Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2026. Т. 26, № 3. С. 55–64
Liquid Crystals and their Application. 2026. Vol. 26, № 3. P. 55–64
ISSN 1991–3966 (print), 2499–9644 (online), Journal homepage: http://nano.ivanovo.ac.ru/journal/ru/

Физика

Научная статья
УДК: 532.783

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ НЕМАТИКА НА ДИНАМИКУ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ ИНДУЦИРОВАННОГО ИЗМЕНЕНИЯ ФАЗЫ ПРОХОДЯЩЕГО СВЕТА

К.А. Фейзер[1], М.А. Лесной[1], М.Н. Крахалев[1,2,*], В.С. Сутормин[1], В.Я. Зырянов[1]

[1]Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
[2]Институт инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского федерального университета, Красноярск, Россия

И Н Ф О Р М А Ц И Я

История статьи:
Поступила 15.06.2026
Одобрена 10.08.2026
Принята 17.08.2026

Ключевые слова:
нематический жидкий кристалл,
электрооптический отклик,
фазовая задержка,
время переключения

А Н Н О Т А Ц И Я

Ключевая характеристика жидкокристаллических элементов (ЖК) – динамика отклика – нетривиальным образом зависит от толщины слоя жидкого кристалла d_0. Исследовано влияние d_0 на диапазон управляющих напряжений и времена переключения между соседними уровнями фазы, отличающимися на π/9. На примере широко известной нематической смеси E7 проведены детальные измерения динамических характеристик при разных d_0 в интервале от 2,02 мкм до 3,82 мкм. Максимум приложенного напряжения составлял 3,3 В, что соответствует характерному значению для пространственных модуляторов света на основе жидкого кристалла на кремнии (LCOS). Увеличение толщины жидкокристаллического слоя от 2,02 до 3,82 мкм приводит к уменьшению диапазона управляющих напряжений, при котором изменение фазы составляет π (для λ = 632,8 нм), от 2,28 В до 1,74 В. В области высоких напряжений, близких к 3,3 В, времена переключения растут с увеличением d_0. Для низких управляющих напряжений зависимость динамики отклика от d_0 немонотонная, времена переключения уменьшаются с ростом толщины слоя жидкого кристалла до 2,94 мкм и увеличиваются с дальнейшим ростом d_0. Полученные данные представляют интерес для разработки матричных ЖК систем с улучшенными динамическими характеристиками, где допустимый диапазон напряжений ограничен конструктивными особенностями управляющих элементов пикселей.

DOI:
10.18083/LCAppl.2026.3.55

EDN:
https://elibrary.ru/pxdiza

Для цитирования:
Фейзер К.А., Лесной М.А., Крахалев М.Н., Сутормин В.С., Зырянов В.Я. Влияние толщины слоя нематика на динамику электрически индуцированного изменения фазы проходящего света // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2026. Т. 26, № 3. С. 55–64.

© Фейзер К.А., Лесной М.А., Крахалев М.Н., Сутормин В.С., Зырянов В.Я., 2026
*Адрес для переписки: kmn@iph.krasn.ru

Physics

Research Article

EFFECT OF NEMATIC LAYER THICKNESS ON DYNAMICS OF ELECTRICALLY INDUCED PHASE CHANGE OF TRANSMITTED LIGHT

K.A. Feizer[1], M.A. Lesnoy[1], M.N. Krakhalev[1,2,*], V.S. Sutormin[1], V.Ya. Zyryanov[1]

[1]*Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia*
[2]*Institute of Engineering Physics and Radio Electronics, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia*

ARTICLE INFO:

Article history:
Received 15 June 2026
Approved 10 August 2026
Accepted 17 August 2026

Key words:
nematic liquid crystal,
electro-optical response,
phase delay,
switching time

ABSTRACT

A key characteristic of liquid-crystal elements is response time. It depends in a non-trivial way on the thickness d_0 of liquid-crystal layer. The effect of d_0 on the control voltage range and switching times between adjacent light phase levels differing by π/9 is investigated. Using the widely known nematic E7 mixture as an example, detailed measurements of dynamic properties at various d_0 values ranging from 2.02 to 3.82 μm are performed. The maximum applied voltage is 3.3 V, which is typical for liquid crystal on silicon (LCOS) spatial light modulators. Increasing the thickness of the liquid crystal layer from 2.02 to 3.82 μm results in a reduction of the range of driving voltages at which the phase changes to π (at λ = 632,8 nm), from 2.28 to 1.74 V. In the high-voltage range close to 3.3 V, switching times increase as d_0 rises. For low driving voltages, the relationship between response dynamics and d_0 is non-monotonic: switching times decrease as the nematic layer thickness increases up to 2.94 μm, and then switching times increase as d_0 continues to rise. The data obtained are of interest for the development of matrix liquid-crystal systems with improved dynamic characteristics, where the permissible voltage range is limited by the design features of pixel control elements.

DOI:
10.18083/LCAppl.2026.3.55

EDN:
https://elibrary.ru/pxdiza

For citation:
Feizer K.A., Lesnoy M.A., Krakhalev M.N., Sutormin V.S., Zyryanov V.Ya. Effect of nematic layer thickness on dynamics of electrically induced phase change of transmitted light. *Liq. Cryst. and their Appl*., 2026, **26** (3), 55–64 (in Russ.).

© Feizer K.A., Lesnoy M.A., Krakhalev M.N., Sutormin V.S., Zyryanov V.Ya., 2026
*Corresponding author: kmn@iph.krasn.ru

Введение

Жидкие кристаллы (ЖК) являются мягкой материей с анизотропией свойств [1]. Благодаря этому они нашли широкое применение в устройствах отображения информации [2, 3], пространственных модуляторах света [4, 5], дифракционных решетках [6, 7], перестраиваемых оптических фильтрах [8], сенсорах [9, 10] и др. Во многих технических решениях управление ЖК происходит с помощью электрического поля, и ключевыми характеристиками являются контрастное отношение и величина изменения фазы, диапазон управляющих напряжений, скорость переключения [11]. Увеличение скорости переключения ЖК можно достичь путем оптимизации параметров ЖК [12, 13], выбором соответствующих граничных условий и исходной ориентации ЖК [14, 15], схемы управляющих напряжений [16–18], геометрии электродов [19], добавлением к ЖК наночастиц или полимерной сетки [20, 21], увеличением температуры ЖК [22], подбором соответствующей толщины ЖК слоя [23, 24]. Последний подход является одним из наиболее эффективных, поскольку зависимость времен переключения нематических ЖК от толщины слоя является степенной [25]. Соответственно, незначительное уменьшение толщины слоя ЖК может приводить к существенному увеличению скорости переключения ЖК.

Выбор исходной ориентации ЖК, а также возможности к уменьшению толщины ЖК-слоя ограничены необходимостью добиться диапазона электроиндуцированного изменения разности фаз не менее π в случае работы устройства в режиме модуляции интенсивности света или не менее 2π при работе в режиме модуляции фазы световой волны [26]. С этой точки зрения оптимальным является выбор исходной планарной (для ЖК с положительной анизотропией диэлектрической проницаемости $\Delta\varepsilon > 0$) или гомеотропной (при $\Delta\varepsilon < 0$) ориентации директора, позволяющей добиться большего диапазона изменения фазы в сравнении с другими исходными конфигурациями директора, например, в *pi*-ячейке [14]. С другой стороны, выбор толщины слоя ЖК ограничен возможным диапазоном управляющих напряжений, что особенно актуально в случае пространственных модуляторов света, работающих на отражении [26]. Это обусловлено тем, что при использовании управляющих напряжений, близких к пороговому значению, время переключения может увеличиться в несколько раз в сравнении со временем свободной релаксации ЖК τ_0 [25].

В представленной работе рассмотрено влияние толщины слоя нематика с планарной ориентацией на времена переключения и диапазон управляющих напряжений. Результаты получены для вариации толщины слоя ЖК от 2,02 мкм до 3,82 мкм, максимальном управляющем напряжении 3,3 В, характерном для пространственных модуляторов света на основе жидкого кристалла на кремнии (*liquid crystal on silicon spatial light modulators, LCOS SLM*) [26], и диапазона управляющих напряжений, соответствующих изменению фазы световой волны на π.

Материалы и методы

Исследование влияния толщины d_0 ЖК-слоя на динамику переключения проводилось на клиновидной ячейке, собранной с использованием стеклянных подложек с ITO покрытием, на которые методом центрифугирования наносились пленки полиимида АД-9103 в качестве ориентанта. Пленки полимера подвергались однонаправленному натиранию. Затем подложки склеивались так, чтобы направления натирки были антипараллельными и ориентированными вдоль ребра клина. Для получения клиновидного зазора при склейке подложек использовались стеклянные спейсеры диаметром 2 мкм на одном краю ячейки и 4 мкм на противоположном краю. Толщины зазора измерялись спектральным методом до заполнения ячейки ЖК в тех точках, с которых далее снимался электрооптический отклик. Для этого использовался ПЗС спектрометр CCS200 (*ThorLabs*), излучение на образец заводилось с помощью оптоволокна диаметром 105 мкм без использования коллиматора. Оптоволокно располагалось вплотную к ЖК-ячейке. Измерение угла клина α проводилось до заполнения ЖК-ячейки по расстоянию между интерференционными полосами равной толщины, наблюдаемыми в отраженном монохроматическом ($\lambda_{green} = 546$ нм) свете на микроскопе *Axio Imager.A1a* с объективом x5/0,16. Измерения показали, что угол клина α монотонно увеличивался от значения 0,1123 мрад до 0,1459 мрад при движении от ребра клина в ортогональном направлении. ЖК-ячейка заполнялась нематической смесью E7 в изотропной фазе, дальнейшие исследования проводились при температуре 23 °C.

Измерение электрооптического отклика ЖК-ячейки проводилось по стандартной методике [12] с использованием He-Ne лазера (λ = 632,8 нм) в качестве источника света (рис. 1, *a*). Ячейка располагалась между скрещенными поляризаторами, направление натирки составляло угол 45° с направлением поляризаторов. Перед анализатором располагалась четвертьволновая фазовая пластинка, ориентированная быстрой осью параллельно, или под углом 45° к направлению анализатора. Интенсивность прошедшего излучения измерялась с помощью кремниевого фотодетектора PDA100A-EC (Thor-Labs). Подача напряжения на ЖК-ячейку и снятие сигнала с фотодетектора производились с помощью стандартизированной радиоэлектронной конструкции для установки и объединения отдельных модулей (крейтовая система) LTR-EU-8-1 с модулями LTR34-8 и LTR210 (Lcard). Лазерный луч фокусировался с помощью линзы так, что диаметр светового луча на образце составлял 320 мкм [27]. Измерения проводились для восьми различных толщин ЖК-слоя. Для каждой толщины измерения проводились в 2 этапа.

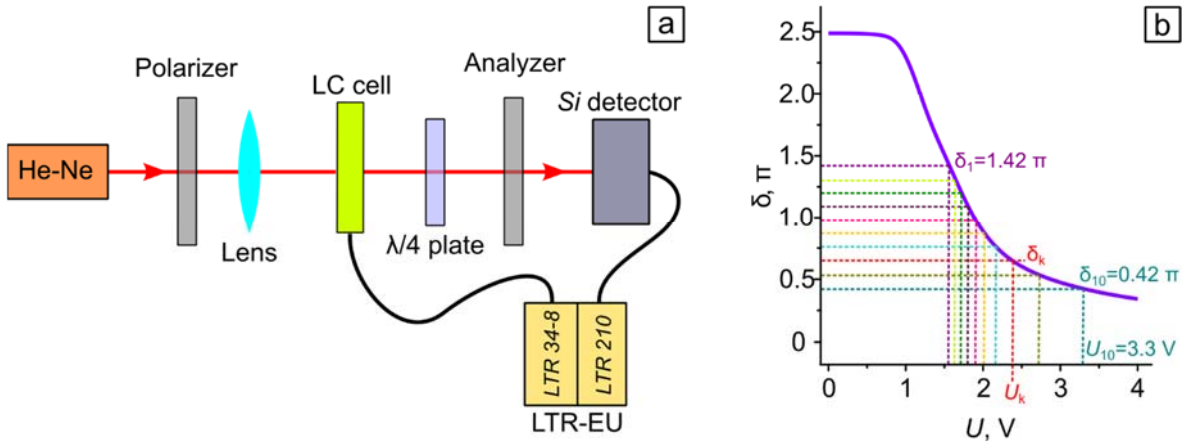


Рис. 1. a – Схема установки для измерения электрооптического отклика ЖК-ячейки, *b* – зависимость фазовой задержки δ от приложенного напряжения *U*, измеренная для толщины ЖК-слоя d_0 = 3,82 мкм. Пунктирными горизонтальными и вертикальными линиями показаны подуровни δ_k и соответствующие им значения напряжений U_k, для всех исследуемых толщин δ_{10} достигается при напряжении U_{10} = 3,3 В

Fig. 1. a – Setup scheme for measuring the electro-optical response of LC cell. *b* – The dependence of the phase delay δ on the applied voltage *U*, measured at the LC layer thickness of d_0 = 3.82 μm. Dashed horizontal and vertical lines indicate sub-levels δ_k and corresponding voltage values U_k. δ_{10} is achieved at U_{10} = 3.3 V for all thicknesses under study

На первом этапе регистрировалась зависимость светопропускания *T* от приложенного напряжения *U* (S-эффект). Для этого на образец подавалось переменное прямоугольное (меандр) напряжение частотой 1 кГц, напряжение постепенно увеличивалось с шагом 0,01 В. Из полученной зависимости *T*(*U*) рассчитывалась зависимость фазовой задержки δ от напряжения *U*. Далее определялся интервал напряжений от U_{10} = 3,3 В, при котором разность фаз равна δ_{10}, до напряжения U_1, соответствующего значению $\delta_1 = \delta_{10} + \pi$. Полученный интервал от δ_1 до δ_{10} разбивался на 9 одинаковых подынтервалов с шагом π/9, для каждого значения δ_k определялось соответствующее напряжение U_k (рис. 1, *b*).

На втором этапе измерялись времена переключения между соседними уровнями δ_i и $\delta_{k\pm1}$ при увеличении (τ_{rise}) и уменьшении (τ_{decay}) напряжения. Времена переключения измерялись по изменению интенсивности прошедшего света. Для нивелирования слабого изменения интенсивности вблизи экстремумов зависимости *T*(*U*), последовательно проводилось два измерения переключения между уровнями: одно при ориентации фазовой пластинки параллельно, второе – под углом 45° к направлению анализатора. При измерениях времен $\tau_{rise}(U_k)$ и $\tau_{decay}(U_k)$ выбиралось измерение, соответствующее наиболее чувствительному к изменению фазы диапазону значений *T* от примерно 0,25 до 0,75.

Результаты и их обсуждение

Расчет разности фаз для клиновидной ячейки

При прохождении света через клиновидную ЖК-ячейку разность фаз δ, возникающая между обыкновенной и необыкновенной волнами, будет различной в разных точках поперечного сечения лазерного луча вследствие различия толщины слоя ЖК в пределах светового пятна. Поскольку детектор измеряет интегральную по сечению луча интенсивность света, то данное различие оказывает влияние на значение коэффициента пропускания T и, как следствие, на величину измеряемой разности фаз δ. Для исследования влияния вариации толщины на величину T был проведен сравнительный анализ рассчитанных значений коэффициента пропускания клиновидной ЖК-ячейки T_{wedge} и плоскопараллельной ЖК-ячейки T_{flat} в зависимости от величины анизотропии показателя преломления Δn. Значения T_{wedge} находились путем усреднения по сечению пучка интенсивности света, прошедшего через ЖК-слой, расположенный между скрещенными поляризаторами (рис. 2, *a*):

$$T_{\text{wedge}} = \int_{-R}^{R} \frac{2\sqrt{R^2-x^2}}{\pi R^2} \sin^2\left(\frac{\pi\Delta n(d_0+x\tan\alpha)}{\lambda}\right) dx, \quad (1)$$

где R = 160 мкм – радиус поперечного сечения лазерного луча на образце, для которого полагается, что профиль интенсивности света по сечению имеет прямоугольную форму, d_0 – толщина ЖК-слоя в центре лазерного пучка (при x = 0), α – угол клина ЖК-слоя, λ = 632,8 нм – длина волны лазерного излучения. Пропускание плоскопараллельной ячейки находилось по формуле:

$$T_{\text{flat}} = \sin^2\frac{\delta}{2} = \sin^2\left(\frac{\pi\Delta n d_0}{\lambda}\right). \quad (2)$$

На рисунке 2, *b* приведены зависимости $T_{\text{wedge}}(\Delta n)$ и $T_{\text{flat}}(\Delta n)$, рассчитанные для толщины ЖК-ячеек d_0 = 3,82 мкм и угла клина α = 0,1459 мрад. Видно, что для используемой клиновидной ЖК-ячейки светопропускание в геометрии скрещенных поляризаторов практически полностью идентично пропусканию плоскопараллельной ячейки. Следовательно, в эксперименте при нахождении зависимости разности фаз δ от напряжения U по измеренной зависимости $T(U)$ можно использовать формулу (2) для плоскопараллельного слоя ЖК.

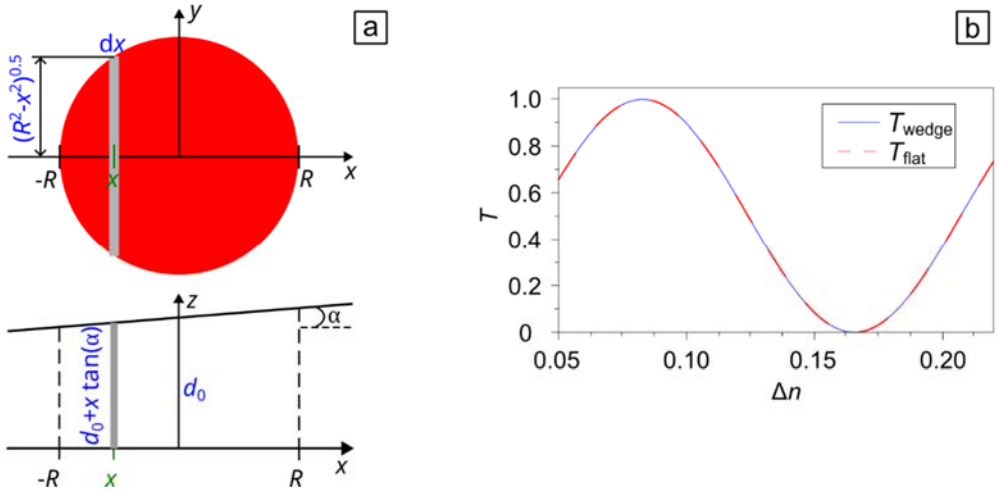


Рис. 2. a – Схема для расчета коэффициента пропускания T_{wedge} клиновидной ЖК-ячейки, расположенной между скрещенными поляризаторами; *b* – зависимости светопропускания T от величины анизотропии показателя преломления Δn, рассчитанные для клиновидной T_{wedge} и плоскопараллельной T_{flat} ЖК-ячейки. Расчеты выполнены для толщины ячеек d_0 = 3,82 мкм и угла клина α = 0,1459 мрад

Fig. 2. a – The geometry used for calculation of the transmittance T_{wedge} of a wedge-shaped LC cell placed between crossed polarizers; *b* – dependencies of light transmittance T on the refractive index anisotropy Δn calculated for the wedge-shaped (T_{wedge}) and flat (T_{flat}) LC cells. The calculations were performed for the cell thickness of d_0 = 3,82 μm and the wedge angle of α = 0,1459 mrad

Динамика отклика нематической смеси E7 в зависимости от толщины ЖК-слоя

Для всех исследованных толщин слоя ЖК пороговое напряжение переориентации U_{th} составляло 0,87 В. В свою очередь, диапазон управляющих напряжений $\Delta U = U_{10} - U_1$, необходимый для изменения фазы на величину π, монотонно уменьшался с ростом d_0 (табл. 1). На рисунке 3 показаны времена переключения между соседними уровнями при увеличении (τ_{rise}) и уменьшении (τ_{decay}) напряжения в зависимости от толщины ЖК-слоя. Видно, что с увеличением номера уровня k времена переключения уменьшаются. Различие между временами переключения на первый и десятый уровни уменьшается с ростом толщины d_0. Так, для толщины d_0 = 2,02 мкм время переключения на первый уровень равно τ_{decay} = 32 мс, в то время как переключение на k = 10 уровень происходит за 3 мс. В случае толщины ЖК-слоя d_0 = 3,82 мкм данные времена составляют 41 мс и 8 мс, соответственно. С увеличением d_0 времена переключения τ_{rise} и τ_{decay} между уровнями с большими значениями k от 6 до 10 (при больших напряжениях) увеличиваются, в то время как для уровней с k от 1 до 3 зависимость времен переключения от d_0 немонотонная. Сначала с увеличением d_0 времена переключения уменьшаются, а потом, начиная с d_0 = 3,26 мкм, наблюдается постепенный рост τ_{rise} и τ_{decay} с увеличением толщины слоя.

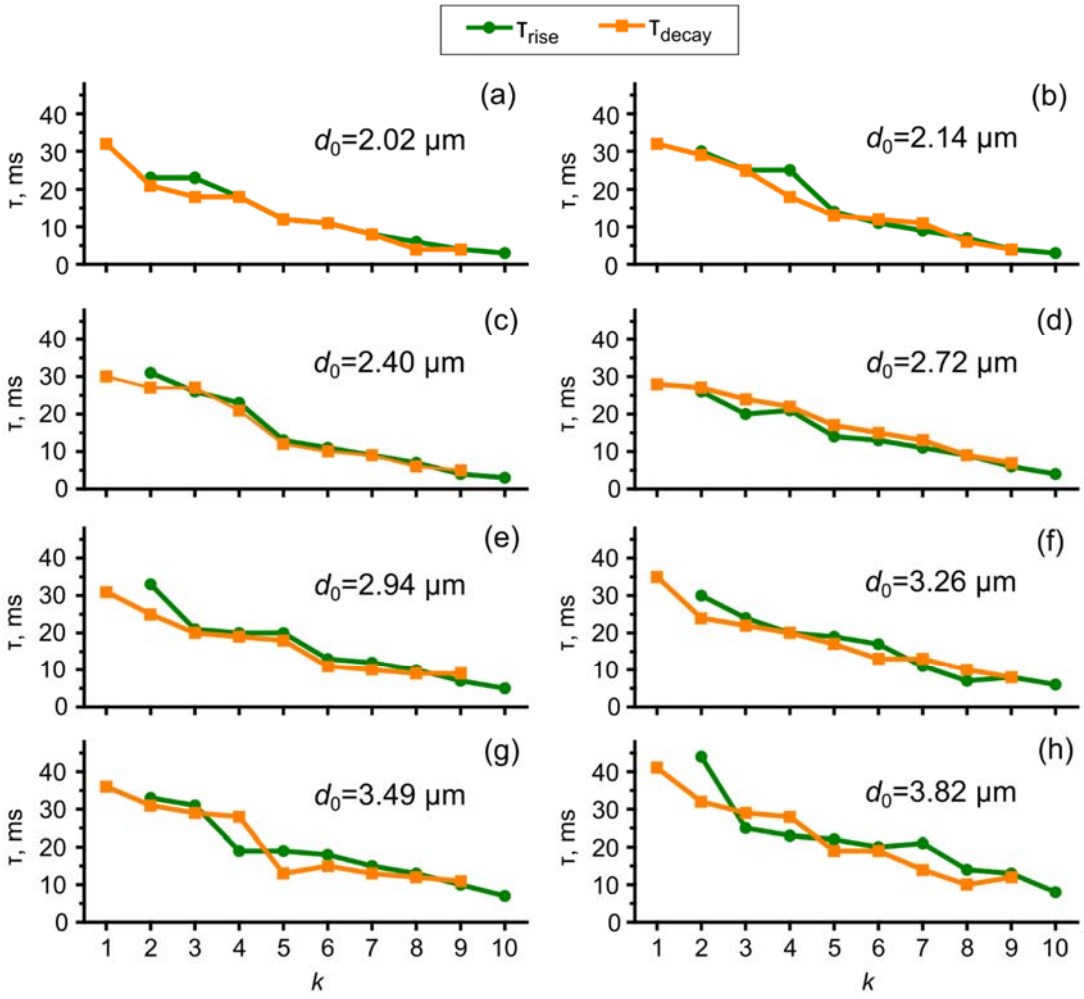


Рис. 3. Времена переключения τ_{rise} и τ_{decay} между соседними уровнями δ_k, измеренные для толщин ЖК-слоя: d_0 = 2,02 мкм (*a*), 2,14 мкм (*b*), 2,40 мкм (*c*), 2,72 мкм (*d*), 2,94 мкм (*e*), 3,26 мкм (*f*), 3,49 мкм (*g*) и 3,82 мкм (*h*)

Fig. 3. The switching times τ_{rise} and τ_{decay} between adjacent levels δ_k, measured for liquid crystal layer thicknesses: d_0 = 2.02 μm (*a*), 2.14 μm (*b*), 2.40 μm (*c*), 2.72 μm (*d*), 2.94 μm (*e*), 3.26 μm (*f*), 3.49 μm (*g*), and 3.82 μm (*h*)

Для понимания наблюдаемых зависимостей времен переключения проанализируем влияние толщины ЖК-слоя на диапазон управляющих напряжений и $\delta(U)$. Для всех исследуемых образцов задавалось максимальное напряжение $U_{10} = 3{,}3$ В, при котором значение разности фаз δ_{10} увеличивается с ростом толщины слоя ЖК d_0 практически линейно, отношение δ_{10}/d_0 оказалось примерно одинаковым и равным 0,11 π/мкм (табл. 1). Это означает, что распределение директора вдоль нормированной координаты z/d_0 при приложенном напряжении $U_0 = 3{,}3$ В практически не зависит от значения толщины слоя d_0. Это можно объяснить, сравнив поверхностную экстраполяционную длину ξ_W и электрическую длину когерентности ξ_E [28]. Поверхностная экстраполяционная длина зависит от констант упругости продольного K_{11} и поперечного K_{33} изгибов и коэффициента полярной энергии сцепления W_S:

$$\xi_W = \frac{K_{11}+K_{33}}{2W_S} \qquad (3)$$

Электрическая длина когерентности определяется константами упругости, анизотропией диэлектрической проницаемости ЖК $\Delta\varepsilon$ и напряженностью приложенного электрического поля E:

$$\xi_E = \sqrt{\frac{K_{11}+K_{33}}{2\varepsilon_0\Delta\varepsilon}}\frac{1}{E}, \qquad (4)$$

где $\varepsilon_0 = 8{,}85\ 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная. Для нематической смеси Е7 константы упругости равны $K_{11} = 11{,}7$ пН, $K_{33} = 19{,}5$ пН, $\Delta\varepsilon = 14{,}5$ [29]. Принимая $W_S \sim 10^{-4}$ Дж/м^2 [30], получим значение $\xi_W \cong 0{,}16$ мкм. Для оценки значения ξ_E напряженность поля можно положить равной $E = U/d_0$. Тогда для исследуемых толщин минимальная, при $U = 3{,}3$ В, электрическая длина когерентности находится в диапазоне от 0,21 мкм до 0,40 мкм. Видно, что ξ_W меньше значений ξ_E, и, как следствие, под действием электрического поля в исследуемой ЖК-ячейке на межфазной границе амплитуда отклонения директора от равновесного угла преднаклона практически не зависит от толщины d_0. В результате распределение директора по толщине слоя не зависит от величины d_0, что приводит к наблюдаемой практически линейной зависимости δ_{10} от d_0.

Анализируя зависимости времен переключения между соседними уровнями, полученными для различных толщин ЖК-слоя, можно сделать следующие обобщения. Времена переключения τ_{rise} и τ_{decay} между одинаковыми парами уровней δ имеют близкие значения (рис. 3), при этом с увеличением напряжения времена переключения уменьшаются. Так, для переключения со значения δ_{10} до δ_9 требуется время 12 мс и менее, а для пары уровней, соответствующих δ_2 и δ_1, время переключения занимает 28 мс и более. Данные закономерности можно объяснить тем, что времена переключения зависят от толщины и напряжения следующим образом [31]:

$$\tau_{\mathrm{rise,decay}} = \frac{\tau_0}{\left|\left(\frac{U_\mathrm{k}}{U_\mathrm{th}}\right)^2 - 1\right|}, \qquad (5)$$

$$\tau_0 = \frac{\gamma_1(d_0+2\xi_\mathrm{W})^2}{K_{11}\pi^2}, \qquad (6)$$

где γ_1 – вращательная вязкость ЖК, U_k – значение напряжения, на которое происходит переключение. Соответственно, переключение на один и тот же уровень вверх или вниз, соответствующий значению U_k, должно происходить с одинаковой скоростью. При этом, чем дальше по напряжению находится уровень от порогового значения U_{th}, тем меньше будет время переключения. В нашем случае, это значения напряжения вблизи U_{10}. С другой стороны, при увеличении толщины d_0 растет время свободной релаксации τ_0, что в целом приводит к увеличению времен переключения. При этом, если сравнить значения отношения $d_0^2\cdot((U_1/U_{\mathrm{th}})^2 - 1)^{-1}$, то увидим, что с ростом d_0 отношение сначала незначительно увеличивается, затем уменьшается, достигая минимума при $d_0 = 2{,}94$ мкм, и потом начинает снова увеличиваться (табл. 1). Такой характер зависимости отношения $d_0^2\cdot((U_1/U_{\mathrm{th}})^2 - 1)^{-1}$ от толщины ЖК-слоя коррелирует с измеренными временами переключения между уровнями с $k < 4$ (рис. 3).

Таблица 1. **Значения порогового напряжения U_{th}, отношения δ_{10}/d_0, $\Delta U = U_{10} - U_1$, $(U_1/U_{th})^2 - 1$ и $d_0^2 \cdot ((U_1/U_{th})^2 - 1)$ в зависимости от толщины ЖК-слоя d_0**

Table 1**. The values of threshold voltage U_{th}, the ratio δ_{10}/d_0, $\Delta U = U_{10} - U_1$, $(U_1/U_{th})^2 - 1$, and $d_0^2 \cdot ((U_1/U_{th})^2 - 1)$ depending on the liquid crystal layer thickness d_0**

d_0, мкм	δ_{10}/d_0, π/мкм	$\Delta U = U_{10} - U_1$, В	U_{th}, В	$(U_1/U_{th})^2 - 1$	$d_0^2/((U_1/U_{th})^2 - 1)$, мкм^2
2,02	0,113	2,28	0,87	0,375	10,9
2,14	0,110	2,27		0,402	11,4
2,40	0,105	2,26		0,429	13,4
2,72	0,115	2,10		0,902	8,2
2,94	0,112	1,90		1,590	5,4
3,26	0,105	1,88		1,664	6,4
3,49	0,103	1,77		2,093	5,8
3,82	0,108	1,74		2,215	6,8

Выводы

Исследовано влияние толщины ЖК-слоя d_0 на времена переключения и диапазон управляющих напряжений, при котором изменение фазы достигает π. Измерения выполнены для клиновидной ЖК-ячейки с углом клина в диапазоне от 0,1123 мрад до 0,1459 мрад, толщина слоя при этом варьировалась от 2,02 мкм до 3,82 мкм. Заданный максимум напряжения во всех случаях составлял 3,3 В. Времена измерялись для переключения между соседними уровнями фазы, отличающимися на π/9, как при увеличении, так и уменьшении напряжения. Увеличение толщины ЖК-слоя от 2,02 мкм до 3,82 мкм приводит к уменьшению диапазона управляющих напряжений ΔU от 2,28 В до 1,74 В. Зависимости времен переключения от толщины слоя различаются для высоких и низких управляющих напряжений. В случае высоких U, близких к 3,3 В, времена переключения увеличиваются с ростом d_0. Для малых управляющих напряжений зависимость скорости переключения от d_0 немонотонная: времена переключения уменьшаются с ростом толщины слоя ЖК вплоть до 2,94 мкм и увеличиваются с дальнейшим ростом d_0. Полученные данные представляют интерес для разработки ЖК-систем с улучшенными динамическими характеристиками, где выбор диапазона напряжений ограничен конструктивными особенностями управляющих элементов пикселей.

Благодарность: исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 1 «Национальный центр исследования архитектур суперкомпьютеров» (этап 2026-2027) и госзадания FWES-2024-0003 Федерального исследовательского центра КНЦ СО РАН.

Acknowledgments: This study was conducted within the framework of the scientific program of the National Center for Physics and Mathematics, section 1 «National Center for Research on Supercomputer Architectures» (stage 2026-2027) and state assignment FWES-2024-0003 for the Federal Research Center KSC SB RAS.

Список источников / References

1. Tubiana L., Alexander G.P., Barbensi A., Buck D., Cartwright J.H.E., Chwastyk M., Cieplak M., Coluzza I., Čopar S., Craik D.J., Di Stefano M., Everaers R., Faísca P.F.N., Ferrari F., Giacometti A., Goundaroulis D., Haglund E., Hou Y.-M., Ilieva N., Jackson S.E., Japaridze A., Kaplan N., Klotz A.R., Li H., Likos C.N., Locatelli E., López-León T., Machon T., Micheletti C., Michieletto D., Niemi A., Niemyska W., Niewieczerzal S., Nitti F., Orlandini E., Pasquali S., Perlinska A.P., Podgornik R., Potestio R., Pugno N.M., Ravnik M., Ricca R., Rohwer C.M., Rosa A., Smrek J., Souslov A., Stasiak A., Steer D., Sułkowska J., Sułkowski P., De Sumners W.L., Svaneborg C., Szymczak P., Tarenzi T., Travasso R., Virnau P., Vlassopoulos D., Ziherl P., Žumer S.. Topology in soft and biological matter. *Phys. Rep.*, 2024, **1075**, 1–137.
DOI: 10.1016/j.physrep.2024.04.002.
2. Chen H., Wu S.T. Advanced liquid crystal displays with supreme image qualities. *Liq. Cryst. Today*, 2019, **28** (1), 4–11.
DOI: 10.1080/1358314X.2019.1625138.

3. Беляев В.В. Перспективные применения и технологии жидкокристаллических устройств отображения информации и фотоники. // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2015. Т. 15, № 3. С. 7–27. [Belyaev V.V. Promising applications and technologies of liquid crystal displays and photonics devices, *Zhidkie Kristally i Ikh Prakticheskoe Ispol'zovanie*, 2015, **15** (3), 7–27. **DOI:** 10.18083/LCAppl.2015.3.7].
4. Yang Y.Q., Forbes A., Cao L.C. A review of liquid crystal spatial light modulators: devices and applications. *Opto-Electron. Sci.*, 2023, **2** (8), 230026. **DOI:** 10.29026/oes.2023.230026.
5. Belyaev V.V., Kovtonyuk N.F. Liquid crystals in spatial light modulators. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 1995, ***265*** (1), 599–613. **DOI:** 10.1080/10587259508041726.
6. Tien C.L., Lin R.J., Su S.H., & Horng C.T. Electrically tunable diffraction grating based on liquid crystals. *Adv. Condens. Matter Phys.*, 2018, **2018**, 7849529. **DOI:** 10.1155/2018/7849529.
7. Казак А.А., Толстик А.Л., Мельникова Е.А. Управление световыми полями с помощью дифракционных жидкокристаллических элементов. // Оптический журнал. 2010. Т. 77, № 7. С. 72–74. [Kazak A.A., Tolstik A.L., Mel'nikova E.A. Controlling light fields by means of liquid-crystal diffraction elements. *J. Opt. Technol.*, 2010, **77** (7), 461-462. **DOI:** 10.1364/JOT.77.000461].
8. Abuleil M., Abdulhalim I. Narrowband multispectral liquid crystal tunable filter. *Opt. Lett.*, 2016, **41** (9), 1957–1960. **DOI:** 10.1364/OL.41.001957.
9. Han F., Wang T., Liu G., Liu H., Xie X., Wei Z., Li J., Jiang C., He Y., Xu F. Materials with tunable optical properties for wearable epidermal sensing in health monitoring. *Adv. Mater.*, 2022, **34** (26), e2109055. **DOI:** 10.1002/adma.202109055.
10. Munir S., Kang I.K., Park S.Y. Polyelectrolytes functionalized nematic liquid crystal-based biosensors: An overview. *Trends Anal. Chem.*, 2016, **83**, 80–94. **DOI:** 10.1016/j.trac.2016.08.007.
11. Cuypers D., De Smet H., Van Calster A. LCOS microdisplays: A decade of technological evolution. *J. Disp. Technol.*, 2011, **7** (3), 127–134. **DOI:** 10.1109/JDT.2010.2053018.
12. Gou F., Chen H., Li M.C., Lee S.L., Wu S.T. Submillisecond-response liquid crystal for high-resolution virtual reality displays. *Opt. Express*, 2017, **25** (7), 7984–7997. **DOI:** 10.1364/OE.25.007984.
13. Chen Y., Peng F., Wu S.T. Submillisecond-response vertical-aligned liquid crystal for color sequential projection displays. *J. Disp. Technol.*, 2013, **9** (2), 78–81. **DOI:** 10.1109/jdt.2013.2243403.
14. Takatoh K., Sakamoto M., Hasegawa R., Koden M., Itoh N., Hasegawa M. *Alignment Technology and Applications of Liquid Crystal Devices.* CRC Press, London, 2005.
15. Bos P.J., Koehler-Beran K.R. The pi-cell: a fast liquid-crystal optical-switching device. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1984, **113**, 329–339. **DOI:** 10.1080/00268948408071693.
16. Iwata Y., Murata M., Tanaka K., Jinda A., Ohtake T., Shinomiya T., Yoshida H. Novel super-fast-response, ultra-wide temperature range VA-LCD. *SID International Symposium Digest of Technical Papers*, 2013, **44** (1), 431–434. **DOI:** 10.1002/j.2168-0159.2013.tb06239.x.
17. Choi T.-H., Kim J.-W., Yoon T.-H. Wide-temperature high-speed operation of a nematic liquid crystal cell. *Proc. SPIE*, 2017, **10125**, 101251H. **DOI:** 10.1117/12.2253681.
18. Golovin A.B., Shiyanovskii S.V., Lavrentovich O.D. Fast switching dual-frequency liquid crystal optical retarder, driven by an amplitude and frequency modulated voltage. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83** (19), 3864–3866. **DOI:** 10.1063/1.1625114.
19. Hsieh J.L., Choi W.K. Step-shaped electrode for low-voltage and high-optical-efficiency blue-phase transflective liquid crystal displays. *Liq. Cryst.*, 2018, **46**, 1–9. **DOI:** 10.1080/02678292.2018.1554771.
20. Hsieh J.L., Choi W.K. Step-shaped electrode for low-voltage and high-optical-efficiency blue-phase transflective liquid crystal displays. *Liq. Cryst.*, 2019, **46** (7), 1043–1051. **DOI:** 10.1007/s40094-020-00374-5.
21. Li Y., Yang Z., Chen R., Mo L., Li J., Hu M., Wu S.T. Submillisecond-response polymer network liquid crystal phase modulators. *Polymers*, 2020, **12** (12), 2862. **DOI:** 10.3390/polym12122862.
22. Chigrinov V., Sun J., Kuznetsov M.M., Belyaev V., Chausov D. The effect of operating temperature on the response time of optically driven liquid crystal displays. *Crystals*, 2020, **10** (7), 626. **DOI:** 10.3390/cryst10070626.
23. Meng C., Zhao H., Xue T., Fu J., Zhang, J. Impact of thickness of liquid crystal layer on response rate and exponential gain coefficient with assistance of ZnSe film. *Appl. Opt.*, 2014, **53** (36), 8456–8462. **DOI:** 10.1364/AO.53.008456.
24. Majd A.A., Amaljith C.K., Ibrahim A. Enhanced speed and tunability of liquid crystals in nanocavities via engineering the local electromagnetic field. *ACS Photonics*, 2025, **12** (2), 908–916. **DOI:** 10.1021/acsphotonics.4c01916. \
25. Wu S.T. Design of a liquid crystal based tunable electrooptic filter. *Appl. Opt.*, 1989, **28** (1), 48–52. **DOI:** 10.1364/AO.28.000048.
26. Zhang Z., You Z., Chu D. Fundamentals of phase-only liquid crystal on silicon (LCOS) devices. *Light:Sci. Appl.*, 2014, **3** (10), e213. **DOI:** 10.1038/lsa.2014.94.

27. Krakhalev M.N., Prishchepa O.O., Sutormin V.S., Zyryanov V.Ya. Polymer dispersed nematic liquid crystal films with conical boundary conditions for electrically controllable polarizers. *Opt. Mater.*, 2019, **89**, 1–4. **DOI:** 10.1016/j.optmat.2019.01.004.
28. Блинов Л.М. *Жидкие кристаллы: Структура и свойства*, Книжный дом «ЛИБРОКОМ», Москва, 2013, 480 с. [Blinov L.M. Structure and properties of liquid crystals. London: Springer, 2011, 439 p.]
29. Wang H., Wu T.-X., Gauza S., Wu J.R., Wu S.-T. A method to estimate the Leslie coefficients of liquid crystals based on MBBA data. *Liq. Cryst.*, 2006, **33** (1), 91–98. **DOI:** 10.1080/02678290500446111.
30. Крахалев М.Н., Тумашев В.С., Селезнев В.А., Комонов А.И., Мутилин С.В., Принц А.В., Фейзер К.А., Лесной М.А., Сутормин В.С., Баранник А.В., Прищепа О.О., Зырянов В.Я. Ориентация нематика полимерной пленкой, текстурированной методом штамповой нано-литографии. // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2024. Т. 24, № 2. С. 83–92. [Krakhalev M.N., Tumashev V.S., Seleznev V.A., Komonov A.I., Mutilin S., Prinz A.V., Feyzer K.A., Lesnoy M.A., Sutormin V.S., Barannik V.S., Prishchepa O.O., Zyryanov V.Ya. Nematic orientation with polymer film textured by stamp nanolithography method, *Zhidkie Kristally i Ikh Prakticheskoe Ispol'zovanie*, 2024, **24** (2), 83–92.
DOI: 10.18083/LCAppl.2024.2.83].
31. Nie X., Lu R., Xianyu H., Wu T.-X., Wu S.-T. Anchoring energy and cell gap effects on liquid crystal response time. *Journal of Applied Physics*, 2007, **101**, 103110. **DOI:** 10.1063/1.2734870.

***Вклад авторов**:*

Фейзер К.А. – методология, проведение исследований, проверка данных, визуализация, написание первоначального варианта статьи.
Лесной М.А. – методология, проведение исследований, проверка данных, визуализация, написание первоначального варианта статьи.
Крахалев М.Н. – концептуализация, рецензирование и редактирование текста статьи.
Сутормин В.С. – проведение исследований, рецензирование и редактирование текста статьи.
Зырянов В.Я. – руководство, концептуализация, рецензирование и редактирование текста статьи.

***Contribution of the authors**:*

Feizer K.A. – methodology, investigation, validation, visualization, writing – original draft.
Lesnoy M.A. – methodology, investigation, validation, visualization, writing – original draft.
Krakhalev M.N. – conceptualization, writing – review and editing.
Sutormin V.S. – investigation, writing – review and editing.
Zyryanov V.Ya. – supervision, conceptualization, writing – review and editing.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

ORCIDs:
Фейзер К.А. – 0000-0001-6940-5960
Лесной М.А. – 0009-0008-6020-9443
Крахалев М.Н. – 0000-0003-3519-9497
Сутормин В.С. – 0000-0003-4695-5569
Зырянов В.Я. – 0000-0001-7373-3342

ORCIDs:
Feizer K.A. – 0000-0001-6940-5960
Lesnoy M.A. – 0009-0008-6020-9443
Krakhalev M.N. – 0000-0003-3519-9497
Sutormin V.S. – 0000-0003-4695-5569
Zyryanov V.Ya – 0000-0001-7373-3342