

УДК 532.783

БИСТАБИЛЬНОСТЬ ПОЛЯ ДИРЕКТОРА НЕМАТИЧЕСКОГО ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА В НИЗКОЧАСТОТНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И ПРОСТРАНСТВЕННО ОГРАНИЧЕННОМ СВЕТОВОМ ПОЛЯХ

А. С. Золотько, М. П. Смаев, В. Ф. Китаева, М. И. Барник¹

Экспериментально исследован новый тип обратимых ориентационных переходов первого рода в нематическом жидком кристалле, находящемся под воздействием светового пучка и низкочастотного электрического поля. Эти переходы обусловлены пространственной ограниченностью светового пучка и характеризуются ярко выраженной бистабильностью поля директора как при изменении мощности светового пучка P (при постоянном напряжении низкочастотного поля $U = \text{const}$), так и при изменении U ($P = \text{const}$).

При нормальном падении необыкновенной световой волны на нематические жидкие кристаллы (НЖК), находящиеся под воздействием внешнего низкочастотного электрического или магнитного поля, наблюдается бистабильность поля директора [1 – 4]. Между двумя устойчивыми состояниями поля директора возможно обратимое переключение. Оно достигается либо изменением плотности мощности световой волны, либо изменением напряжения внешнего поля. Физической причиной бистабильности является изменение величины и направления электрического поля световой волны при светоиндуцированной деформации поля директора.

Под низкочастотным здесь понимается поле с частотой, низкой по сравнению с частотой световой волны, но не с обратным временем релаксации ориентации НЖК.

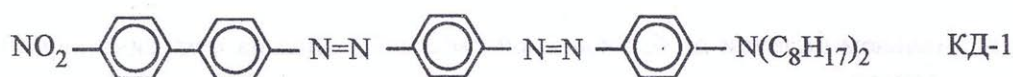
¹Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН.

В [5] наблюдалась бистабильность поля директора в НЖК планарной ориентации в скрещенных низкочастотном поле и световом поле узкого наклонно падающего на НЖК пучка при изменении напряжения низкочастотного поля U . Наличие бистабильности связывалось в [5] с ограниченностью светового пучка, однако зависимость эффекта от ширины светового пучка исследована не была.

В настоящем сообщении представлены основные результаты более подробного экспериментального исследования бистабильности планарно ориентированного НЖК в скрещенных низкочастотном и световом поле пучка, и ее зависимости от ширины светового пучка, его мощности P и напряжения низкочастотного поля U . Дано качественное объяснение наблюдавшимся эффектам.

Условия эксперимента. Исследования проводились с планарно ориентированной жидкокристаллической матрицей ЖКМ-1282, легированной диазокрасителем КД-1 (0.025% по весу). Нематическая матрица ЖКМ-1282 имеет положительную низкочастотную диэлектрическую анизотропию (пороговое напряжение перехода Фредерикса в планарно ориентированном кристалле $U_{th} = 1.1 В$). Выбор легирующего красителя был обусловлен тем, что воздействие света на НЖК, легированные этим красителем, создает вращающий момент, величина которого более чем на порядок превышает момент, создаваемый воздействием света на нелегированный НЖК (при этом для планарных кристаллов директор $\mathbf{n}$ ориентируется параллельно световому полю $\mathbf{E}$) [6, 7]. Толщина образца составляла $L \cong 100 \mu m$.

Структурная формула красителя КД-1 имеет вид:



Пучок света от твердотельного лазера ($\lambda = 532 \text{ нм}$) фокусировался в кристалл линзой с фокусным расстоянием $f = 18 \text{ см}$. Для поворота плоскости поляризации светового пучка использовался двойной ромб Френеля. Плоскость жидкокристаллического слоя была вертикальна. Угол падения света на кристалл мог изменяться вращением кюветы с НЖК вокруг вертикальной оси. В описываемом эксперименте он был равен $\alpha = 52^\circ$. Вектор директора лежал в плоскости падения. Ширина области пространственной локализации светового поля (диаметр светового пучка) изменялась путем перемещения кюветы с жидким кристаллом относительно фокальной плоскости линзы в расходящуюся часть пучка. Низкочастотное электрическое поле ($\nu = 3 \text{ кГц}$) прикладывалось к

электродам из SnO_2 , нанесенным на внутренние стенки кюветы.

Светоиндуцированная переориентация директора сопровождается эффектом самодействия светового пучка, в результате чего на экране, помещенном за кристаллом, наблюдается система абберационных колец, по числу которых можно судить об угле поворота директора [8].

Исследовалась зависимость числа абберационных колец N от мощности светового пучка P при ее плавном увеличении и уменьшении (при постоянном напряжении $U = \text{const}$), а также зависимость N от напряжения U при его плавном увеличении и уменьшении ($P = \text{const}$). При переходе к каждому новому значению мощности или напряжения измерения N проводились через некоторое время (~ 5 мин), в течение которого кольцевая картина стабилизировалась. Кристалл помещался в фокальной плоскости линзы или смещался из нее на расстояние Δ .

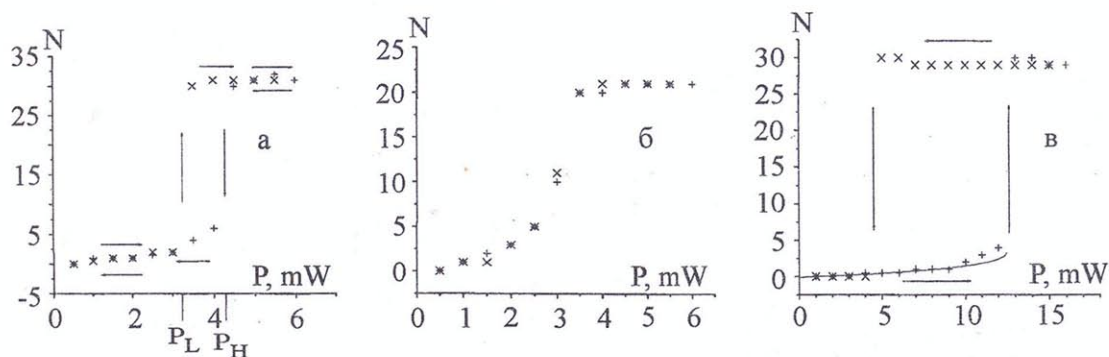


Рис. 1. Экспериментальные (+, x) и теоретическая (сплошная линия) зависимости числа абберационных колец самофокусировки в световом пучке, прошедшем планарный НЖК (ЖКМ-1282 + 0.025% КД-1, толщина $L = 100 \mu\text{m}$, $\lambda = 532 \text{ нм}$, угол падения $\alpha = 52^\circ$), от его мощности P при различных значениях смещения НЖК из фокальной плоскости Δ и приложенного низкочастотного (3 кГц) напряжения U : (а) $\Delta = 0$, $U = 1.45 \text{ В}$; (б) $\Delta = 16 \text{ см}$, $U = 1.1 \text{ В}$; (в) $\Delta = 16 \text{ см}$, $U = 1.45 \text{ В}$.

Экспериментальные результаты. а) Бистабильность директора при изменении мощности светового пучка P ($U = \text{const}$).

Исследования проводились в интервале $1.1 < U < 1.45 \text{ В}$ при $\Delta = 0$ и 16 см . Результаты представлены на рис. 1.

При малых $P \sim 1 \text{ мВт}$ абберационная картина на экране не наблюдается. Увеличение мощности приводит к ее появлению и росту числа колец. При некотором значении

мощности P_H , характерном для данного напряжения и расстояния Δ (рис. 1а и 1в), происходит резкое увеличение числа колец ($N \cong 25-30$). Дальнейшее увеличение мощности существенным образом число колец N не изменяет. Уменьшение мощности приводит к уменьшению числа колец. При некоторой мощности P_L происходит резкое схлопывание картины абберационных колец (на экране видна точка, кольцевая картина не наблюдается). Резкое уменьшение числа колец происходит при мощности, значительно меньшей, чем та, при которой происходил скачок ($P_L < P_H$).

При напряжении $U = 1.45 \text{ В}$, как следует из рис. 1а и 1в, сдвиг кюветы из фокуса в расходящийся пучок на расстояние $\Delta = 16 \text{ см}$ приводит к увеличению области бистабильности от 1 мВт до 8 мВт .

При постоянном сдвиге кюветы из фокуса на расстояние $\Delta = 16 \text{ см}$ уменьшение напряжения U от 1.45 В до 1.2 В ведет к уменьшению области бистабильности от 8 до 1 мВт . При $U = 1.1 \text{ В}$ бистабильность полностью исчезает (рис. 2б).

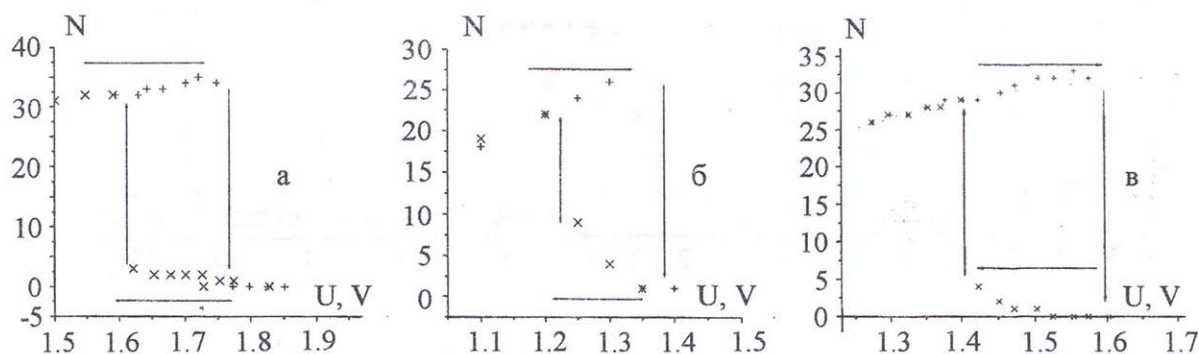


Рис. 2. Экспериментальные (+, x) зависимости числа абберационных колец самофокусировки в световом пучке, прошедшем планарный НЖК (ЖКМ-1282 + 0.025% КД-1, толщина $L = 100 \mu\text{м}$, $\lambda = 532 \text{ нм}$, угол падения $\alpha = 52^\circ$), от приложенного низкочастотного (3 кГц) напряжения U при различных значениях смещения НЖК из фокальной плоскости Δ и мощности светового пучка: (а) $\Delta = 0$, $P = 8 \text{ мВт}$; (б) $\Delta = 16 \text{ см}$, $P = 4 \text{ мВт}$; (в) $\Delta = 16 \text{ см}$, $P = 8 \text{ мВт}$.

б) Бистабильность директора при изменении напряжения U ($P = \text{const}$).

Исследования проводились для двух значений мощности светового пучка $P = 4$ и 8 мВт при $\Delta = 0, 16$ и 35 см . Результаты представлены на рис. 2.

Как следует из рис. 2а-2в увеличение напряжения U сначала ведет к росту числа колец самофокусировки N . Наибольшее наблюдавшееся число колец составляло

$N_{max} = 32$. При достижении некоторого значения $U_H \sim 1.5 В$ абберационная картина схлопывается (время схлопывания 2–3 мин). На экране при этом наблюдается светящаяся точка. Дальнейшее увеличение напряжения к изменению картины не приводит.

При уменьшении напряжения U кольцевая картина возникает вновь, и число N начинает медленно расти. При некотором значении напряжения $U_L \sim 1.3 - 1.4 В$ количество колец скачком возрастает до того значения, которое уже наблюдалось при данном U и при дальнейшем уменьшении напряжения полностью повторяет ранее наблюдавшуюся зависимость $N(U)$.

При мощности $P = 8 мВт$, как следует из рис. 2а и 2в, сдвиг кристалла из фокуса в расходящийся пучок приводит к увеличению области бистабильности от 0.15 до 0.17 В. При $\Delta = 35 см$ область бистабильности составляет 0.55 В.

При постоянном сдвиге кристалла из фокуса на $\Delta = 16 см$ увеличение мощности светового пучка с 4 до 8 мВт приводит к некоторому (от 0.15 до 0.17 В) расширению области бистабильности.

Таким образом, в случае наклонного падения светового пучка на планарно ориентированный НЖК экспериментально наблюдались ориентационные фазовые переходы первого рода при изменении мощности пучка P ($U = const$) и приложенного низкочастотного напряжения U ($P = const$). Ширина области бистабильности зависит от ширины светового пучка, его мощности и внешнего низкочастотного поля.

Проанализируем качественно картину переориентации директора планарно ориентированного НЖК в одновременно действующих электрическом поле пространственно ограниченного светового пучка $\mathbf{E}$ и низкочастотном электрическом поле $\mathbf{V}$.

Рассмотрим случай, когда амплитуда V ($V = U/L$) низкочастотного электрического поля постоянна, а электрическое поле $\mathbf{E}$ светового пучка сначала плавно увеличивается, а через некоторое время постепенно уменьшается до нуля. В отсутствие светового поля $\mathbf{E}$, директор $\mathbf{n}$ под действием низкочастотного поля $\mathbf{V}$ поворачивается перпендикулярно стенкам кристалла. Направление поворота зависит от преднаклона директора на стенках кристалла. Для случая, представленного на рис. 3, поворот директора происходит против часовой стрелки.

Световое поле $\mathbf{E}$ в геометрии наклонного падения света стремится повернуть директор в противоположном направлении. При этом момент Γ_{opt} , действующий со стороны светового поля, максимален на оси пучка. На периферии пучка ориентация директора (угол $\tilde{\psi}_m$) определяется моментом Γ_{elect} , создаваемым низкочастотным полем $\mathbf{V}$, и

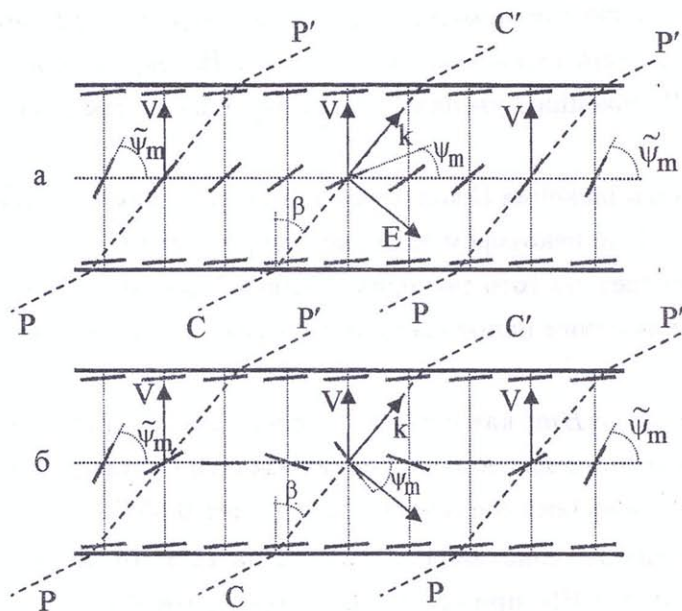


Рис. 3. Состояния поля директора с положительным (а) и отрицательным (б) углом поворота директора на оси светового пучка: $\mathbf{k}$, $\mathbf{E}$ и β – волновой вектор, электрическое поле и угол преломления светового пучка, соответственно; CC' и PP' – ось и границы светового пучка; соответственно; ψ_m и $\tilde{\psi}_m$ – углы поворота директора на оси и периферии пучка, соответственно; "палочки" показывают ориентацию директора $\mathbf{n}$ в различных точках НЖК.

практически не зависит от мощности светового пучка.

По мере увеличения мощности светового пучка P (и, соответственно величины поля $\mathbf{E}$) угол поворота ψ_m на оси пучка уменьшается и, очевидно, при достаточно большой мощности P угол поворота директора на оси пучка станет отрицательным (произойдет переход от конфигурации поля директора, изображенной на рис. 3а к конфигурации, показанной на рис. 3б). Поворот директора не будет непрерывным. При некотором значении $P = P_H$ угол поворота будет изменяться скачком, поскольку состояние $\psi_m = 0$ не может быть устойчивым при $P \neq 0$, т.к. при этом Γ_{elect} и момент упругих сил равны нулю, а $\Gamma_{opt} \neq 0$.

Пусть теперь мощность светового пучка P уменьшается. Если бы на НЖК воздействовал не ограниченный световой пучок, а плоская световая волна, то при уменьшении световой мощности возврат к первоначальной ориентации директора $\psi_m = \tilde{\psi}_m$ не про-

исходил бы вообще: устойчивая ориентация директора задавалась бы углом $\psi_m = -\tilde{\psi}_m$. Однако поперечная неоднородность поля директора приводит к неустойчивости этого состояния [9]. Таким образом, при некотором значении $P = P_L$ должен происходить возврат поля директора к первоначальной ориентации (Рис. 3а, $\psi_m > 0$). Значения мощностей P_H и P_L , вообще говоря, не равны друг другу.

Именно это и наблюдается в эксперименте, результаты которого представлены в настоящей работе.

В случае достаточно узкого светового пучка (когда его ширина значительно меньше толщины кристалла) состояние $\psi_m = 0$ может стать устойчивым, т.к. момент Γ_{opt} уравнивается моментом упругих сил, связанным с поперечной неоднородностью поля директора. При этом бистабильность должна исчезнуть. В условиях нашего эксперимента исчезновение бистабильности при уменьшении Δ не наблюдалось, однако ее область заметно (от 8 до 1 мВт) сокращается при уменьшении Δ от 16 до 0 см ($U = 1.45$ В).

Итак, при изменении плотности мощности светового пучка, проходящего через планарно ориентированный НЖК (находящийся под воздействием внешнего низкочастотного электрического поля), должен наблюдаться обратимый ориентационный переход между состояниями с положительными и отрицательными значениями угла поворота директора.

Подчеркнем, что рассмотренный механизм обратимого ориентационного перехода, в отличие от [1 – 4], никак не связан с влиянием деформации поля директора на электрическое поле световой волны, а определяется пространственной ограниченностью светового пучка. Само наличие бистабильности тесно связано с наличием двух устойчивых состояний, отличающихся направлением поворота директора и существующих и в отсутствие светового поля. Световое поле обеспечивает переключение между этими состояниями, причем обратимость этого переключения обусловлена ограниченностью пучка.

Аналогичным образом можно проанализировать трансформацию поля директора и в случае, когда мощность светового пучка P постоянна, а переменной величиной является амплитуда низкочастотного поля V . Нетрудно показать, что и в этом случае должен происходить обратимый ориентационный переход, связанный с ограниченностью светового пучка. Ширина области бистабильности при этом также уменьшается с уменьшением ширины пучка.

Отметим также, что относительные ширины областей бистабильности, наблюдав-

шихся в настоящей работе, на порядок превышают значения, полученные в [1 – 4].

Проведенное качественное рассмотрение находится в полном соответствии с полученными экспериментальными результатами.

Было также проведено численное моделирование ориентационных переходов, адекватно описавшее основные закономерности наблюдавшихся переходов. Для этого в уравнении, описывающем поведение поля директора в низкочастотном и световых полях [5], была дополнительно учтена поперечная неоднородность поля директора, связанная с пространственной ограниченностью светового пучка. Изложение результатов численного моделирования не является целью настоящего краткого сообщения. Здесь, на рис. 1в, приведена только теоретическая зависимость, полученная для перехода, происходящего при изменении мощности светового пучка при $U = 1.45 V$.

Итак, в настоящей работе в случае наклонного падения светового пучка на планарно ориентированный НЖК экспериментально наблюдались ориентационные фазовые переходы первого рода при изменении мощности пучка P ($U = \text{const}$) и приложенного низкочастотного напряжения U ($P = \text{const}$). Эти переходы характеризуются весьма широкими областями бистабильности поля директора, зависящими от ширины светового пучка, мощности пучка P (для перехода при изменении U) и напряжения U (для перехода при изменении P). Рассмотрена качественная картина наблюдавшихся переходов.

Авторы благодарны В.Н. Очкину за полезные обсуждения. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 02-02-16927) и Федеральных программ "Интеграция" (проект Б0049) и "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники".

ЛИТЕРАТУРА

- [1] K a r n A. J., A r a k e l i a n S. M., S h e n Y. R., and O n g H. L. Phys. Rev. Lett., **57**, 448 (1986).
- [2] C h e n Shu-Hsia, W u J. J. Appl. Phys. Lett, **52**, 1998 (1988).
- [3] W u J. J., O n g Gan-Sing, and C h e n Shu-Hsia. Appl. Phys. Lett, **53**, 1999 (1989).
- [4] W u J. J. and C h e n Shu-Hsia. J. Appl. Phys., **66**, 1065 (1989).
- [5] B a r n i k M. I., K h a r c h e n k o S. A., K i t a e v a V. F. and Z o l o t ' k o A. S. Mol. Cryst. Liq. Cryst., **375**, 363 (2002).

- [6] Барник М. И., Золотько А. С., Румянцев В. Г., Терсков Д. Б. Кристаллография, **40**, 746 (1995).
- [7] Kitaeva V. F., Zolot'ko A. S., and Barnik M. I. Mol. Materials, **12**, 271 (2000).
- [8] Золотько А. С., Китаева В. Ф., Соболев Н. Н., Сухоруков А. П. ЖЭТФ, **81**, 933 (1981).
- [9] Janossy I. and Prasad S. K. Phys. Rev. E, **63**, 041795 (2001).

Поступила в редакцию 15 января 2004 г.