

06

Энергонезависимое изменение световым излучением ориентации жидкого кристалла в окрестности его контакта с проводником

© С.И. Кучеев¹, Ю.П. Вирченко²¹ Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия² Белгородский государственный технологический университет, Белгород, Россия

E-mail: kuchehev@bsuedu.ru

Поступило в Редакцию 23 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 10 сентября 2024 г.

Принято к публикации 11 сентября 2024 г.

Экспериментально показано, что при действии световым излучением (лампа накаливания или малоомощный He–Ne-лазер с $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$) на контакт жидкий кристалл (5СВ)–проводник (Cu) в окрестности мениска имеет место изменение исходной ориентации молекул жидкого кристалла. Установлено, что переориентация молекул носит нестационарный характер с выраженными периодами времени увеличения и релаксации размеров области деформации жидкого кристалла. Характерное время, соответствующее максимуму деформации, лежит в диапазоне нескольких секунд. Предполагается, что наблюдаемое изменение мениска, с которым связывается переориентация молекул, обусловлено изменением поверхностного натяжения жидкого кристалла вследствие фотоэмиссии электронов в жидкий кристалл из проводника при его облучении.

Ключевые слова: контакт жидкий кристалл–проводник, поверхностное натяжение, электросмачивание, фотоэмиссия электронов.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.02.59555.19970

С помощью жидких кристаллов (ЖК) благодаря значительной анизотропии коэффициента преломления успешно решаются задачи, связанные с модуляцией параметров (фаза, поляризация, амплитуда) световой волны. В настоящее время во всех жидкокристаллических приборах (дисплеи, модуляторы света и т.п.) модуляция света осуществляется за счет изменения ориентации молекул ЖК вследствие приложения к анизотропной среде электрического поля [1]. Развитие технологий, по-видимому, будет нуждаться в энергонезависимых модулирующих свет жидкокристаллических устройствах, которые смогут располагаться в местах с ограниченным доступом или последующим полным его отсутствием. С этой точки зрения эффекты, индуцированные световым облучением жидкокристаллических материалов и обусловленные, например, фоторефрактивным эффектом [2], фотоизомеризацией светопоглощающих допантов [3], адсорбцией фотовозбужденных молекул [4], остаются перспективными для решения подобных задач. Однако на данный момент имеются серьезные препятствия для их использования в энергонезависимых устройствах модуляции света. Реализация этих эффектов все еще требует значительных мощностей излучения световой волны когерентных источников света [5]. В частности, не удается полностью исключить необходимость воздействия электрического поля [6]. Из опубликованных работ видно, что эксперименты по исследованию взаимодействия световой волны и ЖК в основном рассчитаны на улучшение дифракционной эффективности, тогда как, например, для световолоконной техники необходимы эффекты взаимодействия, в которых имело бы место непрерывное управление фазой световой волны. Рабочие

длины волн остаются преимущественно в коротковолновой и средней части оптического спектра [7], что несовместимо с современными оптическими системами передачи и обработки информации.

Хорошо известно явление электросмачивания (см., например, [8–10]), при котором краевой угол смачивания жидкости изменяется при изменении ионной концентрации на границе жидкость–твердое тело. Это явление изучается не только экспериментально, также делаются попытки теоретических построений с целью количественных предсказаний влияния этого эффекта на протекание процессов на межфазной границе. В то же время следует указать, что этот эффект уже находит практическое применение в управляемых жидких линзах, призмах и микрожидкостных приборах [11,12]. Однако управление электросмачиванием остается энергонеэкономичным, причем прикладываемое напряжение составляет десятки вольт.

Целью настоящей работы является экспериментальное подтверждение возможности изменения ориентации молекул ЖК, а следовательно, и возможности модуляции параметров фронта световой волны в процессе изменения электросмачивания жидким кристаллом поверхности проводника под действием светового излучения без использования источников электрического поля.

На рис. 1 схематически представлены условия эксперимента. Нематический ЖК 4-н-пентил-4'-цианобифенил (5СВ) (Merck) с температурой фазового перехода 35°C располагался на стеклянной подложке в виде плоскопараллельной пластинки толщиной 1.3 mm, которая размещалась на предметном столике поляризационного микроскопа Микромед ПОЛАР 3. Горизонтальность

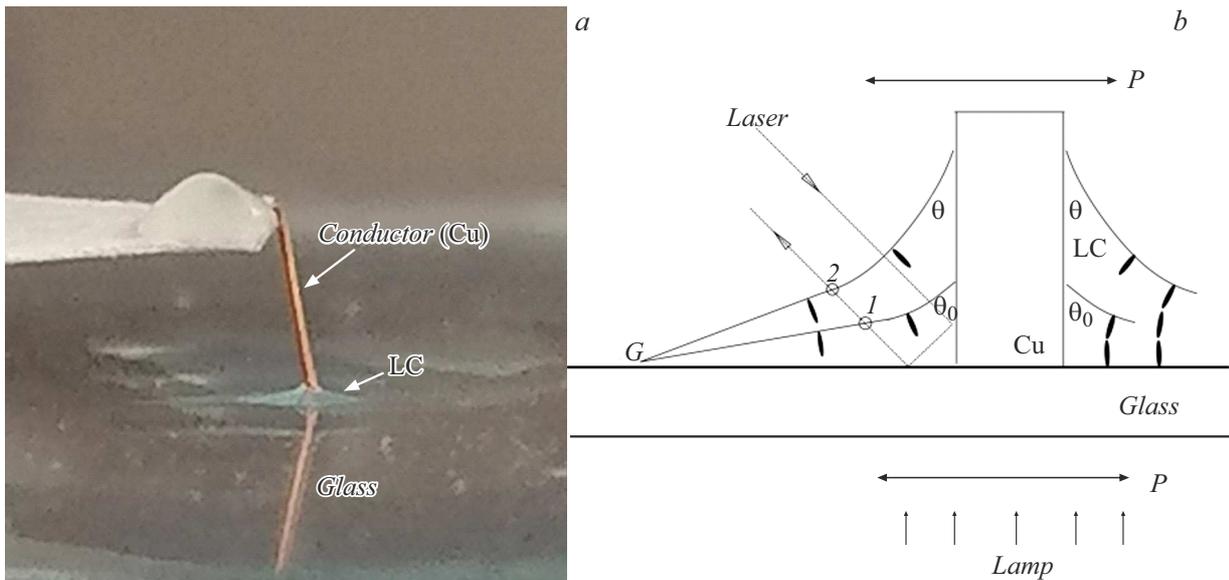


Рис. 1. Схема эксперимента. *a* — общий вид контакта проводник–жидкий кристалл. *b* — элементы схемы эксперимента. LC — жидкий кристалл, *P* — поляризатор, *G* — граница стекло–ЖК. 1 и 2 — точки выхода на поверхности ЖК какого-либо лазерного луча при двух положениях мениска. Cu — цилиндрический проводник диаметром 0.2 mm и высотой 3 mm. θ_0 и θ — начальный и минимальный краевые углы смачивания соответственно.

расположения подложки обеспечивала симметричность влияния силы тяжести на мениск ЖК. Поверхность пластины предварительно обрабатывалась органическими растворителями (диметилформамид, этиловый спирт). Проводник в виде медного цилиндрического столбика прижимался к стеклянной поверхности. Он формировал контакт с ЖК при частичном погружении в слой этого материала (рис. 1, *a*). Наблюдение проводилось при скрещенных поляризаторах в режиме на просвет. Фиксация изображений осуществлялась видеокамерой BR-5101LC-UF (2592 × 1944 пикселей) под управлением программы ScorePhoto 3.1. Измерение временных промежутков производилось по данным фиксированных изображений с точностью 0.1 s. Расположение контакта выбиралось таким образом, чтобы до соприкосновения проводника с поверхностью ЖК и стеклянной поверхностью в этом месте была гомеотропная ориентация ЖК. При такой начальной ориентации молекул ЖК деформация исходного поля директора сопровождалась просветлением поля зрения микроскопа, а при превышении некоторого порога фазовой задержкой между обычными и необычными лучами она сопровождалась появлением цветовой окраски вследствие интерференции поляризованного света. Использовались два источника света: осветительная лампа микроскопа и сфокусированное излучение He–Ne-лазера ЛГН-208Б ($\lambda = 0.63 \mu\text{m}$, выходная мощность 1.5 mW). Свет от лампы попадал на контакт проводник–ЖК без изменения геометрии схемы освещения микроскопа. Оба источника света включались заранее с целью исключения появления наведенного напряжения на проводнике в момент включения источников света. При этом соответствующий

поток света, направленный на контакт, открывался за счет механических шторок.

На рис. 2, *a, b* представлены поляризационные изображения фрагмента поверхности ЖК в окрестности контакта проводник–ЖК при включении потока света от лампы накаливания микроскопа. Рис. 2, *a* соответствует моменту времени 0.1 s после открывания шторки осветительной лампы микроскопа. Хорошо видно, что в указанный момент времени по всему полю зрения в окрестности контакта наблюдается темное поле гомеотропной ориентации ЖК, которая практически соответствует исходной. Имеют место незначительное просветление поля зрения и интерференционное кольцо вокруг проводника. С учетом того, что молекулы цианофенилов ориентируются нормально к свободной поверхности ЖК [13], указанное просветление и наблюдаемое интерференционное кольцо связаны с искривлением поверхности ЖК в окрестности мениска и соответственно с деформацией исходного (гомеотропного) поля директора. С течением времени наблюдалось дальнейшее расширение светлой области деформации ЖК вокруг проводника и появление новых, также расширяющихся интерференционных колец (рис. 2, *b*). После достижения максимальных размеров указанная область деформации ЖК переходит в стадию релаксации до некоторых стационарных размеров. Динамика изменения размера *R* деформированной области ЖК отображена на рис. 3. При освещении контакта проводник–ЖК лазерным излучением (рис. 2, *c*) динамика изменения размеров деформированной области ЖК подобна динамике при освещении лампой накаливания. Различаются только размеры области деформации. При лазерном

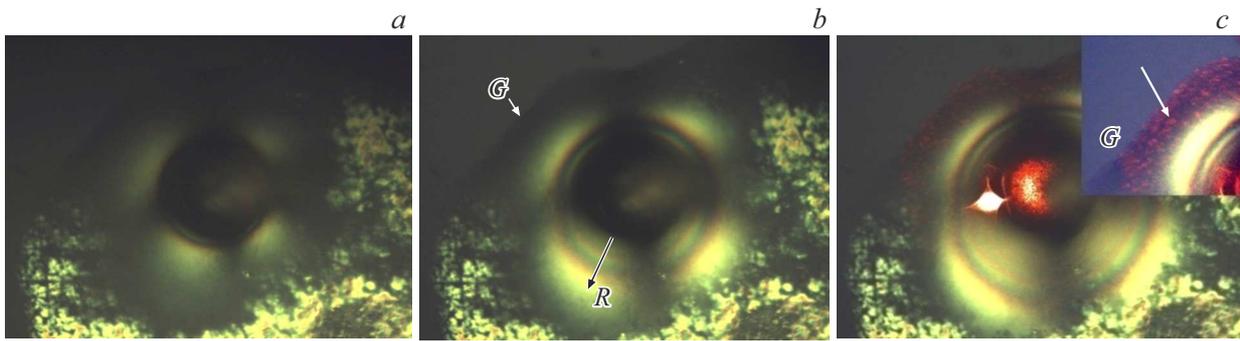


Рис. 2. Поляризационные изображения фрагмента слоя ЖК в окрестности контакта проводник–ЖК. Время после открывания шторки лампы накаливания микроскопа 0.1 (a) и 8 s (b). c — деформация ЖК в окрестности контакта проводник–ЖК при его освещении лазерным излучением (совместно с излучением лампы накаливания). На вставке стрелкой указаны светлые точки пересечения лазерных лучей с поверхностью ЖК.

освещении эта область становится шире и возрастает количество интерференционных колец (рис. 2, c). Каждое интерференционное кольцо (начиная от периферии деформированной области ЖК) означает набег фазы на 2π . Достаточное изменение фазы на соответствующих участках ЖК, а также длительность периода времени максимальной деформации ЖК, составляющая несколько секунд (рис. 3), показывают потенциальную применимость такого способа переориентации ЖК для практических приложений.

Место расположения контакта выбиралось в непосредственной близости от границы ЖК с целью определения характера перемещения мениска при действии излучения. Поскольку граница стекло–ЖК (G) не смещается при включении света и этот факт визуально регистрируется, перемещение мениска должно сопровождаться изменением наклона поверхности ЖК. В свою очередь о характере изменения наклона поверхности ЖК можно судить по визуальному перемещению в горизонтальной плоскости светлых точек (см. вставку на рис. 2, c) на поверхности ЖК при включении лазерного излучения. Каждая такая светлая точка соответствует месту на поверхности ЖК, где определенный дифрагированный лазерный луч после отражения от поверхности проводника и поверхности плоскопараллельной стеклянной пластинки выходит из слоя ЖК (рис. 1, b). В эксперименте обнаруживается, что с момента начала действия излучения и до момента достижения максимального размера деформированной области ЖК светлые точки перемещаются в направлении от проводника к границе стекло–ЖК (G). Такое движение светлых точек означает, что в этот промежуток времени угол наклона плоскости поверхности ЖК увеличивается, и, следовательно, мениск перемещается, поднимаясь вверх по проводнику. Схематически перемещение светлых точек в указанный промежуток времени показано на примере точек 1 и 2 на рис. 1, b. Таким образом, краевой угол смачивания в момент времени максимальной деформации ЖК принимает наименьшее значение θ

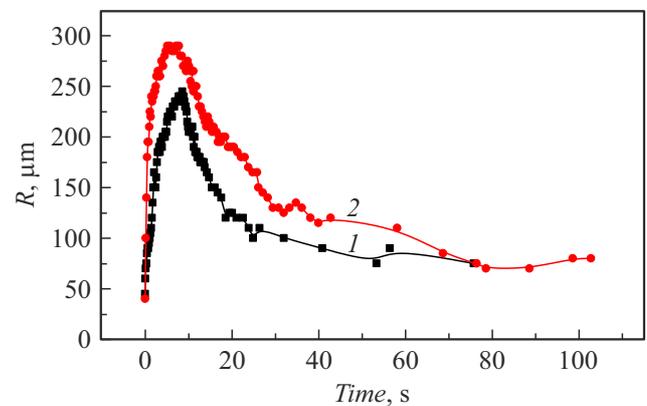


Рис. 3. Зависимость размера R области деформации ЖК от времени действия света. 1 — освещение контакта лампой накаливания, 2 — освещение контакта лазером совместно с лампой накаливания.

(рис. 1, b). Когда область деформации ЖК уменьшается, светлые точки перемещаются в обратном направлении от G к проводнику. Это означает, что в указанный период времени угол наклона плоскости поверхности ЖК уменьшается, мениск опускается, а краевой угол смачивания увеличивается.

Наблюдаемое изменение поверхности ЖК и фактически обусловленное этим изменение исходной ориентации молекул ЖК можно объяснить процессом электросмачивания, которое меняется при освещении проводника. Известно, что увеличение концентрации ионов приводит к уменьшению поверхностного натяжения жидкости. В представленном исследовании уменьшение поверхностного натяжения ЖК можно связать с образованием дополнительных ионов в приэлектродной области проводника вследствие фотоэмиссии электронов в ЖК из проводника при его освещении. Релаксацию деформированной области ЖК можно объяснить двумя процессами: во-первых, ограничением фотоэмиссии электронов в ЖК вследствие появления запирающего

потенциала на поверхности проводника и, во-вторых, экранированием ионов, фотогенерированных в ЖК, посредством имеющихся в ЖК собственных ионов противоположного знака. В результате этих процессов поверхностное натяжение частично восстанавливается к прежним значениям, вследствие чего и величина краевого угла смачивания возвращается к первоначальным значениям.

В заключение отметим, что изменение ориентации ЖК имеет место при освещении медного проводника, для которого работа выхода электрона превышает энергию фотона с $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$, так что для такого проводника классический фотоэффект невозможен. Поэтому можно предположить, что потенциальный барьер для перехода фотоэлектрона через границу проводник–ЖК понижен и, следовательно, при оптимизации свойств контакта проводник–ЖК возможно дальнейшее смещение рабочей длины волны света, при которой осуществляется переориентация ЖК, в сторону увеличения.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J. Jung, H.B. Park, H.Y. Jung, S.E. Jung, S.G. Kim, T.H. Kim, Y.J. Lim, B.C. Ku, M.S. Kim, S.H. Lee, *J. Inform. Display*, **25** (1), 121 (2024). DOI: 10.1080/15980316.2023.2281224
- [2] A. Habibpourmoghadam, *Crystals*, **10** (10), 900 (2020). DOI: 10.3390/cryst10100900
- [3] K. Yuna, T. Nobuyuki, *ChemPhotoChem*, **3** (6), 284 (2019). DOI: 10.1002/cptc.201900034
- [4] L. Lucchetti, F. Simoni, *Liq. Cryst. Rev.*, **3** (2), 79 (2015). DOI: 10.1080/21680396.2015.1043658
- [5] D. Chen, H. Zhao, K. Yan, D. Xu, Q. Guo, L. Sun, F. Wu, V.G. Chigrinov, H.S. Kwok, *Opt. Express*, **27** (20), 29332 (2019). DOI: 10.1364/OE.27.029332
- [6] I.A. Budagovsky, S.A. Shvetsov, A.S. Zolot'ko, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **637** (1), 47 (2016). DOI: 10.1080/15421406.2016.1198663
- [7] I. Budagovsky, A. Kuznetsov, S. Shvetsov, M. Smayev, A. Zolot'ko, A. Bobrovsky, N. Boiko, V. Shibaev, *Polymers*, **12** (2), 356 (2020). DOI: 10.3390/polym12020356
- [8] F. Marinello, D. Ferraro, A. Meggiolaro, S. Cremaschini, A. Zaltron, M. Pierno, G. Mistura, G. Zanchetta, L. Lucchetti, *Crystals*, **14** (1), 1 (2024). DOI: 10.3390/cryst14010001
- [9] L. Chang, H. Liu, Y. Ding, J. Zhang, L. Li, X. Zhang, M. Liu, L. Jiang, *Nanoscale*, **9** (18), 5822 (2017). DOI: 10.1039/c7nr00304h
- [10] S. Li, Y. Fan, Y. Liu, S. Niu, Z. Han, L. Ren, *J. Bionic Eng.*, **18** (3), 473 (2021). DOI: 10.1007/s42235-021-0038-7
- [11] S. Tun, Y.R. Zhao, J.B. Xu, X.W. Li, C. Liu, Q.H. Wang, *Opt. Express*, **32** (3), 3394 (2024). DOI: 10.1364/OE.514344
- [12] Y. Zhu, M.Y. Lam, N. Wang, X. Zhang, *Opt. Express*, **32** (3), 4698 (2024). DOI: 10.1364/OE.515689
- [13] M. Gannon, T. Faber, *Phil. Mag. A*, **37** (1), 117 (1978). DOI: 10.1080/01418617808239166