

Физика

Научная статья

УДК 535.361; 610.849.19; 618.723

**ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ
ЯЧЕЙКИ НА НАПРЯЖЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ПОРОГА
ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА**

Георгий Валентинович Симоненко*

*Саратовский национальный исследовательский государственный
университет им. Н. Г. Чернышевского, Саратов, Россия*

ИНФОРМАЦИЯ

История статьи:

Поступила 14.09.2023

Одобрена 5.10.2023

Принята 16.10.2023

Ключевые слова:

жидкие кристаллы,
напряжение оптического
порога,
электрооптический эффект,
компьютерное
моделирование

АННОТАЦИЯ

Методом компьютерного моделирования выполнено исследование влияния конструктивных параметров жидкокристаллической (ЖК) ячейки на величину напряжения оптического порога эффекта управляемой электрическим полем интерференции поляризованных лучей. Показано, что при жестких граничных условиях (как симметричных, так и антисимметричных) значение напряжения оптического порога эффекта быстро убывает в зависимости от толщины по экспоненциальному закону и достигает некоторого постоянного значения. При нежестких граничных условиях (как симметричных, так и антисимметричных) зависимость величины напряжения оптического порога эффекта от толщины слоя ЖК имеет гиперболический тип. В то же время величина напряжения оптического порога эффекта уменьшается по экспоненциальному закону с ростом угла преднаклона молекул ЖК на ориентирующих поверхностях при жестких симметричных граничных условиях. Если граничные условия в ЖК-ячейке являются жесткими и антисимметричными, то с ростом угла преднаклона на ориентирующих поверхностях напряжение оптического порога эффекта уменьшается по линейному закону. Величина напряжения оптического порога эффекта линейно растет с ростом угла закрутки ЖК-структуры в ячейке как для симметричных граничных условий, так и для антисимметричных граничных условий. Уменьшение энергии сцепления молекул ЖК на подложке приводит к уменьшению напряжения оптического порога эффекта, причем эта закономерность имеет экспоненциальный характер в зависимости от обратной величины энергии сцепления молекул ЖК на ориентирующих подложках.

DOI:

10.18083/LCAppl.2023.4.58

Для цитирования:

Симоненко Г. В. Влияние конструктивных параметров жидкокристаллической ячейки на напряжение оптического порога электрооптического эффекта // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2023. Т. 23, № 4. С. 58–66.

*Адрес для переписки: gvsim1960@hotmail.com

© Симоненко Г. В., 2023

Physics

Original Article

**INFLUENCE OF DESIGN PARAMETERS OF LIQUID CRYSTAL CELL
ON THE OPTICAL THRESHOLD VOLTAGE VALUE OF ELECTRO-OPTICAL EFFECT**

Georgy V. Simonenko*

*Saratov National Research State University named after N. G. Chernyshevsky,
Saratov, Russia*

ARTICLE INFO:

Article history:

Received 14 September 2023

Approved 5 October 2023

Accepted 16 October 2023

Key words:

liquid crystals,
optical threshold voltage,
electro-optical effect,
computer simulation

ABSTRACT

The influence of liquid-crystal (LC) cell design parameters on the voltage of the optical threshold of the interference effect of polarized beams controlled by an electric field has been studied by computer simulation. It is shown that under strict boundary conditions (both symmetrical and antisymmetrical), the voltage value of the optical threshold decreases rapidly depending on the cell thickness in an exponential manner and reaches a certain constant value. Under non-strict boundary conditions (both symmetrical and antisymmetrical), the voltage dependence of the optical threshold on the LC layer thickness follows a hyperbolic pattern. At the same time, under strict symmetric boundary conditions, the voltage magnitude of the optical threshold effect decreases exponentially with an increase in the pretilt angle of LC molecules on the orienting surfaces. If the boundary conditions are rigid and antisymmetric, an increase in the pretilt angle on the orienting surfaces results in a linear decrease of the optical threshold voltage of the effect. The voltage magnitude of the optical threshold effect increases linearly with an increase in the twist angle of the LC structure in the cell, for both symmetric and antisymmetric boundary conditions. A decrease in the anchoring energy of LC molecules on a substrate leads to a decrease in the voltage of the optical threshold of the effect, and this regularity has an exponential character depending on the reciprocal value of the anchoring energy of LC molecules on orienting substrates.

DOI:

10.18083/LCAppl.2023.4.58

For citation:

Simonenko G. V. Influence of design parameters of liquid-crystal cell on the optical threshold voltage value of electro-optical effect. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2023, **23** (4), 58–66 (in Russ.).

* Corresponding author: gvsim1960@hotmail.com

© Simonenko G. V., 2023

Введение

В настоящее время жидкокристаллические (ЖК) устройства представляют собой основу систем отображения и обработки информации [1, 2]. Принцип работы таких устройств основан на использовании различных электрооптических эффектов в ЖК [3–5]. Для выбора электрооптического эффекта, на основе которого предполагается конструировать ЖК-устройство, используется большой набор его характеристик [3], важнейшей из которых является напряжение перехода Фредерикса [3–5]. Однако, как показывают компьютерные эксперименты, при одном и том же значении напряжения перехода Фредерикса изменения в оптическом отклике ЖК-ячейки наступают при более высоких значениях управляющих напряжений [6]. Поэтому следует ввести в рассмотрение вместо напряжения перехода Фредерикса напряжение оптического порога электрооптического эффекта U_{opt} . Напряжение оптического порога – это величина управляющего напряжения в ЖК-ячейке, при которой наступает изменение оптического отклика

при наблюдении определенного электрооптического эффекта. В таблице приведены значения напряжения оптического порога для различных электрооптических эффектов, которые можно наблюдать в одной и той же ЖК-структуре. Заметим, что значение напряжения перехода Фредерикса в этом случае для различных электрооптических эффектов одно и то же. В силу сказанного выше представляет интерес выяснить зависимость напряжения оптического порога электрооптического эффекта в ЖК-ячейке от ее конструктивных параметров: толщины ЖК-слоя d , угла преднаклона молекул ЖК на ориентирующих поверхностях ячейки θ_0 , угла закрутки структуры ЖК в ячейке Φ_T , энергии сцепления молекул ЖК на ориентирующих поверхностях W_0 . Так как эффект управляемой электрическим полем интерференции поляризованных лучей можно наблюдать в любой структуре ЖК [3, 4, 7] и этот эффект наиболее чувствителен к изменению значения управляющего напряжения (см. таблицу), то для исследования выберем это явление в качестве базового. Ниже приведены результаты.

Таблица. Значения напряжения оптического порога для различных электрооптических эффектов в ЖК-ячейке с твист-структурой (угол закрутки 90°)

Table. Optical threshold voltage values for various electro-optical effects in LC-cell with twist structure (twist angle 90°)

Электрооптический эффект	Интерференция поляризованных лучей	Твист-эффект	Эффект гость – хозяин	Значение напряжения перехода Фредерикса
U_{opt} , В	0,81	0,95	1,44	0,44

Метод исследования

С начала 80-х годов прошлого века и до сегодняшнего дня основным средством исследования электрооптических эффектов в ЖК является метод компьютерного моделирования [3, 4, 7, 8]. Поэтому для исследования взаимосвязи между напряжением оптического порога управляемой электрическим полем интерференцией поляризованных лучей в ЖК-ячейке и ее параметрами мы использовали метод компьютерного моделирования электрооптических эффектов в ЖК с помощью пакета программ MOUSE – LCD [7, 9, 10]. Достоверность данных, получаемых с помощью данного

пакета программ, подтверждается их сопоставлением с экспериментальными результатами, расхождение между которыми не превышает 10 % [9, 10]. Исследование зависимости напряжения оптического порога от конструктивных параметров ЖК-ячейки проводилось для эффекта управляемой электрическим полем интерференции поляризованных лучей (интерференционный режим) в ЖК-структуре. В этом случае угол ориентации входного поляризатора составлял 45° к направлению ориентации молекул ЖК на первой подложке, а угол ориентации выходного поляризатора равнялся -45° к тому же направлению.

В исследованиях считалось, что ячейка заполнена смесью ЖК со следующими физическими параметрами: $k_{11} = 13,2 \cdot 10^{-7}$ дин, $k_{22} = 6,5 \cdot 10^{-7}$ дин, $k_{33} = 13,8 \cdot 10^{-7}$ дин, $\varepsilon_{\perp} = 3,1$, $\varepsilon_{\parallel} = 8,3$. Анизотропия показателей преломления ЖК $\Delta n = 0,1$ (на длине волны 550 нм), ее дисперсия – слабая. Во всех расчетах эти физические параметры ЖК оставались постоянными.

В качестве поляризаторов использовалась пленка $NPF - F 1205 DU$. Для ЖК-ячеек с углами закрутки ЖК-структуры $\Phi_T > 90^\circ$ шаг хиральной добавки p_0 в ЖК-смеси соответствовал центральной зоне Гранжана [3]. Технологические параметры (толщины и показатели преломления) стеклянных подложек, электродных и ориентирующих слоев были взяты из работы [11]. Все исследования проводились для ЖК-ячеек с симметричными и антисимметричными граничными условиями. Для антисимметричных граничных условий угол преднаклона на первой ориентирующей подложке в ячейке θ_{01} , а на второй – $\theta_{02} = -\theta_{01}$, ($-\theta_{02} = \theta_{01} = \theta_0$). При симметричных граничных условиях значения углов преднаклона на обеих ориентирующих поверхностях были одинаковы ($\theta_{02} = \theta_{01} = \theta_0$). Кроме этого, для симметричных граничных условий было выяснено влияние энергии сцепления молекул ЖК с ориентирующей поверхностью W_0 на величину напряжения оптического порога U_{opt} . При этом потенциал взаимодействия с ориентирующей поверхностью был взят в форме Рапини [12].

Результаты и обсуждение

Рассмотрим влияние конструктивных параметров ЖК-ячейки, работающей на электрооптическом эффекте управляемой электрическим полем интерференцией поляризованных лучей, на величину напряжения оптического порога этого явления. Основными конструктивными параметрами ячейки с ЖК являются следующие: толщина слоя ЖК (d); угол закрутки структуры ЖК в ячейке (Φ_T); угол преднаклона молекул ЖК на ориентирующей подложке (θ_0); энергия сцепления молекул ЖК с ориентирующей подложкой (W_0). Существенным отличием напряжения оптического порога от напряжения перехода Фредерикса (U_{Fred}) является зависимость значения U_{opt} от d . Все остальные конструктивные параметры ЖК-ячейки влияют как на значение U_{opt} , так и на значение

U_{Fred} . При этом всегда $U_{opt} \geq U_{Fred}$. Отметим, что аналитических выражений для зависимостей $U_{opt} = U_{opt}(d)$, $U_{opt} = U_{opt}(\theta_0)$ и $U_{opt} = U_{opt}(W_0)$ не существует. В то же время ранее было показано, что зависимость $U_{opt} = U_{opt}(\Phi_T)$ носит линейный характер с положительным коэффициентом наклона для симметричных и антисимметричных граничных условий [6]. Так как для исследования указанных выше зависимостей используется компьютерное моделирование, то для нахождения аналитического вида этих зависимостей ($U_{opt} = U_{opt}(d)$, $U_{opt} = U_{opt}(\theta_0)$ и $U_{opt} = U_{opt}(W_0)$) оптимально применять метод наименьших квадратов и минимальный набор элементарных стандартных функций (линейная функция, экспоненциальная функция, рациональная функция) [13]. На рисунках 1–4 приведены результаты такого анализа. Заметим, что, так как twist-ориентация ЖК в ячейке в технике используется чаще других [1], то в наших исследованиях использовалась именно она.

Зависимость $U_{opt} = U_{opt}(d)$ для ЖК twist-ячейки, в которой наблюдается эффект управляемой электрическим полем интерференции поляризованных лучей при различных граничных условиях на ориентирующих поверхностях, показана на рис. 1. Как следует из этого рисунка, значение напряжения оптического порога этого эффекта уменьшается с ростом толщины слоя ЖК в ячейке. Для понимания этой зависимости вспомним, что пропускание ЖК twist-ячейки в скрещенных поляризаторах Т может быть записано в виде:

$$T = \sin^2\left(\frac{\pi \cdot \Delta n \cdot d}{\lambda}\right), \quad (1)$$

где Δn – анизотропия показателей преломления ЖК; λ – длина волны света, прошедшего через систему.

По определению напряжение оптического порога соответствует напряжению на управляющих электродах ЖК-ячейки, при котором начинаются изменения пропускания системы (поляроид – ЖК-ячейка – поляроид). Изменения пропускания такой системы в первую очередь связаны с изменением анизотропии показателей преломления ЖК с увеличением управляющего напряжения. Так как рассматривается случай изменения пропускания δT вблизи порогового значения управляющего напряжения, то в этом случае можно записать:

$$\delta T = T_2 - T_1 \approx 2 \left(\frac{\pi \cdot (\Delta n_2 - \Delta n_1) \cdot d}{\lambda} \right) \cdot \cos \left(\frac{\pi \cdot \Delta n_1 d}{\lambda} \right), \quad (2)$$

где T_1 и T_2 – пропускание системы соответственно при управляющих напряжениях в ЖК-ячейке U_1 и U_2 . При этом $U_1 = U_{\text{opt}} - \delta U$ и $U_2 = U_{\text{opt}} + \delta U$, а $\delta U \ll U_{\text{opt}}$.

Из выражения (2) следует, что δT тем больше, чем больше $(\Delta n_2 - \Delta n_1)$ и чем больше d . Поэтому при одном и том же изменении управляющего напряжения изменения пропускания больше у более толстых ЖК-ячеек. Вследствие этого с ростом d значение U_{opt} будет уменьшаться, что и продемонстрировано на рис. 1. Поиск вида аналитической зависимости $U_{\text{opt}} = U_{\text{opt}}(d)$ методом наименьших квадратов показал, что с погрешностью не более чем 15 % эта зависимость для случая жестких граничных условий в ЖК-ячейке (рис. 1, а) может быть представлена в виде:

$$U_{\text{opt}} = U_{01} + U_{02} e^{-d/d_{01}}, \quad (3)$$

где d_{01} , U_{01} и U_{02} – постоянные величины, которые определяются только физическими параметрами ЖК и ЖК-ячейки. При этом зависимость $U_{\text{opt}} =$

$U_{\text{opt}}(d)$ для антисимметричных граничных условий более ярко выраженная, чем такая же зависимость для симметричных граничных условий. Такая зависимость показывает, что если толщина слоя ЖК в ячейке изменяется в арифметической прогрессии, то величина напряжения оптического порога изменяется в геометрической прогрессии.

Аналогичный анализ зависимости $U_{\text{opt}} = U_{\text{opt}}(d)$ для случая нежестких граничных условий в ЖК-ячейке (рис. 1, б) показал, что ее аналитический вид с погрешностью не более чем 15 % может быть представлен в виде:

$$U_{\text{opt}} = U_{03} \left(1 + \frac{d_{02}}{d} \right), \quad (4)$$

где d_{02} и U_{03} – постоянные величины, которые определяются только физическими параметрами ЖК и ЖК-ячейки. Значения постоянных d_{02} и U_{03} для антисимметричных граничных условий имеют более высокие значения, чем значения этих величин для случая симметричных граничных условий.

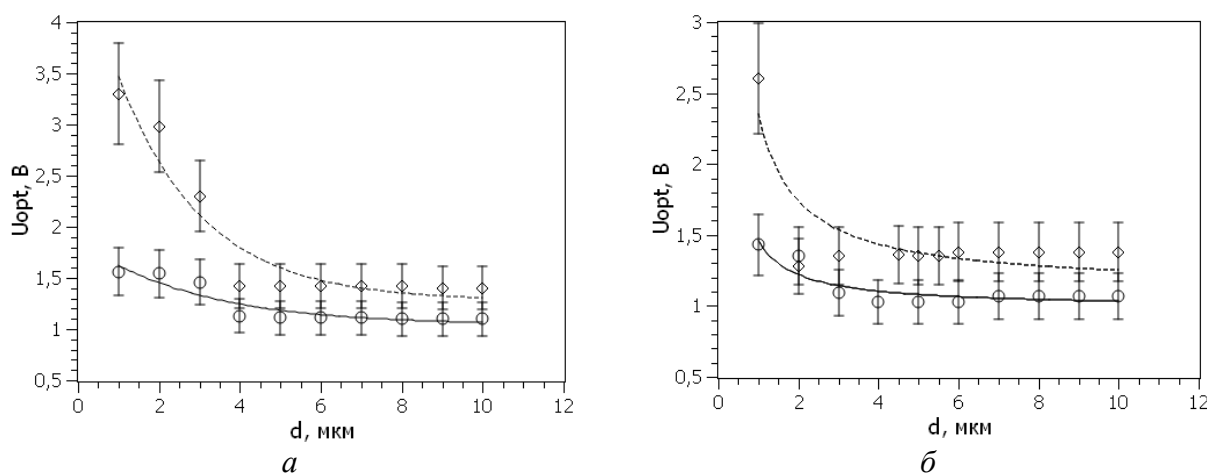


Рис. 1. Зависимость напряжения оптического порога эффекта управляемой электрическим полем интерференции поляризованных лучей от толщины слоя ЖК ($d = 4$ мкм, $\Phi_T = 90^\circ$, $\theta_0 = 2^\circ$):
а – жесткие граничные условия; б – нежесткие граничные условия ($W_0 = 0,05$ эрг/см²);
О – симметричные граничные условия; \diamond – антисимметричные граничные условия

Fig. 1. Dependence of optical threshold voltage of the interference effect of polarized beams controlled by electric field on the LC layer thickness ($d = 4$ μm , $\Phi_T = 90^\circ$, $\theta_0 = 2^\circ$):
а – rigid boundary conditions; б – non-rigid boundary conditions ($W_0 = 0.05$ erg/cm²);
О – symmetrical boundary conditions; \diamond – antisymmetrical boundary conditions

Различие вида зависимостей (3) и (4) обусловлено тем, что в последнем случае изменение толщины ЖК-слоя приводит к тому, что при одной и той же энергии связи молекул ЖК с ориентирующей подложкой граничные условия будут более жесткими в той ЖК-ячейке, у которой больше толщина слоя. Это объясняется тем, что жесткость граничных условий определяется параметром жесткости ω [12], величина которого растет с увеличением силы сцепления молекул ЖК с ориентирующими поверхностями. Этот параметр определяется следующим образом:

$$\omega = \frac{W_0 \cdot d}{k_{11}}. \quad (5)$$

Как следует из (5), увеличение толщины ЖК-слоя приводит к увеличению жесткости граничных условий, а это ведет к росту напряжения порога Фредерикса [12], но, с другой стороны, увеличение толщины слоя ЖК при жестких граничных условиях приводит к уменьшению значения напряжения оптического порога электрооптического эффекта. Действие этих двух противоположных тенденций и ведет к замене выражения (3) на выражение (4).

Физический смысл параметров d_{01} и d_{02} соответствует некоторым критическим значениям толщин слоя ЖК, при превышении которых падение напряжения оптического порога происходит с меньшей скоростью. В то же время физический смысл параметров U_{01} , U_{02} и U_{03} в выражениях (3) и (4) соответствует некоторым критическим значениям управляющего напряжения, которые связаны с напряжением перехода Фредерикса этого электрооптического эффекта и определяются физическими постоянными ЖК и ЖК-структуры.

Известно, что углы преднаклона молекул ЖК θ_{01} и θ_{02} на подложках ячейки оказывают существенное влияние на значение порога Фредерикса различных электрооптических эффектов [7]. Как правило, увеличение углов преднаклона молекул ЖК на ориентирующих поверхностях ячейки приводит к уменьшению напряжения порога перехода Фредерикса, так как изначально ориентационная структура ЖК уже возмущенная. Однако никаких аналитических зависимостей для этих величин в настоящее время не установлено, тем более такой аналитической зависимости не суще-

ствует для связи между напряжением оптического порога электрооптического эффекта и углами преднаклона молекул ЖК на ориентирующих поверхностях. Графический вид зависимости напряжения оптического порога эффекта управляемой электрическим полем интерференции поляризованных лучей в твист-ячейке от угла преднаклона на подложке ячейки с ЖК для случая симметричных граничных ($\theta_{01} = \theta_{02} = \theta_0$) и антисимметричных ($\theta_{01} = -\theta_{02} = \theta_0$) граничных условий представлен на рис. 2. Анализ зависимости $U_{\text{opt}} = U_{\text{opt}}(\theta_0)$ показал, что с погрешностью не более чем 15 % эта зависимость для случая симметричных жестких граничных условий в ЖК ячейке может быть представлена в виде:

$$U_{\text{opt}} = U_{04} + U_{05} e^{-\theta_0 / \theta^{01}}. \quad (6)$$

Значения постоянных величин θ^{01} , U_{04} и U_{05} определяются только физическими параметрами ЖК и ЖК-ячейки.

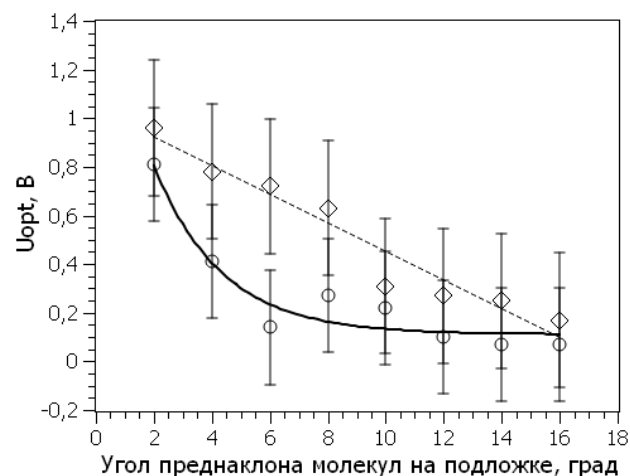


Рис. 2. Зависимость напряжения оптического порога электрооптического эффекта в ЖК-ячейке от угла преднаклона ЖК-молекул. Твист ЖК-ячейка с жесткими граничными условиями ($d = 4$ мкм):
 O – симметричные граничные условия;
 ◇ – антисимметричные граничные условия

Fig. 2. Dependence of optical threshold voltage of the electro-optical effect in a LC cell on the energy of adhesion of LC molecules to orienting surfaces.
 Twist LC-cell with strict boundary conditions ($d = 4 \mu\text{m}$):
 O – symmetrical boundary conditions;
 ◇ – antisymmetrical boundary conditions

При такой же погрешности аппроксимации для антисимметричных граничных условий выражение (6) переходит в линейную зависимость типа

$$U_{\text{opt}} = b - a \cdot \theta_0. \quad (7)$$

При этом коэффициенты этой зависимости $b = 1$, $a = 0,005$. Очевидно, что при таких значениях коэффициентов линейной функции эта зависимость является разложением выражения (6) в ряд Тейлора по малому параметру. Таким образом, можно считать, что в обоих случаях выражение (6) описывает зависимость $U_{\text{opt}} = U_{\text{opt}}(\theta_0)$ как для симметричных, так и для антисимметричных граничных условий, но с разными значениями параметров θ^{01} , U_{04} и U_{05} . Физический смысл параметра θ^{01} соответствует значению некоторого критического угла преднаклона молекул ЖК на ориентирующих подложках, превышение которого означает замедление изменения напряжения оптического порога электрооптического эффекта. Параметры U_{04} и U_{05} соответствуют некоторым критическим значениям управляющего напряжения, которые связаны с напряжением перехода Фредерикса этого электрооптического эффекта и определяются физическими постоянными ЖК и ЖК-структуры.

Известно, что энергия сцепления молекул ЖК с ориентирующими поверхностями ЖК-ячейки существенным образом влияет на электрооптические и оптические характеристики ЖК-устройств отображения информации, в том числе снижая напряжение порога Фредерикса при уменьшении силы сцепления [14, 15]. Но вид функциональной зависимости напряжения оптического порога эффекта управляемой электрическим полем интерференции поляризованных лучей от величины энергии сцепления молекул ЖК с подложками W_0 отсутствует. Предварительный поиск вида аналитической зависимости $U_{\text{opt}} = U_{\text{opt}}(W_0)$ показал, что такую задачу легче решить для зависимости не от W_0 , а для функции $U_{\text{opt}} = U_{\text{opt}}(1/W_0)$. График зависимости $U_{\text{opt}} = U_{\text{opt}}(1/W_0)$ показан на рис. 3. Используя метод наименьших квадратов, мы нашли, что с погрешностью не более чем 15 % эта зависимость для симметричных и антисимметричных граничных условий в ЖК-ячейке может быть представлена в виде:

$$U_{\text{opt}} = U_{06} + U_{07} e^{-W_0^{01}/W_0}, \quad (8)$$

где W_0^{01} , U_{06} и U_{07} – постоянные величины, которые определяются только физическими параметрами ЖК и ЖК-ячейки. Значения этих параметров

для симметричных и антисимметричных граничных условий различны.

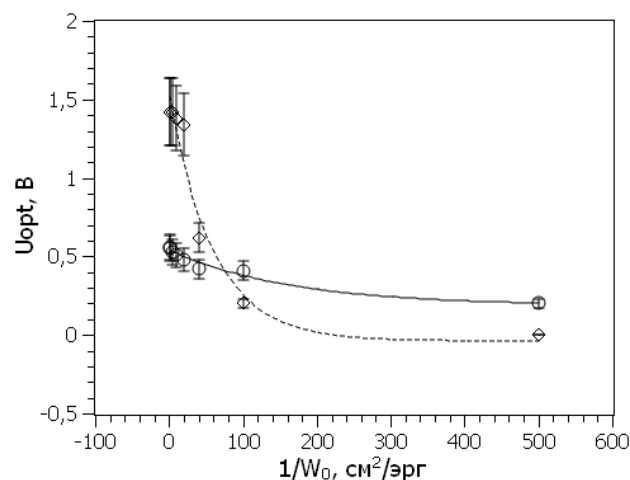


Рис. 3. Зависимость напряжения оптического порога электрооптического эффекта в ЖК-ячейке от энергии сцепления ЖК-молекул с ориентирующими поверхностями.

ЖК-ячейка: $d = 4$ мкм, $\Phi_T = 90^\circ$, $\theta_0 = 2^\circ$;

О – симметричные граничные условия;

◇ – антисимметричные граничные условия

Fig. 3. Dependence of optical threshold voltage of the electro-optical effect in an LC cell on the energy of adhesion of LC molecules to orienting surfaces.

LC-cell: $d = 4$ μm , $\Phi_T = 90^\circ$, $\theta_0 = 2^\circ$;

О – symmetrical boundary conditions;

◇ – antisymmetrical boundary conditions

Отметим, что, как следует из рис. 3, изменения U_{opt} при уменьшении энергии сцепления молекул ЖК с подложками W_0 происходят быстрее в случае антисимметричных граничных условий, чем для симметричных граничных условий. Величина изменений напряжения оптического порога электрооптического эффекта управляемой полем интерференции поляризованных лучей с уменьшением энергии сцепления молекул ЖК с подложками больше для антисимметричных условий, чем для симметричных граничных условий. Что касается физического смысла постоянных параметров в выражении (8), то как и в случае предыдущих функциональных зависимостей, его можно описать следующим образом: физический смысл параметра W_0^{01} соответствует критическому значению энергии сцепления молекул ЖК с ориентирующими подложками, превышение которого означает

замедление изменения напряжения оптического порога электрооптического эффекта. Параметры U_{06} и U_{07} соответствуют некоторым критическим значениям управляющего напряжения, которые связаны с напряжением перехода Фредерикса этого электрооптического эффекта и определяются физическими постоянными ЖК и ЖК-структуры.

Влияние угла закрутки ЖК-структуры для жестких граничных условий на величину напряжения оптического порога эффекта, управляемого электрическим полем интерференции поляризованных лучей, подробно рассмотрено в работе [16]. Автор показал, что функциональная зависимость $U_{\text{opt}} = U_{\text{opt}}(\Phi_T)$ является линейной, а коэффициент наклона для симметричных граничных условий больше, чем соответствующий коэффициент для антисимметричных граничных условий. В то же время коэффициент отсечки больше для антисимметричных граничных условий, чем для симметричных граничных условий.

Заключение

Методом компьютерного моделирования выполнено исследование влияния конструктивных параметров ЖК-ячейки на величину напряжения оптического порога эффекта управляемой электрическим полем интерференции поляризованных лучей. Показано, что при жестких граничных условиях (как симметричных, так и антисимметричных) значение напряжения оптического порога эффекта быстро убывает в зависимости от толщины по экспоненциальному закону и достигает некоторого постоянного значения. При нежестких граничных условиях (как симметричных, так и антисимметричных) зависимость величины напряжения оптического порога эффекта от толщины слоя ЖК имеет гиперболический тип. В то же время величина напряжения оптического порога эффекта уменьшается по экспоненциальному закону с ростом угла преднаклона молекул ЖК на ориентирующих поверхностях при жестких симметричных граничных условиях. Если граничные условия в ЖК-ячейке являются жесткими и антисимметричными, то с ростом угла преднаклона на ориентирующих поверхностях напряжение оптического порога эффекта уменьшается по линейному закону. Величина напряжения оптического порога эффекта линейно растет с ростом угла закрутки ЖК-структуры в ячейке, как для симметричных, так и

для антисимметричных граничных условий. Уменьшение энергии сцепления молекул ЖК на подложке приводит к уменьшению напряжения оптического порога эффекта, причем эта закономерность имеет экспоненциальный характер в зависимости от обратной величины энергии сцепления.

Список источников / References

1. He Z., Gou F., Chen R., Yin K., Zhan T., Wu S.-T. Liquid crystal beam steering devices: principles, recent advances, and future developments. *Crystals*, 2019, **9** (6), 292–300. DOI: 10.3390/cryst9060292.
2. Wang C.T., Yang C.S., Guo Q. Liquid crystal optics and physics: recent advances and prospects. *Crystals*, 2019, **9** (12), 670. DOI: 10.3390/cryst9120670.
3. Сухариев А. С. Жидкокристаллические индикаторы. М.: Радио и связь, 1991. 256 с. [Sukhariev A.S. Liquid crystal indicators. Moscow: Radio and communications, 1991, 256 p. (in Russ.)].
4. Yakovlev D.A., Chigrinov V.G., Kwok H.-S. Modeling and optimization of LCD optical performance. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2015, 554 p.
5. Коншина Е. А. Оптика жидкокристаллических сред. СПб.: СПб НИУ ИТМО, 2012. 99 с. [Konshina E.A., Optics of liquid crystal media. Saint-Petersburg: St.-Petersburg national research university of fine mechanics and optics, 2012, 99 p. (in Russ.)].
6. Курчаткин С. П., Севостьянов В. П. Жидкие кристаллы в капиллярных объемах: поверхностные явления и надмолекулярная структура. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 2001. 204 с. [Kurchatkin S.P., Sevostyanov V.P. Liquid crystals in capillary volumes: surface phenomena and supramolecular structure. Saratov: Saratov University, 2001, 204 p. (in Russ.)].
7. Симоненко Г. В. Компьютерное моделирование характеристик быстродействующих классических модуляторов на основе жидких кристаллов. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 2018. 136 с. [Simonenko G.V. Computer simulation of characteristics of high-speed classical modulators based on liquid crystals. Saratov: Saratov University, 2018, 136 p. (in Russ.)].
8. Berreman D.W. Numerical modelling of twisted nematic devices. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, 1983, **A309**, 203–216.
9. Финкель А. Г., Цой В. И., Симоненко Г. В., Яковлев Д. А. Проектирование ЖК-устройств отображения информации // *Электронная промышленность*. 2000. № 2. С. 11–16. [Finkel A.G., Tsoi V.I., Simonenko G.V., Yakovlev D.A. Designing LCD-devices for displaying information. *Electronic industry*, 2000, 2, 11–16 (in Russ.)].

10. Chigrinov V.G., Simonenko G.V., Yakovlev D.A., Podjachev Yu.B. The optimization of LCD electrooptical behavior using MOUSE – LCD software. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2000, **351**, 17–25.
DOI: 10.1080/10587250008023248.
11. Курчаткин С. П. Поверхностные явления и структура термотропных жидких кристаллов в капиллярных объемах: дисс. ...д-ра хим. наук. Саратов: гос. ун-т, 2001. 290 с. [Kurchatkin S.P. Surface phenomena and structure of thermotropic liquid crystals in capillary volumes. PhD thesis (Chem.). Saratov, 2001, 290 p. (in Russ.)].
12. Rapini A., Papoular M.J. Distorsion d'une lamelle nématique sous champ magnétique conditions d'ancrage aux parois. *J. Phys. Colloq.*, 1969, **30**, 11–12.
13. Турчак Л. И., Плотников П. В. Основы численных методов. М. : Физматлит, 2003. 304 с. [Turchak L.I., Plotnikov P.V. Fundamentals of numerical methods. M. : Fizmatlit, 2003, 304 p. (in Russ.)].
14. Nehring J., Kmetz A.R., Sheffer T.J. Analysis of weak-boundary-coupling effects in liquid-crystal displays. *J. Appl. Phys.*, 1976, **47** (3), 850–857.
15. Симоненко Г. В. Характеристики STN-дисплея при различных условиях ориентации жидкого кристалла на подложках // *Электронная техника. Серия 4. Электрорадиотехника и газоразрядные приборы*. 1992. Вып. 1 (136). С. 13. [Simonenko G.V. Characteristics of an STN display under various conditions of liquid crystal orientation on substrates. *Electronic equipment. Series 4. Electrovacuum and gas-discharge devices*, 1992, 1 (136), 13 (in Russ.)].
16. Симоненко Г. В. Параметризация зависимости полного времени срабатывания жидкокристаллического модулятора от управляющего напряжения // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2022. Т. 22, № 1. С. 35–43 [Simonenko G.V. Parametrization of the dependence of the total operation time of the liquid crystal modulator on the control voltage. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2022, **22** (1), 35–43 (in Russ.)]. DOI: 10.18083/LCAppl.2022.1.35].

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares no conflict of interest.

Симоненко Г. В. – <https://orcid.org/0000-0001-6283-6335>.

Поступила 14.09.2023, одобрена 16.10.2023, принята 30.10.2023
Received 14.09.2023, approved 16.10.2023, accepted 30.10.2023