

УДК [535:530.182]:532.783

СВЕТОИНДУЦИРОВАННЫЙ ОРИЕНТАЦИОННЫЙ ПЕРЕХОД В НЕМАТИЧЕСКОМ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ПОЛИМЕРЕ

И. А. Будаговский¹, А. С. Золотко¹, В. Н. Очкин¹, С. А. Швецов^{1,2},
А. Ю. Бобровский³, Н. И. Бойко³, В. П. Шibaев³

Впервые наблюдалась оптическая ориентация в прозрачном нематическом жидкокристаллическом полимере (НЖКП). В НЖКП с примесью красителя обнаружен светоиндуцированный ориентационный переход второго рода, являющийся аналогом перехода Фредерикса в низкочастотных полях. Порог перехода составляет ~ 10 мкВт, что на четыре порядка меньше порога светоиндуцированного перехода Фредерикса в низкомолекулярных нематиках и на два порядка меньше характерного значения для низкомолекулярных нематиков с примесью красителей.

Ключевые слова: жидкокристаллический полимер, оптическая ориентация, оптическая нелинейность, азобензольный краситель.

Введение. В нематических жидких кристаллах (НЖК) под действием низкочастотного электрического или магнитного поля происходит поворот директора (единичного вектора, характеризующего преимущественную ориентацию молекул) [1]. Причиной поворота является возникновение вращающего момента, пропорционального анизотропии диэлектрической или магнитной проницаемости. В случае, когда переориентация происходит под действием внешнего поля, параллельного или перпендикулярного директору, она является пороговой; этот случай называется переходом Фредерикса. Переход Фредерикса можно рассматривать как ориентационный фазовый переход второго рода,

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: zolotko@lebedev.ru.

² Московский физико-технический институт (МФТИ), 141700 Россия, Московская область, Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: shvetsov@lebedev.ru.

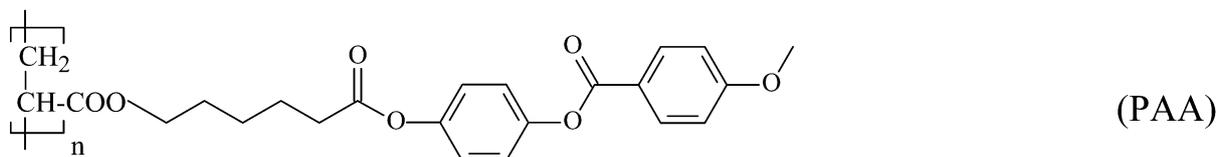
³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Химический факультет, 119991, Москва, Ленинские горы, 1.

при этом параметром порядка является угол поворота директора, а основной переменной (аналогом температуры) – величина внешнего поля [2]. Переориентация директора НЖК и пороговый переход наблюдаются также под действием светового поля [3, 4]. Механизмом оптической ориентации в прозрачных НЖК является ориентирующее воздействие света на индуцированные диполи. В НЖК с примесью красителей проявляется новый механизм оптической ориентации, связанный с изменением межмолекулярных сил при возбуждении молекул красителей [5–7]. При этом наибольшая эффективность оптической ориентации, характеризуемая отношением фактора усиления вращающего момента по сравнению со случаем прозрачного НЖК к поглощению кристалла, реализована для полимерной поглощающей добавки [8].

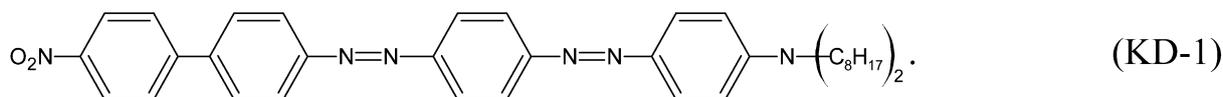
Для нематической фазы жидкокристаллических полимеров эффекты переориентации директора, включая пороговый переход, наблюдались только для магнитных и низкочастотных электрических полей [9, 10]. В то же время, аналогичные ориентационные эффекты под действием света представляют несомненный интерес. Во-первых, вращательное движение хромофоров в такой среде замедлено по сравнению с низкомолекулярными НЖК, что может приводить к возрастанию нелинейно-оптического отклика. Во-вторых, возможно проявление особенностей динамики переориентации, связанной со сложным характером поворота макромолекул.

Оптическая переориентация директора в НЖКП с добавкой красителя была впервые зарегистрирована в [11]. В настоящей работе сообщается о первом наблюдении оптической ориентации в прозрачном НЖКП и светоиндуцированного ориентационного фазового перехода в НЖКП, легированного красителем.

Экспериментальные образцы и методика эксперимента. Исследования проводились с планарно ориентированным образцом полимера – полиакрилата РАА



и с планарно ориентированным образцом РАА, допированным диазобензольным красителем KD-1 (0.05% по массе)



Методика приготовления планарно ориентированных образцов описана в [11]. Толщина образцов составляла $L = 50$ мкм. Полимер РАА образует нематическую фазу с температурой изотропизации 123 °С; температура стеклования составляет 26 °С. Степень полимеризации полимера 82 , полидисперсность ~ 1.2 . При комнатной температуре длина волны максимума спектра поглощения для образца РАА + 0.05% КД-1, измеренного с помощью спектрометра МС-122, равнялась $\lambda = 512$ нм. Коэффициенты поглощения необыкновенной и обыкновенной волн на длине волны $\lambda = 473$ нм составляют $n_e = 173$ см $^{-1}$ и $n_o = 29$ см $^{-1}$.

Оптическая схема эксперимента была аналогична использованной в [11]. Световой пучок от твердотельного лазера с длиной волны $\lambda = 473$ нм или $\lambda = 532$ нм фокусировался линзой на НЖКП. Радиус перетяжки для $\lambda = 473$ нм составлял $w_0 = 25$ мкм. Экспериментальные образцы размещались таким образом, чтобы невозмущенный директор и направление поляризации света лежали в горизонтальной плоскости. Образец мог поворачиваться вокруг вертикальной оси; при этом изменялся угол α падения света на кристалл. В указанной геометрии в кристалле возбуждалась необыкновенная световая волна. Световой пучок, прошедший через НЖКП, наблюдался на экране, расположенном на расстоянии ~ 1 м за образцом. Мощность светового пучка измерялась с помощью прибора Sanwa Electric LP1.

Исследования оптической ориентации проводились с помощью эффекта самовоздействия – самофокусировки или самодефокусировки светового пучка, вызванных изменением показателя преломления необыкновенной волны вследствие светоиндуцированного поворота директора. При большом нелинейном набеге фазы $\Delta S = 2\pi|\Delta n|L/\lambda$ (Δn – светоиндуцированное изменение показателя преломления) самовоздействие светового пучка приводит к образованию абберационных колец [12], по числу которых $N = \Delta S/2\pi$ можно определить модуль светоиндуцированного показателя преломления

$$|\Delta n| = \frac{N\lambda \cos \beta}{L},$$

где β – угол преломления света в НЖКП, связанный законом Снеллиуса с углом падения α . Направление поворота директора можно определить по характеру трансформации абберационной картины при сдвиге кристалла перпендикулярно световому пучку [13].

Взаимодействие света с прозрачным нематическим жидкокристаллическим полимером. Полимер РАА освещался наклонно падающим ($\alpha = 40^\circ$) световым пучком с $\lambda = 532$ нм мощностью $P = 60$ мВт. За время ~ 25 мин на экране устанавливалась

картина из двух абберационных колец (рис. 1(а)); при этом направление поляризации света (горизонтальное) сохранялось. При небольшом смещении ячейки вверх относительно светового пучка нижняя часть абберационной картины исчезала, а верхняя дополнительно подсвечивалась (рис. 1(б)). Такой тип трансформации интенсивности абберационной картины соответствует самофокусировке светового пучка, т.е. светоиндуцированному увеличению показателя преломления необыкновенной волны и, соответственно, повороту директора параллельно световому полю. Величина светоиндуцированного показателя преломления составляла $\Delta n \sim 0.02$. По порядку величины это значение соответствует светоиндуцированному изменению показателя преломления в низкомолекулярных кристаллах.

Характерное время релаксации, определенное с помощью зондирующего пучка, ~ 20 мин. Это время на 2 порядка больше, чем характерная величина для низкомолекулярных нематических жидких кристаллов.

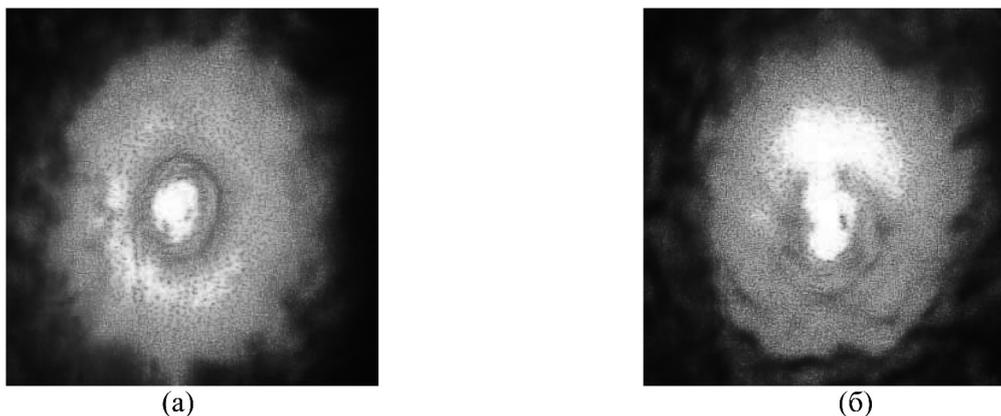


Рис. 1: Фотографии абберационных колец самофокусировки при освещении планарно ориентированного образца РАА толщиной 50 мкм наклонно ($\alpha = 40^\circ$) падающим световым пучком ($P = 60$ мВт, $\lambda = 532$ нм): (а) стационарная картина и (б) нестационарная картина после смещения кристалла вверх. Угловой размер фотографий ~ 0.05 рад.

Взаимодействие света с нематическим жидкокристаллическим полимером, допированным красителем. Как при нормальном, так и при наклонном падении светового пучка на планарно ориентированный образец НЖКП + 0.05% КД-1 наблюдалась самодефокусировка, т.е. директор НЖКП поворачивался перпендикулярно световому полю и, соответственно, показатель преломления необыкновенной волны уменьшался. Зависимости модуля стационарного изменения показателя преломления, рассчитанного по

числу абберационных колец с помощью (1), от мощности светового пучка представлены на рис. 2.

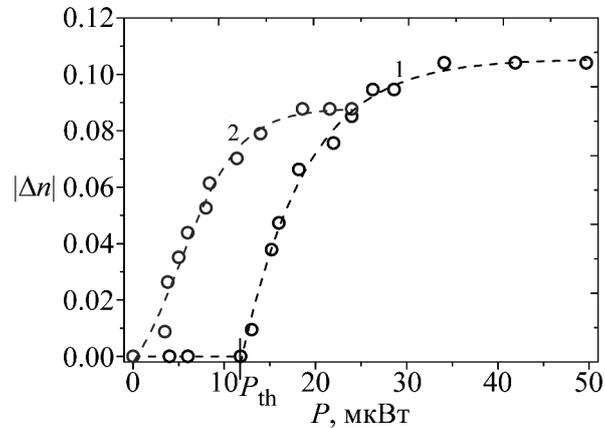


Рис. 2: Зависимость стационарного значения модуля светоиндуцированного показателя преломления $|\Delta n|$ от мощности P при (1) нормальном и (2) наклонном падении светового пучка ($\alpha = 40^\circ$, $\lambda = 473$ нм) на нематический полимер РАА+0.05% КД-1, температура образца $T = 110$ °С.

При нормальном падении света на НЖКП с добавкой красителя зависимость светоиндуцированного показателя от мощности соответствует пороговой переориентации директора (рис. 2, кривая 1). Величина пороговой мощности – $P_{th} = 12$ мкВт (плотность мощности на оси пучка $I = 2P/\pi w_0^2$ равна 0.3 Вт/см²). При мощности $P \sim 3P_{th}$ происходит насыщение светоиндуцированного показателя преломления, соответствующее максимальному повороту директора на 90° . При наклонном падении переориентация является беспороговой.

Таким образом, полученные нами экспериментальные результаты свидетельствуют о проявлении в НЖКП светоиндуцированного порогового ориентационного перехода, аналогичного эффектам, свойственным низкомолекулярным нематикам.

Характерное время пороговой переориентации при $P \sim P_{th}$ составляет ~ 1 час, при десятикратном превышении пороговой мощности эта величина ~ 10 мин. Характерное время релаксации составляет 12 мин.

Измеренная пороговая мощность $P_{th} = 12$ мкВт на четыре порядка меньше порога светоиндуцированного перехода Фредерикса в низкомолекулярных прозрачных нематиках [4] и на два порядка меньше характерного значения для низкомолекулярных нематиков с примесью азобензольного полимера [13]. Коэффициент нелинейности $n_2 = |\Delta n|/I$ при пороговом переходе в НЖКП составляет ~ 0.1 см²/Вт ($|\Delta n| = 0.1$

при $P = 3P_{th}$). Эта величина на два порядка больше соответствующего значения для низкомолекулярных НЖК с примесью красителей. Столь существенное возрастание коэффициента нелинейности обусловлено увеличением времени вращательной диффузии азокрасителя.

Заключение. В настоящей работе впервые наблюдалась оптическая ориентация в прозрачном нематическом жидкокристаллическом полимере. В НЖКП с примесью красителя обнаружен светоиндуцированный ориентационный переход второго рода, являющийся аналогом перехода Фредерикса в низкочастотных полях.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 14-02-00791) и Учебно-научного комплекса ФИАН.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Л. М. Блинов, *Электро- и магнитооптика жидких кристаллов* (М., Наука, 1978).
- [2] E. Guyon, Am. J. Phys. **43**, 877 (1975).
- [3] Б. Я. Зельдович, Н. Ф. Пилипецкий, А. В. Сухов, Н. В. Табирян, Письма в ЖЭТФ **31**, 287 (1980).
- [4] А. С. Золотько, В. Ф. Китаева, Н. Кроо и др., Письма в ЖЭТФ **32**, 170 (1980).
- [5] I. Janossy, L. Csillag and A. D. Lloyd, Phys. Rev. A **44**, 8410 (1991).
- [6] L. Marrucci and D. Pararo, Phys. Rev. E **56**, 1765 (1997).
- [7] А. С. Золотько, Письма в ЖЭТФ **68**, 410 (1998).
- [8] И. А. Будаговский, А. С. Золотько, В. Н. Очкин и др., ЖЭТФ **133**, 204 (2008).
- [9] С. В. Беляев, Т. И. Зверкова, Ю. П. Панарин и др., Высокомолекулярные соединения, серия Б **28**, 789 (1986).
- [10] Е. В. Барматов, Д. Б. Строганов, Р. В. Тальрозе и др., Высокомолекулярные соединения, серия А **35**, 162 (1993).
- [11] И. А. Будаговский, А. С. Золотько, М. П. Смаев и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **42**(8), 3 (2015).
- [12] А. С. Золотько, В. Ф. Китаева, Н. Н. Соколов, А. П. Сухоруков, ЖЭТФ **81**, 933 (1981).
- [13] A. S. Zolot'ko, I. A. Budagovsky, V. N. Ochkin, et al., Mol. Cryst. Liq. Cryst. **488**, 265 (2008).

Поступила в редакцию 24 декабря 2015 г.