

06

Локальное восстановление ориентации молекул нематического жидкого кристалла в системе электродов микроконтакт–плоскость

© Э.Б. Кулумбаев, С.И. Кучеев

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия
E-mail: kucheev@bsuedu.ru

Поступило в Редакцию 2 июля 2025 г.

В окончательной редакции 16 августа 2025 г.

Принято к публикации 14 сентября 2025 г.

Экспериментально показано, что в окрестности электрического контакта через микропору в диэлектрической пленке с плоским электродом (микроконтакт) к слою планарно ориентированного нематического жидкого кристалла с положительной анизотропией диэлектрической проницаемости при наложении переменного напряжения с постоянным смещением оптический отклик не соответствует классической переориентации молекул в эффекте Фредерика. Восстановление планарной ориентации молекул и соответствующий рост фазовой задержки в радиальном к микроконтакту направлении могут быть обусловлены уменьшением величины электрического поля из-за влияния накопленного в результате инжекции с микроконтакта объемного электрического заряда.

Ключевые слова: эффект Фредерика, ионная инжекция, фазовая задержка, волновой фронт.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.02.62066.20427

Жидкие кристаллы (ЖК) широко применяются в приборах отображения и обработки оптической информации благодаря свойству электрически управляемого двулучепреломления. Однако задача изменения направления фронта световой волны за счет управляемой фазовой задержки между обычным и необычным лучами в ЖК-устройствах остается актуальной, поскольку возможности известных способов создания непрерывного пространственного профиля фазовой задержки имеют ряд недостатков. Так, применение пространственных модуляторов света, выполненных по технологии LCOS [1], мало пригодно для создания простых, миниатюрных и недорогих оптических ЖК-элементов с минимальным внешним управлением, а специальные методы обработки поверхностей или объема ЖК [2–4], жестко фиксирующие переориентированные молекулы ЖК, практически исключают применение таких ЖК-устройств в изменяющихся условиях.

Цель работы заключалась в исследовании электрооптического отклика в области микроконтакта планарно ориентированного ЖК в ячейке, к плоским электродам которой приложено переменное напряжение с постоянным смещением, и установлении возможности осуществляемой в плоскости ЖК-слоя в окрестности микроконтакта пространственной модуляции фронта световой волны за счет фазовой задержки.

Эксперименты проводились с ЖК-ячейками, структура которых схематически показана на рис. 1: нижняя подложка — пластинка монокристаллического кремния *n*-типа проводимости с удельным сопротивлением $4.5 \Omega \cdot \text{см}$, пассивированная термически выращенной пленкой окиси кремния толщиной около $0.4 \mu\text{m}$; верхняя — стеклянная пластинка с электропроводящей пленкой окиси индия-олова (ITO). Планарная ориентация

нематического ЖК 4-*n*-пентил-4'-цианобифенил (5CB) достигалась натиранием пленок полимида, нанесенных на поверхности пленки окиси кремния и прозрачного электрода. Толщина ЖК-слоя $10 \mu\text{m}$ задавалась фотопластиковыми прокладками. Управляющее напряжение представляло собой суперпозицию переменной составляющей U_{ac} с частотами $f_1 \approx 75 \text{ Hz}$ и $f_2 \approx 1.5 \cdot 10^3 \text{ Hz}$ (выбраны при допущении, что для f_1 преимущественным является дрейфовый режим протекания тока, а для f_2 — диэлектрический, что согласуется с характерным временем релаксации объемного заряда в нематике [5]) и постоянного с отрицательной полярностью

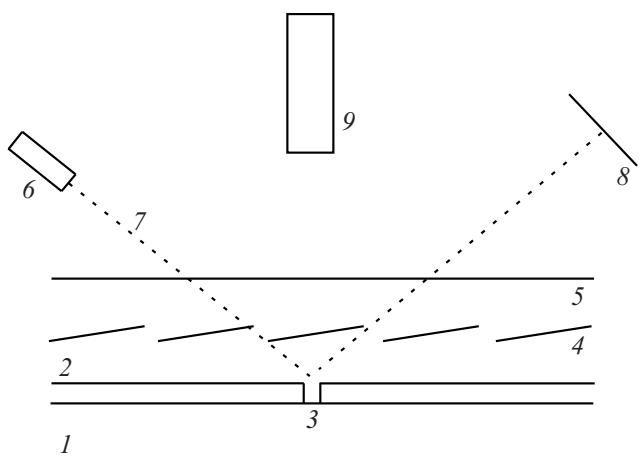


Рис. 1. Схема структуры ЖК-ячейки и элементов экспериментальной установки. 1 — Si-подложка, 2 — пленка SiO_2 , 3 — пора в пленке SiO_2 , 4 — ЖК, 5 — прозрачный электрод, 6 — Не-Не-лазер, 7 — пучок лазерного излучения, 8 — экран наблюдения, расположенный на расстоянии $\sim 21 \text{ см}$ от ЖК-ячейки, 9 — поляризационный микроскоп.

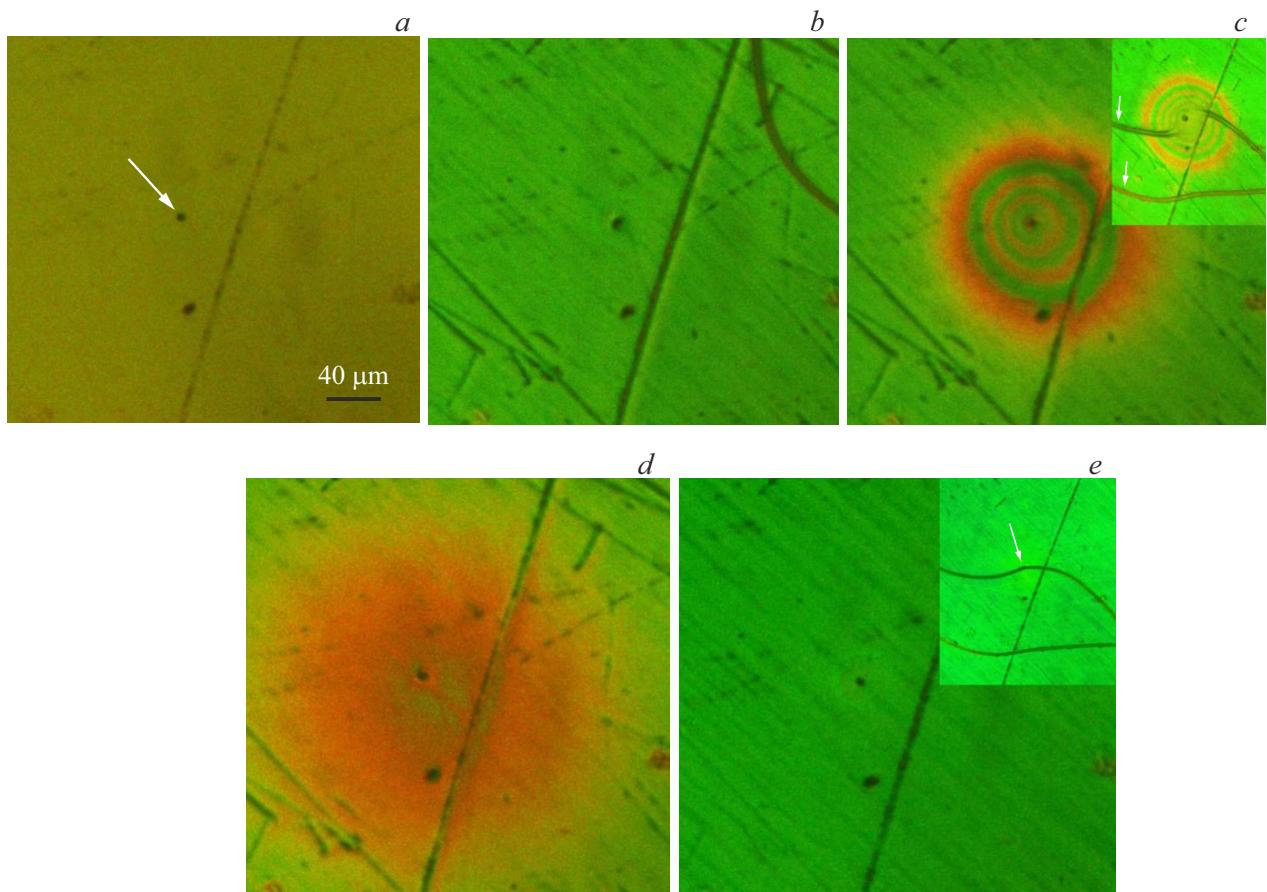


Рис. 2. Электрооптические изменения в ЖК в области микроконтакта. *a* — исходная планарная текстура ($U_{ac} = U_{dc} = 0$); *b* — текстура переориентированного ЖК в эффекте Фредерикса ($U_{ac} = 10$ В, $U_{dc} = 0$, f_1); *c* — фрагмент формирования области ИК ($U_{ac} = 9.6$ В, $U_{dc} = 4$ В, f_1), на вставке приведены дефекты „стенка“ (отмечены стрелками) при $U_{ac} = 6.2$ В, $U_{dc} = 4$ В, f_1 ; *d* — фрагмент релаксации области ИК ($U_{ac} = 10$ В, $U_{dc} = 0$, f_1); *e* — текстура переориентированного ЖК в эффекте Фредерикса ($U_{ac} = 5.5$ В, $U_{dc} = 4$ В, f_2), на вставке — дефект „стенка“ проходит через центр области ЖК без ИК в окрестности микроконтакта, отмеченного стрелкой ($U_{ac} = 5.5$ В, $U_{dc} = 4$ В, f_2).

на Si-подложке напряжения U_{dc} , величина которого не приводила к возникновению электроконвективных процессов в ЖК. Эксперименты проводились при комнатной температуре (~ 22 °С).

Электрическим микроконтактом к слою ЖК со стороны нижней подложки служил фрагмент неокисленной поверхности кремния, ограниченный размером поры ~ 10 μm в пленке оксида кремния (рис. 1).

Наблюдение проводилось с помощью поляризационного микроскопа со скрещенными поляризаторами в режиме на отражение. Ячейка располагалась на предметном столике микроскопа таким образом, чтобы ось легкого ориентирования молекул нематического ЖК, заданная направлением натирания ориентирующего слоя, была под углом 45° к плоскости поляризации поляризатора или анализатора. Такое расположение ячейки обеспечивало максимально светлое поле зрения в микроскопе. На рис. 2, *a* представлено изображение фрагмента ячейки в окрестности поры (показана стрелкой), соот-

ветствующее исходному состоянию ориентации молекул ЖК.

При наложении на ячейку переменного напряжения U_{ac} молекулы ЖК переориентируются (эффект Фредерикса) и область наблюдения становится однородно псевдоокрашенной из-за интерференции поляризованного света. Известно, что зависимость пропускания ЖК-слоя от приложенного напряжения в эффекте Фредерикса имеет осциллирующий вид [5], причем в последовательности максимумов интенсивности выбранного цвета последний максимум наиболее широкий и хорошо отделен по величине напряжения от предыдущих максимумов. Поэтому для получения максимальной контрастности оптического отклика амплитуды переменного напряжения U_{ac} с частотами f_1 и f_2 соответствовали последнему по порядку максимуму в последовательности появления зеленого цвета (рис. 2, *b*, *e*).

После подключения дополнительного к переменной составляющей U_{ac} постоянного напряжения U_{dc} в окрестности микроконтакта происходят изменения зеленого

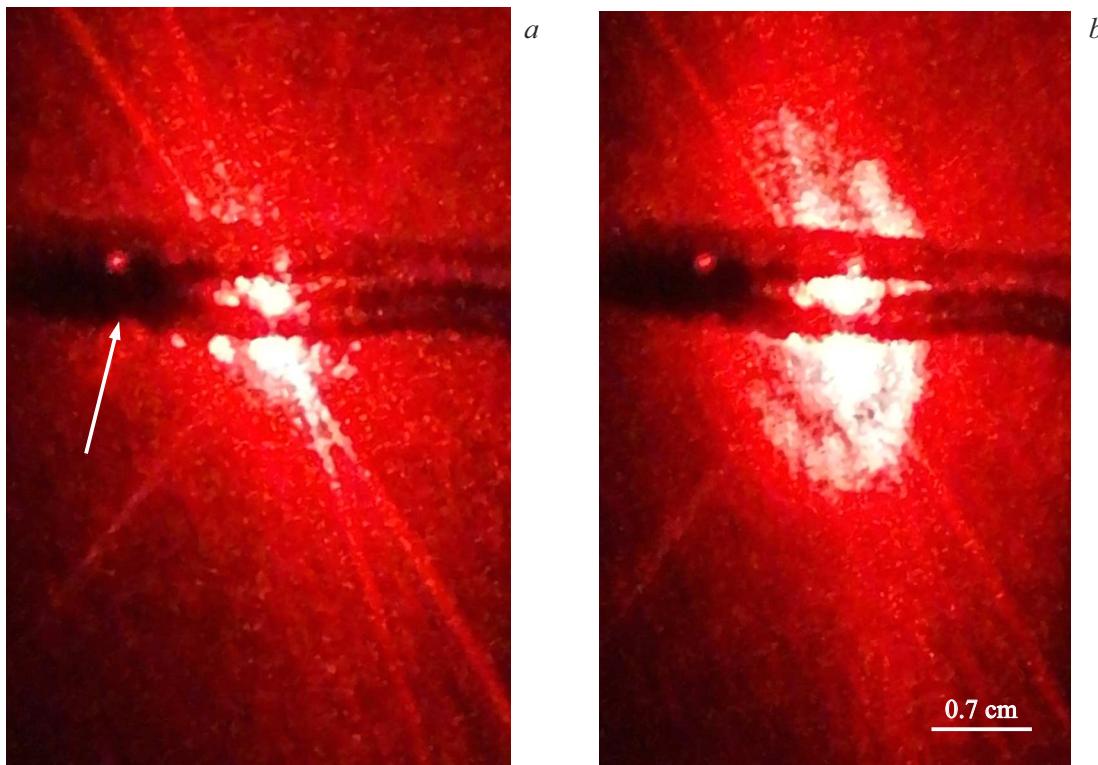


Рис. 3. Распределение интенсивности излучения на экране наблюдения лазерного пучка, прошедшего через область ЖК без ИК (a) и с ИК (b). Частота, Hz: a — $1.5 \cdot 10^3$, b — 75. Переменное напряжение U_{ac} , V: a — 5.5, b — 6.2. Постоянное напряжение U_{dc} , V: a, b — 4. Стрелка указывает на тень от маски, которая блокирует лазерные пучки: первый — отраженный от стеклянной пластиинки, второй — отраженный от Si-подложки, не испытавший изменений при прохождении ЖК.

цвета поля наблюдения. Появляется область в виде пятна другого цвета, которая расширяется и затем трансформируется в кольцо. Этот процесс повторяется несколько раз. В результате устанавливается аксиально-симметричная картина интерференционных колец (ИК) (рис. 2, c).

При уменьшении напряжения U_{ac} до значения, при котором наступает предыдущий максимум зеленого цвета поля наблюдения вне области с ИК, сама эта область увеличивается в размерах и появляется новое кольцо (область с ИК на вставке к рис. 2, c). При дальнейшем уменьшении напряжения U_{ac} появившееся центральное пятно увеличивается в размерах, а цвет его становится неотличимым от цвета исходной планарной текстуры ЖК (рис. 2, a). С момента появления неисчезающего центрального пятна количество колец вместе с центральным пятном не превышает количество осцилляций пропускания ячейки (вне области ИК), которые происходят при увеличении напряжения от порога эффекта Фредерикса до значения U_{ac} , которое соответствует последнему максимуму зеленого цвета. После выключения постоянного напряжения U_{dc} начинается процесс релаксации области с ИК, в котором происходит одновременное расширение размера этой области и последовательное исчезновение внутренних ИК. С течением времени область достигает определенных максимальных

размеров и становится однородно псевдоокрашенной (см., например, рис. 2, d). После достижения максимума происходит длительная (в несколько десятков минут) релаксация размеров с постепенной заменой псевдоцвета релаксирующей области на зеленый.

Экспериментально установлено существенное влияние частоты переменного напряжения на оптический отклик области с ИК. Переключение частоты переменного напряжения с f_1 на f_2 (при действии U_{ac} и U_{dc} или при выключенном U_{dc} в процессе релаксации) приводит к переходу ЖК в состояние однородной ориентации, идентичной действию только переменной составляющей напряжения U_{ac} без каких-либо остаточных следов (рис. 2, e). При обратном переключении переменного напряжения на частоту f_1 вся область возвращается в то же самое состояние ориентации (рис. 2, c, d), в котором она была до переключения на переменное напряжение с частотой f_2 .

Область ЖК с ИК зондировалась несфокусированным пучком лазерного излучения (рис. 1). Пучок излучения направлялся на ячейку под углом $\sim 45^\circ$ и после отражения от кремниевой подложки попадал на экран наблюдения (рис. 1). На рис. 3 представлены фотографии экрана наблюдения, иллюстрирующие картины распределения интенсивности света для переменного напряжения с частотами f_2 (a) и f_1 (b). Отметим, что

при отсутствии управляющего напряжения распределение интенсивности света идентично представленному на рис. 3, *a*, что свидетельствует об отсутствии отклонения волнового фронта при переориентации молекул ЖК в эффекте Фредерикса. И только в случае наличия ИК при частоте f_1 переменного напряжения имеет место отклонение фрагментов волнового фронта лазерного пучка от первоначального направления, оценка которого дает величину $\sim 4^\circ$. Избирательное зондирование области с ИК сфокусированным пучком лазерного излучения показало, что за отклонение волнового фронта на большие углы отвечают внутренние области с ИК, тогда как периферийные кольцевые зоны отклоняют волновой фронт на меньшие углы.

Непрерывное изменение ориентации молекул в области с ИК обуславливает постепенное уменьшение фазовой задержки (Φ_3) от максимального значения в центре области к ее периферии. Тогда относительное значение Φ_3 можно определить в любом месте наблюдения, считая, что на ширине первого интерференционного кольца Φ_3 увеличится на $\sim 2\pi$ относительно Φ_3 вне области с ИК, на следующем соседнем кольце увеличится еще на $\sim 2\pi$ относительно предыдущего кольца и т. д. Возрастание Φ_3 в радиальном направлении в плоскости ЖК-слоя служит причиной отклонения фронта лазерного луча (рис. 3, *a*).

Интерпретация полученных результатов основывается на предположении, что восстановление ориентации ЖК в области с ИК происходит вследствие экранирования электрического поля с частотой f_1 накопленным в результате инъекции с микроконтакта объемным электрическим зарядом, обладающим осевой симметрией в системе электродов микроконтакт–плоскость [6–9]. Поэтому влияние ориентирующих поверхностей на молекулы ЖК будет возрастать, а электрического поля уменьшаться в радиальном направлении к оси. Тогда интерференционная картина в виде колец (рис. 2) с осевой симметрией есть не что иное, как развертка в плоскости ячейки распределения пропускания поляризованного света ЖК-слоя от величины электрического поля.

Косвенным подтверждением уменьшения электрического поля с частотой f_1 к центру области с ИК (как минимум до пороговых значений в эффекте Фредерикса) являются следующие экспериментальные факты. После кратковременного прерывания действия переменного напряжения в ЖК-слое могут формироваться дефекты типа „стенка“ [5]. Такой вид дефектов в нематике образуется при напряжениях выше порога эффекта Фредерикса, причем ширина „стенки“ одинакова по всей ее длине (см., например, нижнюю „стенку“ на вставке к рис. 2, *c*). Однако ширина верхней „стенки“, которая образовалась в области с ИК, возрастает к ее центру, а в самом центре „стенка“ не формируется (см. вставку на рис. 2, *c*). При переключении на переменное напряжение с частотой f_2 та же самая „стенка“ в окрестности микроконтакта не

имеет разрыва, и ее ширина в любой точке ЖК-слоя одинакова (см. вставку на рис. 2, *e*).

Таким образом, в работе продемонстрирован новый способ создания непрерывного пространственного профиля Φ_3 в плоскости ЖК-слоя, обладающего аксиальной симметрией. После формирования области с восстановленной ориентацией молекул ЖК становится возможным изменить Φ_3 на величину, кратную $\sim 2\pi$, в слое ЖК в зоне произвольно выбранного интерференционного кольца переключением частоты и амплитуды переменного напряжения, что представляется актуальным для электрооптических приложений.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] H. Yang, B. Robertson, P. Wilkinson, D. Chu, Opt. Express, **24** (11), 12240 (2016). DOI: 10.1364/OE.24.012240
- [2] M.N. Miskiewicz, M.J. Escuti, Opt. Express, **22** (10), 12691 (2014). DOI: 10.1364/OE.22.012691
- [3] N.V. Tabiryan, S.V. Serak, D.E. Roberts, D.M. Steeves, B.R. Kimball, Opt. Express, **23** (20), 25783 (2015). DOI: 10.1364/OE.23.025783
- [4] Y. Xu, D. Weng, Y. Zhang, X. Li, S.T. Wu, Opt. Express, **24** (16), 17746 (2016). DOI: 10.1364/OE.24.017746
- [5] L.M. Blinov, *Structure and properties of liquid crystals* (Springer, Dordrecht–Heidelberg–London–N.Y., 2011).
- [6] А.И. Жакин, УФН, **182** (5), 495 (2012). DOI: 10.3367/UFNr.0182.201205b.0495 [A.I. Zhakin, Phys. Usp., **55** (5), 465 (2012). DOI: 10.3367/UFNe.0182.201205b.0495].
- [7] Б.Л. Смородин, ЖЭТФ, **161** (1), 137 (2022). DOI: 10.31857/S0044451022010126 [B.L. Smorodin, JETP, **134** (1), 112 (2022). DOI: 10.1134/S1063776121120153].
- [8] В.А. Ильин, А.Н. Мордвинов, Д.А. Петров, ЖЭТФ, **147** (1), 181 (2015). DOI: 10.7868/S0044451015010174 [V.A. Il'in, A.N. Mordvinov, D.A. Petrov, JETP, **120** (1), 161 (2015). DOI: 10.1134/S1063776115010124].
- [9] А.А. Коротков, Ю.К. Стишков, ЖТФ, **90** (8), 1267 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.08.49535.383-19 [A.A. Korotkov, Yu.K. Stishkov, Tech. Phys., **65** (8), 1217 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220080101].