

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: kuccheev@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 Фредерикса. 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 Фредерикса, ионная инжекция, фазовая задержка, волновой фронт.

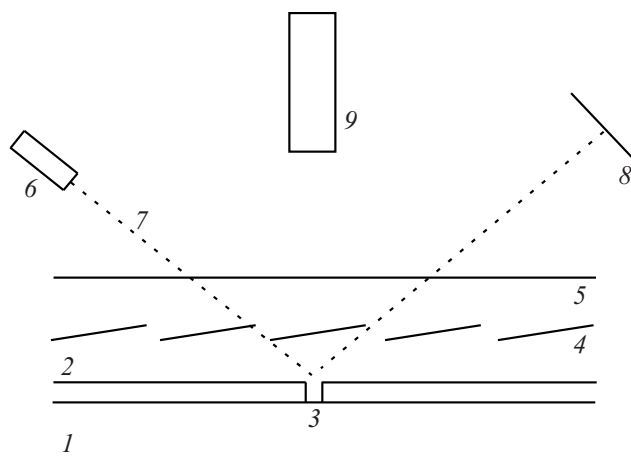
DOI: 10.61011/PJTF.2026.02.62066.20427

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 обыкновенным и необыкновенным 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.

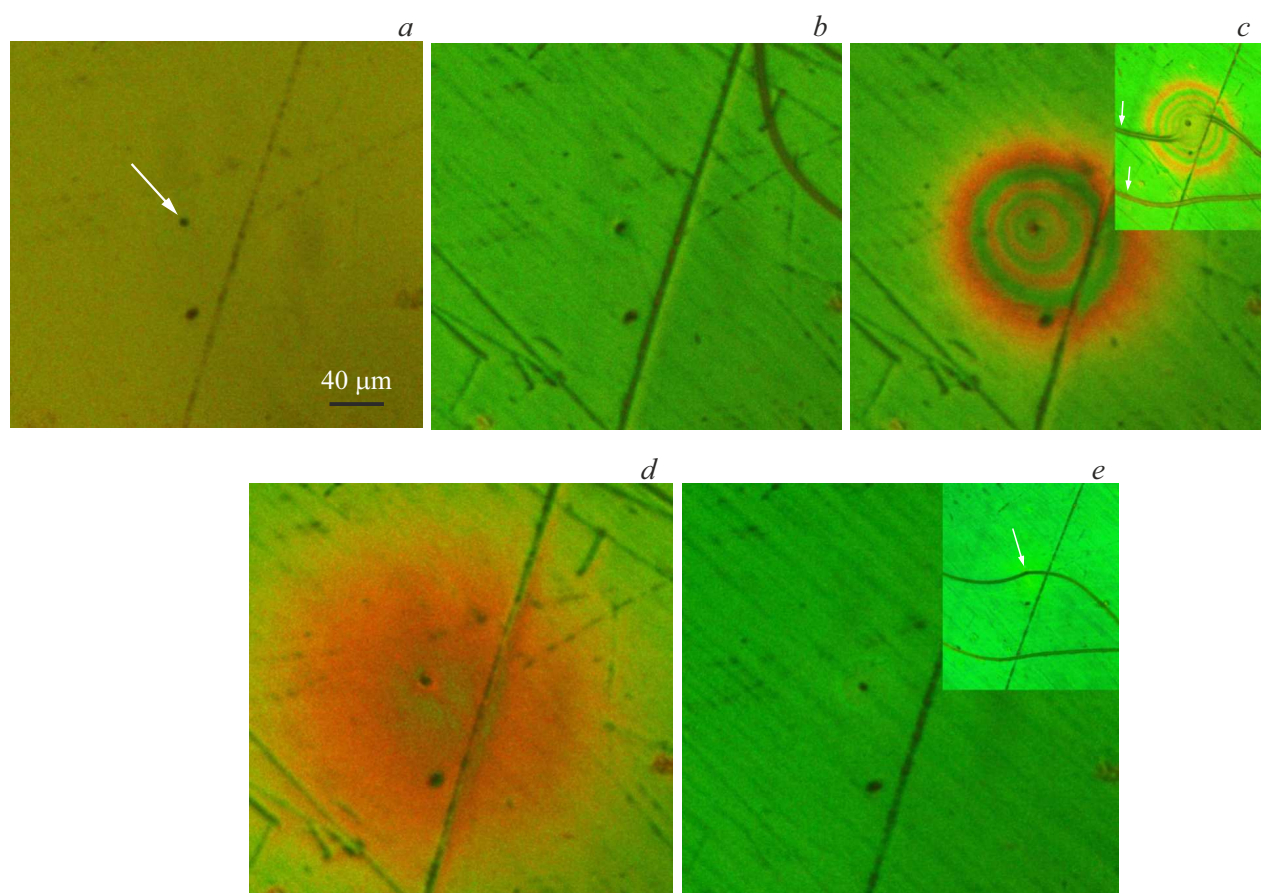
Цель работы заключалась в исследовании электрооптического отклика в области микроконтакта планарно ориентированного ЖК в ячейке, к плоским электродам которой приложено переменное напряжение с постоянным смещением, и установлении возможности осуществляемой в плоскости ЖК-слоя в окрестности микроконтакта 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  $0.4 \mu\text{м}$ ; верхняя — стеклянная пластинка с электропроводящей пленкой окиси индия-олова (ИТО). Планарная ориентация

нематического ЖК 4-н-пентил-4'-цианобифенил (5CB) достигалась натиранием пленок полиимида, нанесенных на поверхности пленки окиси кремния и прозрачного электрода. Толщина ЖК-слоя  $10 \mu\text{м}$  задавалась фторопластовыми 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  $\text{SiO}_2$ , 3 — пора в пленке  $\text{SiO}_2$ , 4 — ЖК, 5 — прозрачный электрод, 6 — He-Ne-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 ( $U_{ac} = 10 \text{ V}$ ,  $U_{dc} = 0$ ,  $f_1$ ); *c* — фрагмент формирования области ИК ( $U_{ac} = 9.6 \text{ V}$ ,  $U_{dc} = 4 \text{ V}$ ,  $f_1$ ), на вставке приведены дефекты „стенка“ (отмечены стрелками) при  $U_{ac} = 6.2 \text{ V}$ ,  $U_{dc} = 4 \text{ V}$ ,  $f_1$ ; *d* — фрагмент релаксации области ИК ( $U_{ac} = 10 \text{ V}$ ,  $U_{dc} = 0$ ,  $f_1$ ); *e* — текстура переориентированного ЖК в эффекте Фредерикса ( $U_{ac} = 5.5 \text{ V}$ ,  $U_{dc} = 4 \text{ V}$ ,  $f_2$ ), на вставке — дефект „стенка“ проходит через центр области ЖК без ИК в окрестности микроконтакта, отмеченного стрелкой ( $U_{ac} = 5.5 \text{ V}$ ,  $U_{dc} = 4 \text{ V}$ ,  $f_2$ ).

на Si-подложке напряжения  $U_{dc}$ , величина которого не приводила к возникновению электроконвективных процессов в ЖК. Эксперименты проводились при комнатной температуре ( $\sim 22^\circ \text{C}$ ).

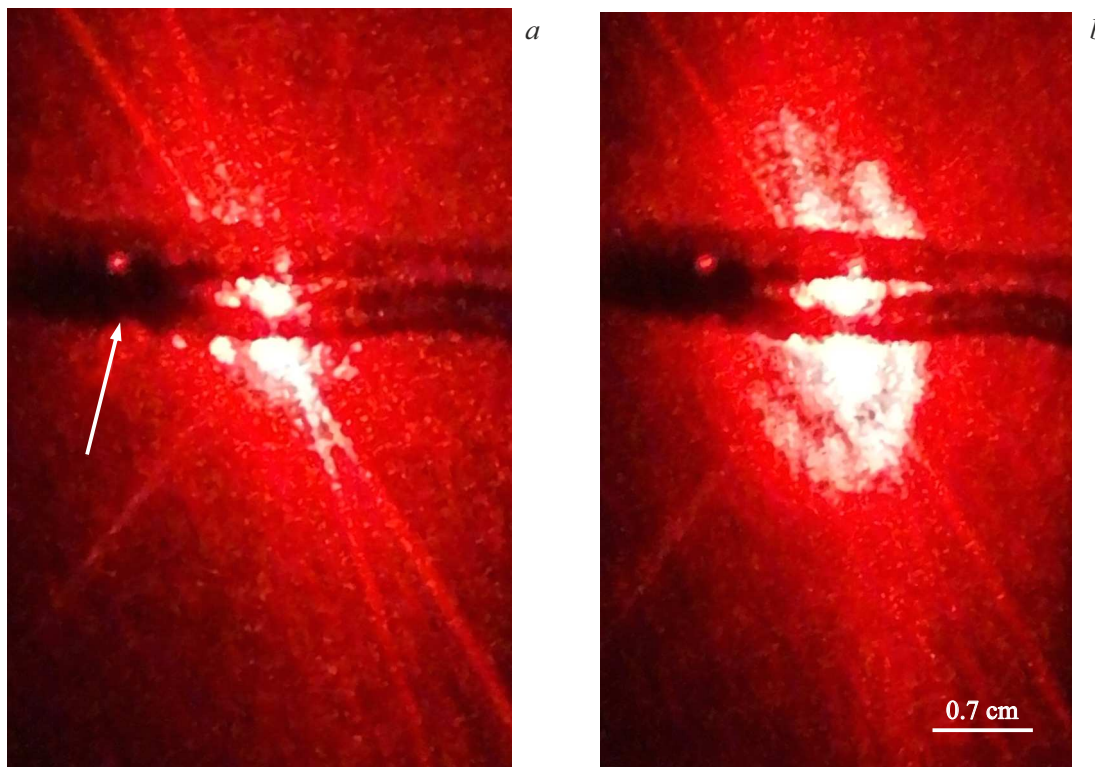
Электрическим микроконтактом к слою ЖК со стороны нижней подложки служил фрагмент неокисленной поверхности кремния, ограниченный размером поры  $\sim 10 \mu\text{m}$  в пленке окиси кремния (рис. 1).

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  $45^\circ$  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 пластинки, второй — отраженный от Si-подложки, не испытавший изменений при прохождении через 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 не исчезающего центрального пятна количество колец вместе с центральным пятном не превышает количество осциллиций 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, а, 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 ( $\Phi_3$ ) от максимального значения в центре области к ее периферии. Тогда относительное значение  $\Phi_3$  можно определить в любом месте наблюдения, считая, что на ширине первого интерференционного кольца  $\Phi_3$  увеличится на  $\sim 2\pi$  относительно  $\Phi_3$  вне области с ИК, на следующем соседнем кольце увеличится еще на  $\sim 2\pi$  относительно предыдущего кольца и т.д. Возрастающие  $\Phi_3$  в радиальном направлении в плоскости ЖК-слоя служат причиной отклонения фронта лазерного луча (рис. 3, а).

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, с). 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, с). 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, е).

Таким образом, в работе продемонстрирован новый способ создания непрерывного пространственного профиля  $\Phi_3$  в плоскости ЖК-слоя, обладающего аксиальной симметрией. После формирования области с восстановленной ориентацией молекул ЖК становится возможным изменить  $\Phi_3$  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].