmittance of polymer-dispersed liquid crystals formed in weak magnetic fields. *Siberian physics journal*, 2018, **13** (3), 47–54. (in Russ.). DOI: 10.25205/2541-9447-2018-13-3-47-54].
 22. Ahmad A.F., Jamil V., Lee J.W., Jeon J. Magnetically driven vertical alignment of liquid crystals by ferromagnetic particles. *Liquid Crystals*, 2015, **42** (2), 233–249. DOI: 10.1080/02678292.2014.981603.
 23. Reznikov Yu., Glushchenko A., Garbovskiy Yu. Ferromagnetic and ferroelectric nanoparticles in liquid crystals. *Liquid crystals with nano and microparticles* / ed. by Jan P.F. Lagerwall, Giusy Scalia. Singapore, World Scietific, 2017, 658–593.
 24. Подъячева О. Ю., Матус Е. В., Субоч А. Н., Жаркова Г. М. Исследование закономерностей формирования полимерно-дисперсных жидкокристаллических материалов, допированных углеродными нанотрубками // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2018. Т. 18, № 3. С. 82–88. [Podyacheva O.Yu., Matus E.V., Suboch A.N., Zharkova G.M. Regularities of formation of polymer-dispersed liquid crystal materials doped with carbon nanotubes. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2018, **18** (3), 82–88. (in Russ.). DOI: 10.18083/LCAppl.2018.3.82].
 25. Suboch A.N., Cherepanova S.V., Kibis L.S., Svintsitskiy D.A., Stonkus O.A., Boronin A.I., Chesnokov V.V., Romanenko A.I., Ismagilov Z.R., Podyacheva O.Yu. Observation of the superstructural diffraction peak in the nitrogen doped carbon nanotubes: simulation of the structure. *Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 2016, **24**, 520–530. DOI: 10.1080/1536383X.2016.1198331.

Поступила в редакцию 16.07.2019 г.
Received 16 July 2019