

УДК 532.783:535.421

Влияние наночастиц оксида иттрия на диэлектрические свойства и динамику формирования голографических полимерно- жидкокристаллических композитов

© 2020 г. **Г. М. ЖАРКОВА***, ДОКТОР ТЕХН. НАУК; **С. А. СТРЕЛЬЦОВ****, КАНД. ТЕХН. НАУК

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск

**Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

E-mail: zharkova@itam.nsc.ru

Поступила в редакцию 09.07.2019

DOI:10.17586/1023-5086-2020-87-01-30-36

Рассмотрены электрооптические свойства высокоструктурированных полимерно-жидкокристаллических композитов на основе акрилатного мономера и жидкого кристалла Е7, допированных наночастицами Y_2O_3 . Показано влияние наночастиц на дифракционную эффективность, управляющее электрическое поле, диэлектрические свойства и динамику формирования голографических и поляризационных голографических дифракционных решеток, записанных в полимерно-жидкокристаллических композитах. Дифракционная эффективность допированных голографических дифракционных решеток уменьшается, а поляризационных дифракционных решеток возрастает. Допирование наночастицами приводит к уменьшению управляющих напряжений, увеличивает время формирования и диэлектрическую постоянную высокоструктурированных полимерно-жидкокристаллических композитов.

Ключевые слова: голография, дифракционные решетки, наночастицы, жидкокристаллические композиты.

Коды OCIS: 090.0090, 090.7330

ВВЕДЕНИЕ

Разработка и создание новой элементной базы оптоэлектроники на основе высокоструктурированных полимерно-жидкокристаллических (ЖК) композитов являются актуальной задачей. Связано это с тем, что такие материалы обладают уникальными физическими свойствами, которыми можно управлять тепловыми и электрическими полями. Жидкокристаллические композиты представляют собой полимерную матрицу, в объеме которой диспергированы капсулы нематических жидких кристаллов (НЖК). Они сочетают в себе полезные свойства полимеров (механическую прочность, стабильность, гибкость, невысокую стоимость) с уникальными физическими свойствами жидких кристаллов (анизотропия оптических и диэлектрических свойств).

К высокоструктурированным ЖК композитам можно отнести композиты на основе светоотверждаемых полимеров, сформированных методами

оптической голографии. Эти материалы проявляют свойства голографических дифракционных решеток (ГДР) или поляризационных голографических дифракционных решеток (ПГДР). Они, благодаря их оптически активным свойствам, могут быть использованы для создания высокофункциональных оптических устройств, таких как модуляторы света, затворы, поляризационные мультиплексоры и демультиплексоры, разветвители излучения, оптические фильтры [1–6].

При записи ГДР и ПГДР формируется среда с развитой поверхностью межфазных границ. Это приводит к повышению напряженности управляющего электрического поля, необходимого для переориентации молекул НЖК по сравнению с чистыми¹ НЖК. Поэтому ведутся поиски методов, улучшающих функциональные свойства композитов.

¹ Нематические жидккие кристаллы, не содержащие наночастиц и не заключенные в полимерную матрицу.

Известно о влиянии различного рода немезогенных наночастиц (НЧ) и на свойства НЖК-структур [7], и на свойства ЖК композитов [8–13]. В частности приводятся данные об изменении электрооптических свойств композита при введении в его состав оксидов различных элементов, обладающих высокими значениями диэлектрической проницаемости. Их применение основано на изменении диэлектрических свойств НЖК и полимерной матрицы под влиянием НЧ.

Особый интерес вызывают оксиды редкоземельных элементов — иттриевой и цериевой групп. Они обладают высокими показателем преломления и прозрачностью в области длин волн 0,3–3 мкм, высокой диэлектрической проницаемостью, термической устойчивостью и не меняют своих свойств при длительном хранении [14]. Известно влияние частиц лантаноидов, таких как церий, празеодим, самарий на электрооптические свойства ЖК мезофазы [15].

В работе изучалось влияние НЧ Y_2O_3 на электрооптические характеристики ГДР и ПГДР, опираясь на предварительные исследования по допированию ЖК композитов НЧ [16]. При этом остался открытым вопрос о причинах такого влияния допирующих добавок на электрооптические свойства высокоструктурированных полимерно-жидкокристаллических композитов. Высказывалась лишь гипотеза о возможном влиянии добавок на диэлектрические свойства композита и на динамику фазового разделения при формировании композита.

Поэтому целью данной работы являлось изучение диэлектрических свойств и динамики формирования высокоструктурированных полимерно-жидкокристаллических композитов, допированных НЧ Y_2O_3 .

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

При формировании ГДР и ПГДР использовалась композиция, которая включала мономер пентаглутарил тетраакрилат (показатель преломления $n_p = 1,49$), НЖК E7 ($n_o = 1,521$, $n_e = 1,746$, диэлектрические проницаемости $\epsilon_{\parallel} = 19,0$, $\epsilon_{\perp} = 5,2$, $\Delta\epsilon > 0$, температура фазового перехода НЖК в изотропную жидкость $T_{NI} = 61$ °С), связующий компонент, а также фотоинициирующую систему, содержащую краситель и соинициатор. Красителем служил метиленовый голубой, а соинициатором — *N*-фенилглицин. Концентрация НЖК в исходной композиции составляла 37 масс %, концентрация красителя — 0,3 масс %.

В качестве добавок применялись НЧ Y_2O_3 ($n = 1,935$, $\epsilon \approx 15$, средний диаметр 34 нм). Способ получения НЧ описан в работе [17]. Их содержание в композиции не превышало 1 масс %. Введение в состав композита большего количества НЧ при-

водит к их агрегированию и не позволяет добиться однородности их распределения в объеме ЖК композита, что заметно ухудшает его оптические свойства. Исходная смесь реагентов с НЧ тщательно перемешивалась механически и с помощью ультразвуковой обработки до получения гомогенного состояния. Исследуемые образцы представляли собой ячейку, состоящую из двух стекол с токопроводящим покрытием из оксидов индия In_2O_3 и олова SnO_2 (ITO), между которых формировался ЖК композит. Токопроводящие покрытия играли роль обкладок измерительного конденсатора при диэлектрических измерениях, а композит — диэлектрика. Полученный раствор методом полива наносился на одну из стеклянных поверхностей, а затем накрывался второй. Толщина композита составляла 20 мкм и контролировалась спейсарами.

В работе для формирования решеток использовался метод фотополимеризации. Поляризационные голограммические дифракционные решетки формировались при освещении ячеек светом, представляющим суперпозицию двух когерентных волн равной интенсивности (длина волны излучения $\lambda = 658$ нм) с взаимно ортогональными поляризациями. Угол схождения интерферирующих волн составлял 1,4°.

При записи ГДР интерферирующие когерентные волны имели одинаковую линейную поляризацию. Угол схождения волн составлял 28°.

Для изучения динамики формирования высокоструктурированных полимерно-жидкокристаллических композитов, допированных НЧ Y_2O_3 ,

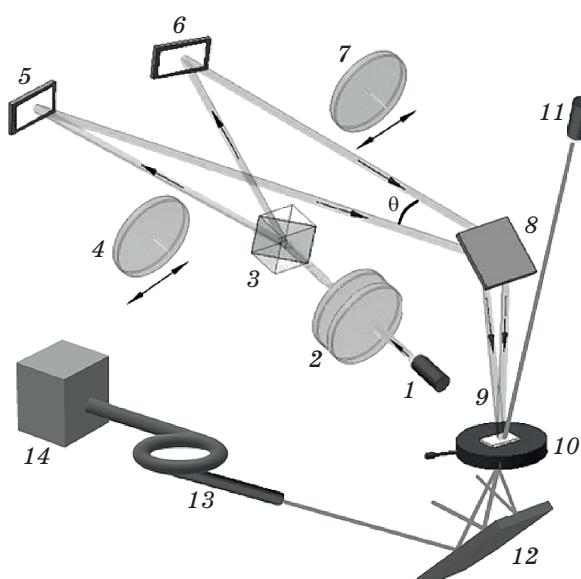


Рис. 1. Экспериментальная установка для записи голограммических решеток. 1 — лазер ($\lambda = 658$ нм), 2 — телескопическая система, 3 — призма Волластона, 4, 7 — пластины $\lambda/2$ ($\lambda/4$), 5, 6, 8, 12 — зеркала, 9 — образец, 10 — столик, 11 — лазер ($\lambda = 532$ нм), 13 — оптическое волокно, 14 — спектрофотометр.

в схему записи ГДР и ПГДР включался полупроводниковый лазер с $\lambda = 532$ нм, дифрагировавшее излучение которого на формируемых решетках регистрировалось спектрофотометром (рис. 1). Диэлектрические проницаемости ГДР и ПГДР определялись как отношение $\epsilon = C/C_0$, где C — емкость экспериментальной ячейки с композитом, C_0 — емкость этой же ячейки, заполненной воздухом.

Емкость экспериментальных ячеек измерялась на цифровом измерителе LRC AM-3123 в режиме параллельной эквивалентной схемы замещения. Все измерения проводились при комнатной температуре.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние электрического поля на дифракционную эффективность решеток

Под влиянием светового поля, представляющего собой суперпозицию двух когерентных волн равной интенсивности и одинаковой поляризации, в исходной композиции происходит разделение фаз НЖК — полимер, вызванное фотополимеризацией мономера. Фазовое разделение сопровождается диффузией компонентов смеси из светлых полос интерференционной картины в темные. В результате формируется упорядоченная структура, представляющая собой чередующиеся полосы, обогащенные капсулами НЖК или полимером с периодической модуляцией показателя преломления (ГДР) (рис. 2а). Если используется свет, представляющий собой суперпозицию интерферирующих лучей равной интенсивности с взаимно ортогональной поляризацией, то в процессе формирования структуры материала диффузия компонентов отсутствует. Формируется структура, в которой капсулы НЖК равномерно распределены в объеме полимера, а молекулы НЖК в капсулах имеют периодически повторяющуюся ориентацию, вызывая модуляцию коэффициента рефракции. Таким образом образуется ПГДР (рис. 2б).

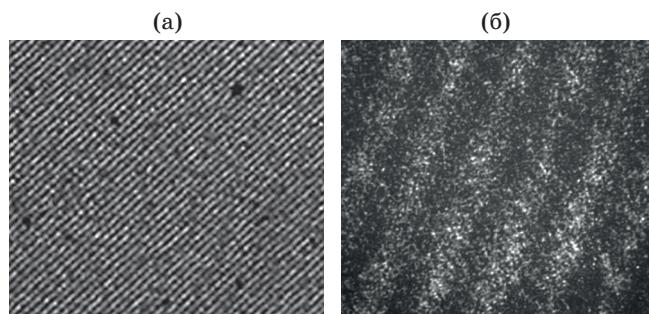


Рис. 2. Фотографии ГДР (а) и ПГДР (б).

Дифракционная эффективность (ДЭ) решеток зависит от многих факторов, в том числе от соотношения показателей преломления на границе раздела полимерная матрица — НЖК, степени разделения фаз компонентов в исходной композиции, размера капсул НЖК, присутствия в них добавок, диэлектрических свойств материала, напряженности электрического поля [18, 19].

Различие структуры решеток также сказывается на их электрооптических свойствах. На рис. 3 представлены зависимости ДЭ записанных решеток от напряженности приложенного к ним внешнего электрического поля и концентрации введенного в исходную смесь Y_2O_3 . В отсутствие внешнего электрического поля дифракционная эффективность ПГДР заметно ниже, чем у ГДР. Голографические дифракционные решетки — это объемные голограммы, на которых наблюдается дифракция Брэгга. В поляризационных решетках шаг существенно больше, чем шаг дифракционных, и модуляция показателя преломления ПГДР заметно меньше, чем у ГДР.

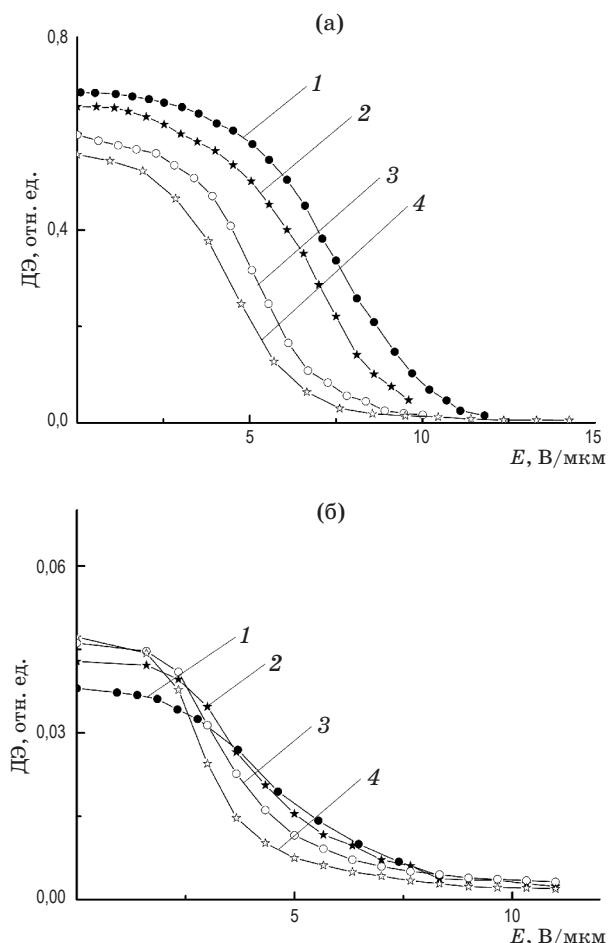


Рис. 3. Зависимости ДЭ ГДР (а) и ПГДР (б) от напряженности приложенного электрического поля при концентрациях Y_2O_3 0 (1), 0,1 (2), 0,5 (3), 1 (4) %.

Параметр Клейна (Q) ПГДР выражается как $Q = 2\pi\lambda d/(n\Lambda^2) < 1$, где d — толщина образца, Λ — шаг решетки, т.е., мы имеем дело с плоскими голограммами, в которых наблюдается дифракция Рамана–Ната. Теоретический предел их ДЭ меньше, чем у объемных голограмм.

Управляющие поля ГДР без НЧ выше, чем у аналогичных ПГДР. Это связано с тем, что в ГДР капсулы НЖК заключены в узком пространственно ограниченном объеме (между полосками полимера), а также высокой энергией сцепления молекул НЖК с поверхностью полимера и высокой энергией упругой деформации. В этих решетках большая поверхность межфазного взаимодействия, поэтому требуется большая напряженность электрического поля, чтобы преодолеть силы сцепления между полимером и НЖК и переориентировать молекулы НЖК вдоль приложенного поля. В ПГДР под влиянием электрического поля происходит только изменение поляризации НЖК.

Введение частиц Y_2O_3 в состав решеток по-разному влияет на их ДЭ: с увеличением концентрации Y_2O_3 у ГДР она падает, а у ПГДР — растет. Чтобы объяснить такое различие, в ходе работы было исследовано влияние частиц на динамику формирования решеток и их диэлектрические свойства.

Динамика формирования дифракционных решеток, допированных наночастицами Y_2O_3

Частицы Y_2O_3 влияют на процессы фазового разделения НЖК — полимер в решетках. Прежде всего, под влиянием частиц изменяется динамика формирования ГДР и ПГДР.

На рис. 4 демонстрируется изменение интенсивности излучения, дифрагированного в первый порядок на решетках, формируемых в ЖК композитах, в зависимости от времени.

Видно, что при отсутствии НЧ Y_2O_3 в исходной композиции ГДР и ПГДР формируются быстрее, чем решетки, содержащие частицы Y_2O_3 . Увеличение концентрации частиц Y_2O_3 для обоих типов решеток приводит к увеличению времени их формирования и снижению динамики роста ДЭ. Увеличение времени формирования решеток ведет к увеличению размера капсул, так как для получения больших капсул требуется большее время, необходимое для их зарождения и роста [18]. Таким образом, увеличение размера капсул является одним из возможных объяснений уменьшения управляющих полей решеток, содержащих НЧ.

Допирование композита НЧ оказывает определенное влияние и на модуляцию показателя преломления в решетках. В процессе фазового разделения компонентов в ГДР со временем увеличивается вязкость исходной композиции, что препятствует полному разделению НЖК и полимера во

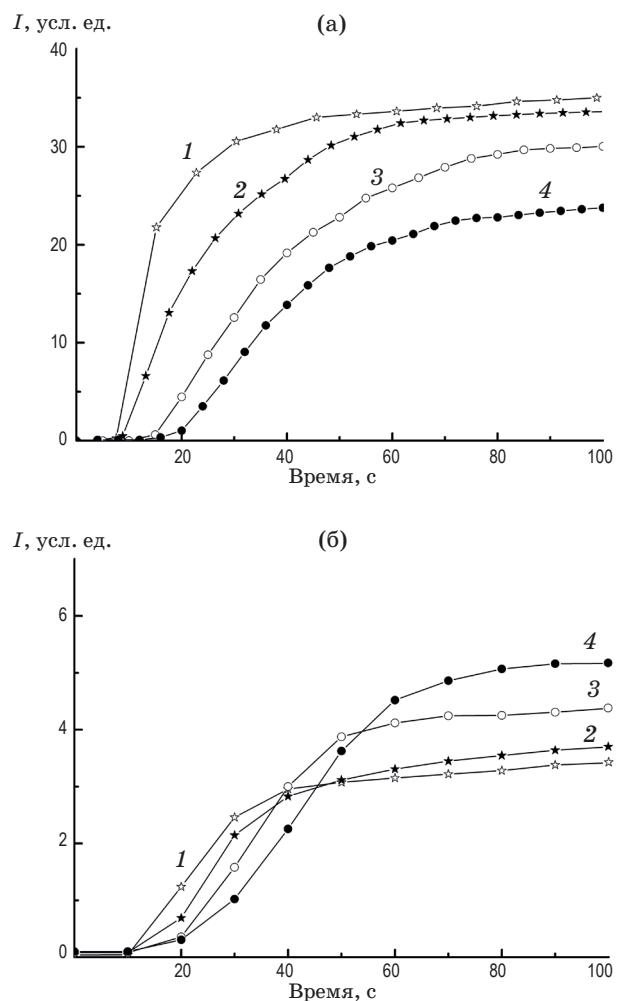


Рис. 4. Динамика формирования ГДР (а) и ПГДР (б) при концентрациях Y_2O_3 0 (1), 0,1 (2), 0,5 (3), 1 (4) %.

время их встречной диффузии. В областях, богатых полимером, содержится заметное количество НЖК, которое увеличивается с увеличением концентрации частиц и, как результат, уменьшается модуляция показателя преломления в решетке.

При формировании ПГДР диффузия компонентов исходной композиции отсутствует, динамика полимеризации меняется менее заметно по сравнению с ГДР. Наночастицы в этом случае распределены более равномерно по объему, и показатель преломления модифицированной полимерной матрицы решеток n_p^* , определяемый как [10]

$$n_p^* = n_p f_p + n_{NP} f_{NP}, \quad (1)$$

где f_p , f_{NP} — объемные доли полимера и НЧ соответственно, n_p , n_{NP} — показатели преломления чистого полимера и НЧ, будет приближаться к среднему показателю НЖК, что ведет к уменьшению светорассеяния на границе раздела полимер — НЖК и увеличению ДЭ ПГДР.

Диэлектрические свойства решеток, допированных наночастицами

Присутствие в составе решеток немезогенных добавок в зависимости от их распределения в решетках оказывается на изменении диэлектрических свойств и матрицы, и ГДР, и ПГДР в целом [20]. Экспериментальные данные говорят о том, что большая часть вводимых НЧ при фазовом разделении НЖК — полимер концентрируется в полимерной матрице [9, 21].

Изменение диэлектрических свойств влияет на локальное электрическое поле, приложенное к НЖК-капсуле, определяемое уравнением [22]

$$E_{lc} = E_a \frac{3\epsilon_p^*}{2\epsilon_p^* + \epsilon_{lc}^*} = E_a \frac{3}{2 + (\epsilon_{lc}^*/\epsilon_p^*)}, \quad (2)$$

где E_a — напряженность электрического поля, приложенного к образцу, $\epsilon^* = \epsilon' + i\sigma/\omega$ — комплексная диэлектрическая проницаемость, ϵ' — реальная часть комплексной диэлектрической проницаемости, σ — проводимость, ω — частота приложенного поля.

В нашем случае средняя диэлектрическая проницаемость НЖК определяется следующим образом:

$$\epsilon_{lc} = \frac{1}{3}(\epsilon_{//} + 2\epsilon_{\perp}). \quad (3)$$

Средняя диэлектрическая проницаемость НЖК Е7 составляет $\epsilon_{lc} = 9,8$, что больше чем у полимерной матрицы ($\epsilon_p \approx 2,2$). Полагая, что НЧ Y_2O_3 преимущественно локализованы в полимере, можно предположить, что их введение увеличивает диэлектрическую проницаемость такой модифицированной полимерной матрицы, что в свою очередь ведет к росту напряженности локального электрического поля, приложенного к ЖК капсуле (формула (2)). Оценить диэлектрическую проницаемость модифицированной полимерной матрицы можно, пользуясь моделью Максвелла-Гарнета [23]

$$\frac{\epsilon_p' - \epsilon_{pol}'}{\epsilon_p' + 2\epsilon_{pol}'} = f_{NP} \frac{\epsilon_{NP}' - \epsilon_{pol}'}{\epsilon_{NP}' + 2\epsilon_{pol}'}, \quad (4)$$

где ϵ_p' , ϵ_{pol}' , ϵ_{NP}' — реальные части комплексной диэлектрической проницаемости модифицированной полимерной матрицы, полимера и НЧ соответственно.

В свою очередь, диэлектрическую проницаемость ЖК композита можно определить, используя модель Бруггеманна [24]

$$f_{lc} \frac{\epsilon_{lc}' - \epsilon_{com}'}{2\epsilon_{com}' + \epsilon_{lc}'} + f_p \frac{\epsilon_p' - \epsilon_{com}'}{2\epsilon_{com}' + \epsilon_p'} = 0, \quad (5)$$

где f_{lc} , f_p — объемные доли НЖК и модифицированного полимера, ϵ_p' , ϵ_{com}' , ϵ_{lc}' — реальные части

комплексной диэлектрической проницаемости модифицированной полимерной матрицы, ЖК композита и НЖК. При оценке диэлектрической проницаемости ЖК композита с записанной ГДР учитывался тот факт, что в области голограммы образуется ламинарная структура, представляющая собой чередующиеся слои с разными показателями преломления [25, 26].

На рис. 5 представлены зависимости диэлектрической проницаемости полимерной матрицы, ГДР и ПГДР от частоты приложенного электрического поля.

Видно, что в диапазоне исследованных частот с увеличением частоты приложенного поля диэлектрическая проницаемость ГДР и ПГДР уменьшается. Такое поведение диэлектрической проницаемости в низкочастотной области может быть обусловлено поляризационным механизмом Максвелла-Вагнера. В таблице представлены измеренные при частоте поля 1 кГц и рассчитанные с использованием модели Бруггеманна диэлектрические проницаемости образцов с записанными ГДР и ПГДР.

Различие в измеренных и рассчитанных значениях может быть обусловлено, например, загрязнением НЖК и полимерной матрицы элементами

Измеренные и рассчитанные диэлектрические проницаемости ПГДР и ГДР

ϵ'	Полимерная матрица	ПГДР	ГДР
Измеренные при частоте приложенного поля 1 кГц	2,19	4,17	4,21
Рассчитанные	—	3,98	4,04

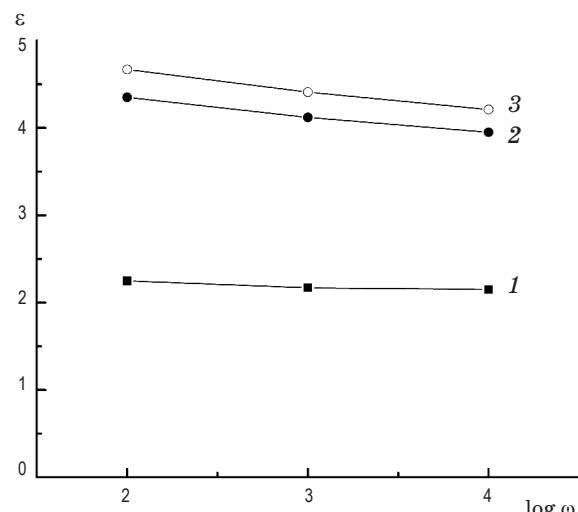


Рис. 5. Зависимости диэлектрической проницаемости полимерной матрицы (1), ПГДР (2), ГДР (3) от частоты приложенного электрического поля.

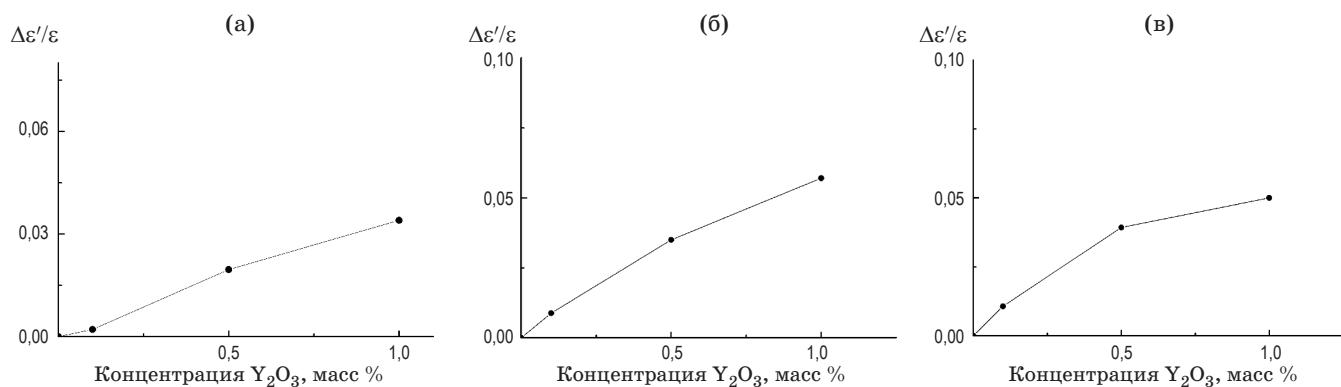


Рис. 6. Зависимости относительной диэлектрической проницаемости полимерной матрицы (а), ПГДР (б) и ГДР (в) от концентрации Y_2O_3 .

исходной композиции, конечной растворимостью НЖК в полимере.

На рис. 6 представлены зависимости относительной диэлектрической проницаемости полимерной матрицы и ЖК композитов, допированных НЧ Y_2O_3 , от концентрации последних на частоте 1 кГц.

С повышением концентрации НЧ диэлектрическая проницаемость полимерной матрицы и обоих структурированных композитов увеличивается. При концентрации НЧ Y_2O_3 1 масс % это увеличение составляет около 5–6%. Измерения проводились при напряженности электрического поля, существенно меньшей управляющего. Увеличение диэлектрической проницаемости полимерной матрицы увеличивает локальное электрическое поле, приложенное к НЖК-капсуле и ведет к уменьшению управляющего напряжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы электрооптические свойства высокоструктурированных полимерно-жидкокристаллических композитов, допированных наночастица-

ми Y_2O_3 . Показано, что допирование композита наночастицами приводит к уменьшению управляющих напряжений сформированных на их основе простых и поляризационных дифракционных решеток и изменению их дифракционной эффективности. Такие изменения обусловлены коллективным эффектом, связанным с увеличением размера жидкокристаллических капсул за счет увеличения времени формирования как голограммических дифракционных решеток, так и поляризационных голограммических дифракционных решеток в жидкокристаллическом композите, увеличением диэлектрической проницаемости полимерной матрицы и, вероятно, с нарушением структуры нематического жидкого кристалла в капсулах в результате попадания в них наночастиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке Комплексной программы фундаментальных исследований Сибирского отделения Российской академии наук «Междисциплинарные интеграционные исследования» на 2018–2020 гг., проект 03-03-2018-0001.

ЛИТЕРАТУРА

1. Matharu A.S., Jeeva S., Ramanujam P.S. Liquid crystals for holographic optical data storage // Chem. Soc. Rev. 2007. V. 36. P. 1868–1880.
2. Yu W., Konishi T., Hamamoto T., et al. Polarization-multiplexed diffractive optical elements fabricated by subwavelength structures // J. Appl. Opt. 2002. V. 41. № 1. P. 96–100.
3. Ono H., Takahashi F., Emoto A., et al. Polarization holograms in azo dye-doped polymer dissolved liquid crystal composites // J. Appl. Phys. 2005. V. 97. P. 053508.
4. Liu Y.J., Sun X.W. Holographic polymer-dispersed liquid crystals: Materials, formation, and applications // Advances in OptoElectronics. 2008. V. 2008. P. 1–52.
5. Wu Y.L., Natansohn A., Rochon P. Photoinduced birefringence and surface relief gratings in novel polyurethanes with azobenzene groups in the main chain // Macromolecules. 2001. V. 34. P. 7822–7828.
6. Cipparrone G., Mazzulla A., Russo G. Diffraction gratings in polymer-dispersed liquid crystals recorded by means of polarization holographic technique // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 78. № 9. P. 1186–1188.
7. Kamanina N.V. Fullerene-dispersed nematic liquid crystal structures: Dynamic characteristics and self-organization processes // Physics-Uspekhi. 2005. V. 48(4). P. 419–427.

8. *Jamil M., Farzana Ahmad, Rhee J.T., et al.* Nanoparticle-doped polymer-dispersed liquidcrystal display // *Current Science*. 2011. V. 101. № 12. P. 1544–1552.
9. *Yaroshchuk O.V., Dolgov L.O., Kiselev A.D.* Electro-optics and structural peculiarities of liquid crystal–nanoparticle-polymer composites // *Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies*. 2005. V. 3. № 2. P. 489–498.
10. *Yaroshchuk O.V., Dolgov L.O.* Electro-optics and structure of polymer dispersed liquid crystals doped with nanoparticles of inorganic materials // *Opt. Mater.* 2007. V. 29. P. 1097–1102.
11. *Li W., Zhu M., Ding X., et al.* Studies on electro-optical properties of polymer matrix/LC/SiO₂ nanoparticles composites // *J. Appl. Polym. Sci.* 2009. V. 111. № 3. P. 1449–1453.
12. *Zharkova G.M., Streletsov S.A., Podyacheva O.Yu.* Structured liquid-crystal composites doped with carbon nanofibers // *JOT*. 2015. V. 82. № 4. P. 252–255.
13. *Zharkova G.M., Zobov K.V., Syzrantsev V.V., et al.* Polymer-liquid crystal composites doped by inorganic oxide nano-powders // *Nanotechnologies in Russia*. 2015. V. 10. № 5–6. P. 380–387.
14. *Vdovin O.S., Kir'yashkina Z.I., Kotelkov V.N.* Films of oxides of rare-earth elements in MDM and MDC structures [in Russian]. Publishing House of Saratov University: Saratov, 1983.
15. *Kamanina N.V., Zubtsova Y.A., Kukharchik A.A., et al.* Control of the IR-spectral shift via modification of the surface relief between the liquid crystal matrixes doped with the lanthanide nanoparticles and the solid substrate // *Opt. Exp.* 2016. V. 24(2). P. A270–A275.
16. *Zharkova G.M., Streletsov S.A.* Effect of yttrium oxide nanoparticles on the diffraction efficiency of holographic polymer-liquid crystal gratings // *Russian Physics J.* 2018. V. 61. № 7. P. 1274–1280.
17. *Zharkova G.M., Streletsov S.A., Osipov V.V., et al.* Investigation of the effect of yttrium oxide nanoparticles doped with cerium and neodymium on electro-optics of liquid crystal polymer composites // *Russian Physics J.* 2016. V. 59. № 8. P. 1295–1301.
18. *Drazic S.* Liquid crystal dispersions. Singapore: World Scientific Publishing, 1995. 429 p.
19. *Petti L.* Optical characterization of novel PDLC systems. Lambert Academic Publishing, 2010. 156 p.
20. *Zhdanov K.R., Romanenko A.I., Zharkova G.M.* Effect of dielectric titanium, yttrium, and silicon oxide nanoparticles on electro-optical characteristics of polymer-dispersed liquid crystals // *Russian Physics J.* 2016. V. 58. № 9. P. 1291–1296.
21. *Shim S.S., Woo J.Y., Jeong H.M., et al.* High dielectric titanium dioxide doped holographic PDLC // *Soft Mater.* 2009. V. 7. P. 93–104.
22. *Wu B.-G., Erdmann J.H., Doane J.W.* Response times and voltages for PDLC light shutters // *Liq. Cryst.* 1989. V. 5. P. 1453–1465.
23. *Maxwell-Garnett J.C.* Colours in metal glasses and in metallic films // *Philos. Trans. R. Soc. London*. 1904. V. 203. P. 385.
24. *Bruggemann D.A.G.* Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen // *Ann. Phys.* 1935. Bd. 24. S. 636–679.
25. *Born M., Wolf E.* Principles of optics. 7th Ed. Cambridge University Press, 1999. 987 p.
26. *Yariv A., Yeh P.* Optical waves in crystals. N.Y.: John Wiley & Sons, 1984. 589 p.