

Физика

Научная статья

УДК: 544.252.23:536.248

ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ МОДУЛЯТОР
СУБМЕГАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

Е. П. Пожидаев, А. В. Кузнецов, А. В. Казначеев, С. И. Торгова, Т. П. Ткаченко*

Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

ИНФОРМАЦИЯ

История статьи:

Поступила 19.10.2023

Одобрена 13.11.2023

Принята 20.11.2023

Ключевые слова:

субмегагерцовый
электрооптический
модулятор,
сегнетоэлектрический
жидкий кристалл,
DNF-эффект,
теплоотвод из ЖК-ячейки

АННОТАЦИЯ

Разработан жидкокристаллический (ЖК) электрооптический модулятор, обеспечивающий время электрооптического отклика до 400 наносекунд при частоте модуляции до 500 кГц. В качестве электрооптической среды модулятора использован разработанный авторами сегнетоэлектрический жидкий кристалл **C*ЖК-576**, шаг геликоидальной структуры p_0 которого много меньше длин волн излучения видимого диапазона ($p_0 < 100$ нм). Жидкий кристалл работает в режиме деформации электрическим полем геликоида (DNF-эффект) при управляющих электрических полях, меньших критического поля раскрутки геликоидальной структуры. При высоких частотах управляющего напряжения (свыше 10 кГц) может происходить нагревание электрооптической ячейки токами переполаризации C*ЖК, вплоть до температуры фазового перехода из сегнетоэлектрической фазы в параэлектрическую, что приводит к прекращению электрооптической модуляции. В работе экспериментально и теоретически рассмотрены вопросы саморазогрева электрооптических модуляторов в зависимости от толщины слоя жидкого кристалла, частоты и напряженности приложенного электрического поля. Определены и реализованы в эксперименте условия теплоотвода из жидкокристаллической ячейки, при которых температура C*ЖК находится в пределах интервала существования смектической C* сегнетоэлектрической фазы, что обеспечивает необходимые условия электрооптической модуляции в субмегагерцовом диапазоне частот.

DOI:

10.18083/LCAppl.2023.4.94

Для цитирования:

Пожидаев Е. П., Кузнецов А. В., Казначеев А. В., Торгова С. И., Ткаченко Т. П. Жидкокристаллический электрооптический модулятор субмегагерцового диапазона // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2023. Т. 23, № 4. С. 94–102.

*Адрес для переписки: tptkachenko@lebedev.ru

© Пожидаев Е. П., Кузнецов А. В., Казначеев А. В., Торгова С. И., Ткаченко Т. П., 2023

Physics

Research Article

LIQUID CRYSTALLINE ELECTRO-OPTICAL MODULATOR OF SUBMEGAHERTZ RANGE

E. P. Pozhidaev, A. V. Kuznetsov, A. V. Kaznacheev, S. I. Torgova, T. P. Tkachenko*

P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

ARTICLE INFO:

ABSTRACT

Article history:

Received 19 October 2023

Approved 13 November 2023

Accepted 20 November 2023

Key words:

submegahertz electro-optical modulator,
ferroelectric liquid crystal,
DHF-effect,
heat removal from LC cell

A liquid crystalline (LC) electro-optical modulator providing an electro-optical response time up to 400 nanoseconds with a modulation frequency up to 500 kHz has been developed. The ferroelectric liquid crystal **FLC-576** obtained by us was used as the electro-optical medium of the modulator. Its helix pitch p_0 is much smaller than wavelengths of visible light ($p_0 < 100$ nm). The liquid crystal operates in the deformed helix ferroelectric mode (DHF-effect) under the action of electric fields. The controlling electric fields are less than a critical field of helix unwinding. At high frequencies of the control voltage (over 10 kHz), the heating of electro-optical cell by repolarization currents of FLC can occur up to the temperature of phase transition from ferroelectric to paraelectric phase, which leads to the cessation of electro-optical modulation. The work experimentally and theoretically examines the self-heating issues of electro-optical modulators depending on the liquid crystal layer thickness, frequency and strength of applied electric field. The heat removal conditions from the liquid crystal cell have been determined and experimentally implemented. Under these conditions the LC is in the smectic C* ferroelectric phase temperature range, which is necessary to provide electro-optical modulation in submegahertz diapason.

DOI:

10.18083/LCAppl.2023.4.94

For citation:

Pozhidaev E. P., Kuznetsov A. V., Kaznacheev A. V., Torgova S. I., Tkachenko T. P. Liquid crystalline electro-optical modulator of submegahertz range. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2023, **23** (4), 94–102 (in Russ.).

*Corresponding author: tptkachenko@lebedev.ru

© Pozhidaev E. P., Kuznetsov A. V., Kaznacheev A. V., Torgova S. I., Tkachenko T. P., 2023

Введение

В электрооптических ячейках на основе геликоидальных смектических C^* сегнетоэлектрических жидких кристаллов (C^* ЖК) наблюдается электрооптический эффект, обусловленный деформацией геликоида во внешнем электрическом поле E , которое приложено перпендикулярно оси геликоида и меньше, чем критическое поле E_c его раскрутки [1]. Этот эффект известен под названием *deformed helix ferroelectric (DHF)*-эффект. *DHF*-эффект используется для модуляции добротности лазеров, для создания дисплеев нового поколения, электроуправляемых дифракционных решеток, фазовых матриц и оптических пинцетов [2].

Время $\tau_{0.1-0.9}$ электрооптического отклика в теории *DHF*-эффекта [1] оценивается как примерно равное времени τ_R свободной релаксации возмущений геликоидальной структуры:

$$\tau_{0.1-0.9} \cong \tau_R \cong \frac{\gamma_\phi p_0^2}{4\pi^2 K_\phi}, \quad (1)$$

где γ_ϕ – вращательная вязкость фазы C^* , а K_ϕ – константа упругости геликоидальной структуры. Соотношение (1) справедливо в низкочастотной области, где величина χ_G не зависит от частоты, а при переходе в дисперсионную область $\chi_G(f)$ время $\tau_{0.1-0.9}$ уменьшается [3–5]. Время электрооптического отклика в дисперсионной области может достигать значений 1,0–1,5 мкс при $f = 50$ кГц [4, 5], а в низкочастотной области ($f \leq 5$ кГц) составляет 50–100 мкс [6], что хорошо описывается соотношением (1). Теоретического описания дисперсионной зависимости $\tau_{0.1-0.9}(f)$ нет.

Коэффициент светопропускания T_h *DHF*-ячеек в дисперсионной области при $p_0 \leq \lambda/5$ описывается, как показано в [7–9], соотношением:

$$T_h = \sin^2(\beta \pm \psi_d(E, f)) \sin^2 \frac{\pi \cdot \Delta n_{\text{eff}}(f, \lambda, T) \cdot d}{\lambda}, \quad (2)$$

где β – угол между плоскостью поляризации падающего линейно поляризованного света и осью геликоида C^* ЖК, $\psi_d(E, f)$ – это угол отклонения эффективной оптической оси C^* ЖК от первоначальной ориентации (при $E = 0$) в электрическом поле, λ – длина световой волны, d – толщина слоя

C^* ЖК, Δn_{eff} – эффективное двулучепреломление геликоидальной структуры. В работе [10] экспериментально и теоретически показано, что величины ψ_d и Δn_{eff} зависят от частоты приложенного напряжения, что определяется дисперсией диэлектрической восприимчивости $\chi_G(f)$. Возможно, на частотную дисперсию времени электрооптического отклика $\tau_{0.1-0.9}(f)$ также влияет диэлектрическая дисперсия.

В представленной работе впервые экспериментально и теоретически рассмотрено влияние нагревания *DHF*-ячеек в дисперсионной области токами переполаризации C^* ЖК на параметры электрооптического эффекта. Определены условия теплоотвода, при которых в *DHF*-эффекте осуществляется электрооптическая модуляция на частоте до 500 кГц.

Материалы и методы

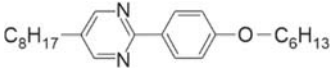
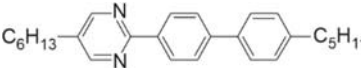
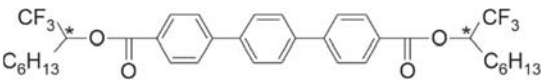
В экспериментах использовался смесевой геликоидальный сегнетоэлектрический жидкий кристалл ***C^**ЖК-576**, разработанный авторами в ФИАН им. П. Н. Лебедева из известных компонентов, описанных в работах [11–13]. Состав используемого C^* ЖК приведен в таблице 1.

Последовательность фазовых переходов при нагреве ***C^**ЖК-576** из состояния твердого кристалла, предварительно полученного при охлаждении смеси до температуры -5 °С в течение 30 ч, имеет вид: твердый кристалл $\rightarrow +8$ °С \rightarrow смектическая фаза $C^* \rightarrow +83$ °С \rightarrow холестерическая фаза $\rightarrow +102$ °С \rightarrow изотропная фаза. При температуре 23 °С спонтанная поляризация смеси $P_s \approx 120$ нКл/см², угол наклона молекул в смектических слоях $\theta \approx 31^\circ$, шаг геликоида $p_0 \approx 95$ нм.

Электрооптические ячейки изготавливались в чистой комнате класса 1000. Для обеспечения планарной ориентации ***C^**ЖК-576** (ось геликоида расположена в плоскости подложек ячеек) использовались ориентирующие полимерные покрытия (ориентанты) на основе полипиромеллитового диангидрида (ПМДА) и 4,4'-оксидианилина (ОДА) производства НПО «Пластик» (г. Москва). Технология нанесения ориентантов на подложки ячеек детально описана в работе [14].

Таблица 1. Химический состав смеси С*ЖК-576

Table 1. Chemical composition of the mixture FLC-576

№	Название	Структурная формула	ω, мас. %
1	2-(4-(гексилокси)фенил)-5-октилпиримидин		25,8
2	5-гексил-2-(4'-пентил-[1,1'-бифенил]-4-ил)пиримидин		40,3
3	(R,R)-бис-(1,1,1-трифторокт-2-ил)-4,4''-терфенилдикарбоксилат		33,9

Поляризация P и, в частности, спонтанная поляризация P_s смеси С*ЖК-576 измерялись методом интегрирования токов переполяризации на внешнем конденсаторе [15]. Диэлектрическая восприимчивость χ_G рассчитывалась по измеренной зависимости $P(E)$ [16]:

$$\chi_G = \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{\partial P(E)}{\partial E} - \chi_\infty, \quad (3)$$

где χ_∞ – высокочастотная часть диэлектрической восприимчивости, обусловленная молекулярной поляризуемостью.

Для определения шага геликоида С*ЖК с помощью спектрометра *Ocean Optics* измерялся спектр пропускания света гомеотропно ориентированной жидкокристаллической ячейки (ось геликоида перпендикулярна подложкам ячеек) без поляризаторов. Гомеотропная ориентация достигалась за счет использования хромолана в качестве ориентанта [16, 17]. В спектре наблюдались полосы брэгговского отражения от периодической геликоидальной структуры, по которым рассчитывался шаг геликоида, как в работах [18, 19].

Измерения светопропускания T_h , угла $\chi_G(f)$ и времени электрооптического отклика $\tau_{0.1-0.9}(f)$

DHF -ячеек, расположенных между скрещенными поляризаторами, производились по классической схеме электрооптических измерений [17]. В качестве источника излучения использовалась лампа подсветки микроскопа ПОЛАМ Р-312, в качестве фотодетектора – фотоэлектронный умножитель ФЭУ-68. Электрооптический отклик регистрировался на экране осциллографа *Rigol DS1154Z*. Для измерений температур DHF -ячеек использовался платиновый термодатчик *Pt100*, прикрепленный к поверхности ячейки термоклеем и подключенный к термоконтроллеру *Autonics TZN4M-B4R*.

Результаты и их обсуждение

Область частотной дисперсии параметров $E_c(f)$, $\chi_G(f)$ и $\tau_{0.1-0.9}(f)$ С*ЖК-576 находится в широком диапазоне частот от 1 кГц до 500 кГц и представлена на рис. 1. Из рисунка следует, что при увеличении частоты увеличивается критическое поле раскрутки спирали. Это позволяет при высоких частотах прикладывать к ЖК большие электрические поля, оставаясь при этом в области DHF -эффекта.

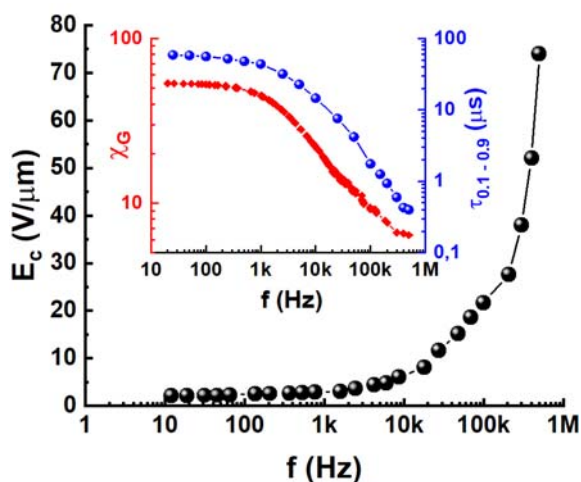


Рис. 1. Частотная зависимость критического поля $E_c(f)$ раскрутки геликоида сегнетоэлектрического жидкого кристалла С*ЖК-576. На вставке показаны частотные зависимости диэлектрической восприимчивости $\chi_G(f)$ и времени электрооптического отклика $\tau_{0.1-0.9}(f)$, измеренные при температуре окружающей среды 24 °С и при условии $E/E_c = 0,7$. Толщина слоя жидкого кристалла 0,6 мкм

Fig. 1. Frequency dependence of the critical field $E_c(f)$ for the helix unwinding of the ferroelectric liquid crystal FLC-576. The inset shows frequency dependences of dielectric susceptibility $\chi_G(f)$ and electro-optical response time $\tau_{0.1-0.9}(f)$ measured at the ambient temperature of 24 °C and under the condition $E/E_c = 0,7$. The layer thickness of liquid crystal is 0,6 μm

Дисперсия зависимостей $\chi_G(f)$ и $\tau_{0.1-0.9}(f)$ наблюдается в области частот от 1 до 500 кГц. На вставке к рис. 1 видно, что эти зависимости подобны. На рис. 2 представлены зависимости χ_G и ψ_d от частоты приложенного напряжения, форма которого показана на вставке к рисунку. Уменьшение этих величин при увеличении частоты приводит, согласно формуле (2), к понижению светопропускания электрооптического модулятора, которое на частоте 500 кГц составляет всего 4,5 %. Таким образом, несмотря на низкое значение светопропускания, электрооптический модулятор работает в субмегагерцовом диапазоне частот, с контрастным отношением около 20:1 в белом свете.

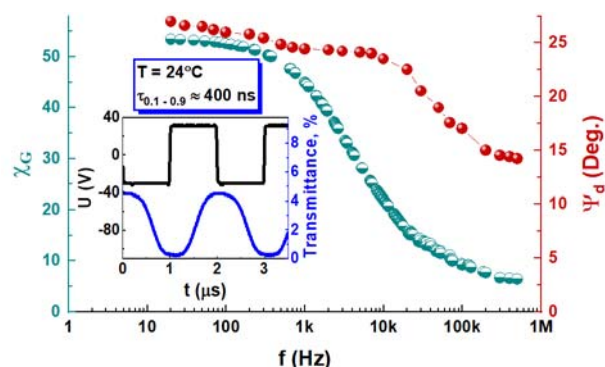


Рис. 2. Частотные зависимости диэлектрической восприимчивости $\chi_G(f)$ и угла отклонения эффективной оптической оси $\psi_d(f)$ С*ЖК-576. Измерения выполнены при толщине слоя С*ЖК 0,6 мкм при температуре окружающей среды 24 °С и условии $E/E_c = 0,7$. На вставке: снизу электрооптический отклик, сверху управляющее напряжение частотой 500 кГц, приложенное к слою С*ЖК-576

Fig. 2. Frequency dependences of dielectric susceptibility $\chi_G(f)$ and deviation angle $\psi_d(f)$ on effective optical axis of FLC-576. The measurements were performed with the FLC layer thickness of 0,6 μm at the ambient temperature of 24 °C and under the condition $E/E_c = 0,7$. Inset: electro-optical response (blue curve at the bottom) and control voltage waveform at 500 kHz frequency (black curve on the top) applied to FLC-576 layer

Одна из проблем использования высокочастотных модуляторов – их разогрев в процессе работы. Это связано с токами переполаризации, возникающими в рабочей среде (ЖК) при приложении к ней переменного напряжения. Авторы работы [20] решили задачу электрического нагрева нематического жидкого кристалла (параэлектрика), однако электрооптическая модуляция при этом не рассматривалась. Нами рассмотрена стационарная тепловая задача о распределении температуры T в электрооптической С*ЖК-ячейке (рис. 3) при приложении переменного электрического поля. Наиболее существенно в этой задаче, как и в работе [20], установление зависимости температуры на границах ячейки от напряженности и частоты прикладываемого поля. Нами дополнительно исследована зависимость саморазогрева ячейки от толщины слоя С*ЖК.

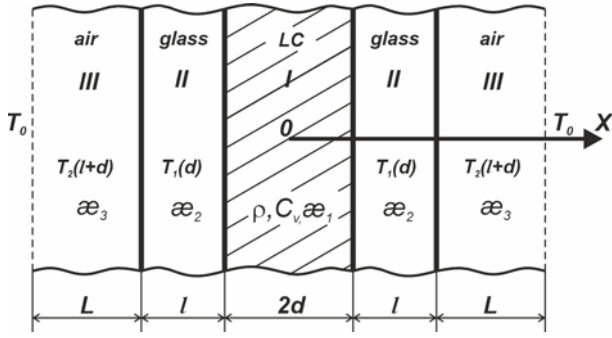


Рис. 3. Схема ЖК-ячейки. I – слой ЖК, II – стекла, III – воздух, окружающий ячейку, $2d$ – толщина слоя С*ЖК, l – толщина стекла, L – характерная толщина окружающего воздуха, при которой температурные градиенты от нагретой ячейки становятся не значимыми; a_1 , a_2 , a_3 – коэффициенты теплопроводности соответственно ЖК, стекла и воздуха. $T_1(d)$ и $T_2(l+d)$, – температуры соответственно на границе ЖК – стекло и стекло – воздух, T_0 – температура окружающей среды

Fig. 3. Scheme of LC cell. I is LC layer, II are glass substrates, III is air surrounding the cell, $2d$ is thickness of the LC layer, l is glass thickness, L is a characteristic thickness of the surrounding air at which temperature gradients from the heated cell become insignificant; a_1 , a_2 , a_3 are thermal conductivity coefficients of LC, glass and air, respectively. $T_1(d)$ and $T_2(l+d)$ are the temperatures at the LC – glass and glass – air interfaces, respectively, T_0 is the ambient temperature

Для расчета распределения температуры в ЖК-ячейке записывается уравнение теплопроводности в каждой среде и его решения удовлетворяют условиям сшивки на границах. Стационарное уравнение теплопроводности в слое ЖК имеет вид:

$$a_1 \partial^2 T_1 / \partial x^2 + w = 0, \quad (4)$$

где w – энергия, выделяющаяся в единице объема за единицу времени. Его решение имеет вид:

$$T_1 = -\frac{w}{2a_1} x^2 + A_1 x + B_1. \quad (5)$$

В силу симметрии задачи $A_1 = 0$. Для стекла (область II) и воздуха (область III) можно написать стационарные уравнения теплопроводности:

$$\begin{aligned} a_2 \partial^2 T_2 / \partial x^2 &= 0; \\ a_3 \partial^2 T_3 / \partial x^2 &= 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где T_3 – температура, при которой температурные градиенты от ячейки становятся не значимыми.

Их решения имеют вид:

$$\begin{aligned} T_2 &= A_2 x + B_2; \\ T_3 &= A_3 x + B_3. \end{aligned} \quad (7)$$

Для определения коэффициентов B_1 , A_2 , B_2 , A_3 , B_3 используем условия сшивки функций (5) и (7) на границах раздела сред. Эти условия заключаются в непрерывности тепловых потоков на границах, т. е.:

$$\begin{cases} T_1|_{x=d} = T_2|_{x=d} \\ a_1 \partial T_1 / \partial x|_{x=d} = a_2 \partial T_2 / \partial x|_{x=d} \\ T_2|_{x=d+l} = T_3|_{x=d+l} \\ a_2 \partial T_2 / \partial x|_{x=d+l} = a_3 \partial T_3 / \partial x|_{x=d+l} \\ T_3|_{x=d+l+L} = T_0 \end{cases} \quad (8)$$

Подстановка функций (5) и (7) в систему уравнений (8) позволяет определить все перечисленные выше коэффициенты.

В наших экспериментах с помощью термопары измерялась установившаяся температура T на внешней поверхности стекол. Используя найденные значения коэффициентов, находим эту температуру:

$$T = T_2(d+l) = T_0 + \frac{w d L}{a_3}. \quad (9)$$

Из формулы (9) следует, что температура T ячейки должна увеличиваться при увеличении толщины d ЖК-слоя по линейному закону.

Для расчета зависимости T от частоты f поля и его амплитуды E необходимо знать зависимость w от этих величин. В наших экспериментах к ЖК-слою прикладывалось напряжение в виде меандра. На каждом полупериоде напряжения в ЖК-слое возникает ток переполаризации J_p , изменяющийся по экспоненциальному закону: $J_p = J_{p0} \exp(-t/\tau)$, где τ – время релаксации тока. Тогда энергия w , выделяющаяся в ЖК-слое за счет протекания тока переполаризации, имеет вид:

$$w = 2f \int_0^{1/f} E j_{p0} \exp(-t/\tau) dt = j_{p0} E \tau \cdot f (1 - \exp(-1/2\tau \cdot f)), \quad (10)$$

где j_{p0} – плотность тока переполаризации. Так как $j_{p0} \sim E$, то $w \sim E^2$. Таким образом, экспериментальная температура T ЖК-ячейки должна зависеть квадратично от напряженности поля и экспоненциально от его частоты.

Нами экспериментально исследованы зависимости температуры T от напряженности поля E , толщины ЖК-слоя d и частоты f . На рисунке 4 представлены экспериментальные зависимости температуры от напряженности поля для трех ЖК-ячеек различной толщины, а также их аппроксимации. Аппроксимация выполнялась функцией $T = T_0 + C \cdot E^2$, которая является следствием соотношений (9) и (10). C – константа, связанная с толщиной ЖК-слоя, частотой и другими параметрами ЖК-ячейки. Все измерения проводились при фиксированной частоте 400 кГц. Полученные результаты показывают, что температура зависит квадратично от напряженности поля, что согласуется с результатами наших расчетов и работы [20].

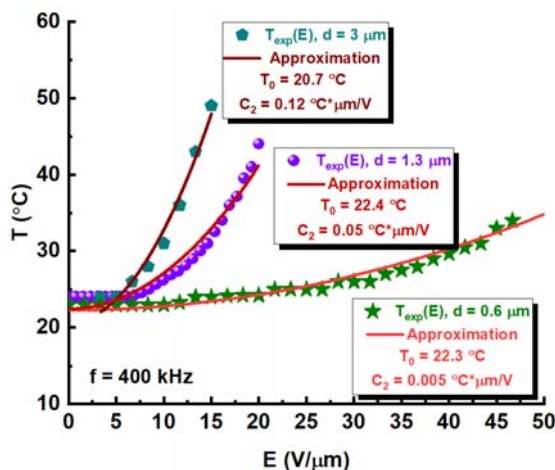


Рис. 4. Зависимости температуры С*ЖК-ячеек от напряженности поля E для ячеек с различной толщиной слоя С*ЖК

Fig. 4. Dependences of FLC cells temperature on the field strength E for the cells with different thickness of LC layer

Используя результаты рис. 4, построим зависимости T от толщины ЖК-слоя при различных напряженностях поля, представленные на рис. 5. Из этого рисунка следует, что полученные зависимости являются линейными, что согласуется с формулой (9).

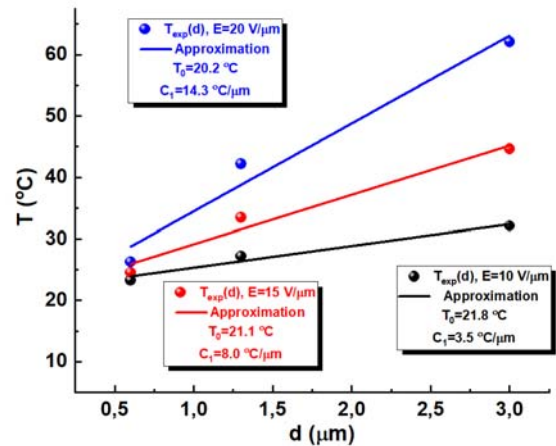


Рис. 5. Зависимости температуры T С*ЖК-ячеек от толщины d слоя С*ЖК при напряженностях поля $E = 10, 15, 20$ В/мкм

Fig. 5. Dependences of FLC cells temperature T on the thickness d of the FLC layer at field strengths $E = 10, 15, 20$ V/μm

Экспериментальные результаты исследования зависимости температуры от частоты приложенного напряжения представлены на рис. 6.

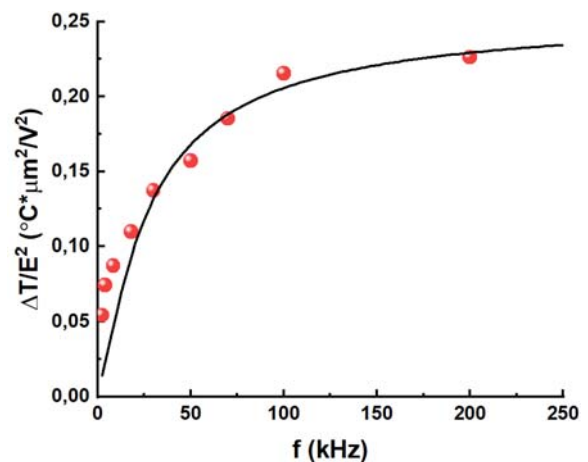


Рис. 6. Зависимость отношения изменения температуры $\Delta T = T - T_0$ С*ЖК-576 ячейки к квадрату напряженности поля E от частоты приложенного поля. Толщина слоя С*ЖК-576 $d = 3,1$ мкм

Fig. 6. Dependence of the ratio in temperature of the FLC-576 cell change $\Delta T = T - T_0$ to the field strength square on the applied field frequency. The FLC layer thickness is $3.1 \mu\text{m}$

Из формул (9) и (10) следует, что изменение температуры ΔT связано с частотой f зависимостью (11)

$$\Delta T / E_0^2 = D \cdot f \cdot (1 - \exp(-1 / 2\tau f)), \quad (11)$$

где D – константа, связанная с толщиной ЖК-слоя и другими параметрами ЖК-ячейки. Аппроксимация экспериментальных результатов функцией (11) показывает хорошее согласие расчетов и эксперимента. Расчетная кривая представлена сплошной линией на рис. 6. При сопоставлении экспериментальных результатов с формулой (11) получено значение времени релаксации тока переполаризации τ , которое составляет 10 мкс.

Выводы

Субмегагерцовая частота электрооптической модуляции может быть достигнута с помощью жидкокристаллических электрооптических ячеек, работающих в режиме DHF-эффекта, в области дисперсии диэлектрической восприимчивости. В эксперименте достигнута частота электрооптической модуляции 500 кГц при контрастном отношении около 20:1, амплитуде управляющего напряжения 32 В и времени электрооптического отклика 400 нс. Для минимизации разогрева С*ЖК-ячейки токами переполаризации толщина слоя жидкого кристалла была уменьшена до 0,6 мкм. При указанных условиях стационарная температура ячейки составляла 33 °С, что всего на 10 °С превышало температуру окружающей среды. Принимая во внимание, что температура фазового перехода из сегнетоэлектрической фазы С* в параэлектрическую фазу N* составляет 83 °С, можно считать, что вопрос с минимизацией саморазогрева электрооптического модулятора субмегагерцового диапазона успешно решен.

Благодарность: авторы благодарны Александре Жукович-Гордеевой за помощь в изготовлении ЖК-ячеек.

Acknowledgments: the authors are grateful to miss Alexandra Zhukovich-Gordeeva for the help in the production LC-cells.

Список источников / References

1. Beresnev L.A., Chigrinov V.G., Dergachev D.I., Pozhidaev E.P., Funfshilling J., Schadt M. Deformed helix ferroelectric liquid crystal display: A new electrooptic mode in ferroelectric chiral smectic C liquid crystals. *Liq. Cryst.*, 1989, **5** (4), 1171–1177. DOI: 10.1080/02678298908026421.
2. Pozhidaev E.P., Torgova S.I., Barbashov V.A. Electro-optics of ferroelectric and antiferroelectric liquid crystal helical nanostructures. *J. Mol. Liq.*, 2022, **367**, 120493. DOI: 10.1016/j.molliq.2022.120493.
3. Panarin Y., Pozhidaev E., Chigrinov V. Dynamics of controlled birefringence in an electric field deformed helical structure of a ferroelectric liquid crystal. *Ferroelectrics*, 1991, **114**, 181–186. DOI: 10.1080/00150199108221580.
4. Pozhidaev E., Pikin S., Ganzke D., Shevtchenko S., Haase W. High frequency and high voltage mode of deformed helix ferroelectric liquid crystals in a broad temperature range. *Ferroelectrics*, 2000, **246**, 235–245. DOI: 10.1080/00150190008230071.
5. Pozhidaev E.P., Molkin V.E., Chigrinov V.G. Smectic nanostructures with a typical size less than a visible light wavelength: physics and electro-optics. *Photonics Letters of Poland*, 2011, **3** (1), 11–13. DOI: 10.4302/plp.2011.1.05.
6. Mikhailenko V., Krivoshey A., Pozhidaev E., Popova E., Fedoryako A., Gamzaeva S., Barbashov V., Srivastava A.K., Kwok H.S., Vashchenko V. The nano-scale pitch ferroelectric liquid crystal materials for modern display and photonic application employing highly effective chiral components: Trifluoromethylalkyl diesters of p-terphenyldicarboxylic acid. *J. Mol. Liq.*, 2019, **281**, 186–195. DOI: 10.1016/j.molliq.2019.02.047.
7. Kiselev A.D., Pozhidaev E.P., Chigrinov V.G., Kwok H.S. Polarization-gratings approach to deformed-helix ferroelectric liquid crystals with subwavelength pitch. *Phys. Rev. E*, 2011, **83**, 031703. DOI: 10.1103/PhysRevE.83.031703.
8. Guo Q., Brodzeli Z., Pozhidaev E.P., Fan F., Chigrinov V.G., Kwok H.S., Silvestri L., Ladouceur F. Fast electro-optical mode in photo-aligned reflective deformed helix ferroelectric liquid crystal cells. *Optics Lett.*, 2012, **37** (12), 2343–2345. DOI: 10.1364/OL.37.002343.
9. Pozhidaev E.P., Tkachenko T.P., Kuznetsov A.V., Kompanets I.N. In-plane switching deformed helix ferroelectric liquid crystal display cells. *Crystals*, 2019, **9**, 543. DOI: 10.3390/cryst9100543.
10. Pozhidaev E., Torgova S., Minchenko M., Yednak C.A.R., Strigazzi A., Miraldi E. Phase modulation and ellipticity of the light transmitted through a smectic C* layer with short helix pitch. *Liq. Cryst.*, 2010, **37** (8), 1067–1081. DOI: 10.1080/02678292.2010.486482.
11. Sasaki T., Kajikawa S., Naka Y. Dynamic amplification of light signals in photorefractive ferroelectric liquid crystalline mixtures. *Faraday Discuss.*, 2014, **174** (1), 203–218. DOI: 10.1039/C4FD00068D.
12. *European Patent EP0293763A2*. Smectic liquid crystal mixture / Terashima K., Ichihashi M., Takeshita F., Kikuchi M., Furukawa K.; publ. 1988.

13. Pozhidaev E.P., Torgova S.I., Molkin V.M., Minchenko M.V., Vashchenko V.V., Krivoshey A. I., Strigazzi A. New Chiral Dopant Possessing High Twisting Power. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2009, **509**(1), 300–308, DOI: 10.1080/15421400903054667.
14. Zhukov A.A., Pozhidaev E.P., Bakulin A.A., Babaevskii P.G. Energy criteria for orientation of smectic C* liquid crystals in electrooptic elements. *Crystallogr. Rep.*, 2006, **51**, 680–684. DOI: 10.1134/S1063774506040237.
15. Panov V., Vij J.K., Shtykov N.M. A field-reversal method for measuring the parameters of a ferroelectric liquid crystal. *Liq. Cryst.*, 2001, **28** (4), 615–620. DOI: 10.1080/02678290010020175.
16. Pozhidaev E.P., Minchenko M.V., Kuznetsov A.V., Tkachenko T.P., Barbashov V.A. Broad temperature range ferroelectric liquid crystal as a highly sensitive quadratic electro-optical material. *Optics Lett.*, 2022, **47** (7), 1598–1601. DOI: 10.1364/OL.450919.
17. Pozhidaev E.P., Kiselev A.D., Srivastava A.K., Chigrinov V.G., Kwok H.S., Minchenko M.V. Orientational Kerr effect and phase modulation of light in deformed-helix ferroelectric liquid crystals with subwavelength pitch. *Phys. Rev. E*, 2013, **87**, 052502. DOI: 10.1103/PhysRevE.87.052502.
18. Berreman D.W. Twisted smectic c phase: Unique optical properties. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 1973, **22**, 175–184. DOI: 10.1080/15421407308083342.
19. Hori K. Angular dependence of selective reflection from the chiral smectic C phase. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 1982, **82** (1), 13–17. DOI: 10.1080/01406568208070506.
20. Yin Y., Shiyanovskii S.V., Lavrentovich O.D. Electric heating effects in nematic liquid crystals. *J. Appl. Phys.*, 2006, **100** (2), 024906. DOI: 10.1063/1.2214466.

²**Кузнецов А. В.** – проведение исследований, анализ полученных результатов, подготовка иллюстраций.

³**Казначеев А. В.** – написание текста статьи, подготовка иллюстраций.

⁴**Торгова С. И.** – приготовление смеси, редактирование текста статьи.

⁵**Ткаченко Т. П.** – подготовка иллюстраций, редактирование текста статьи.

Contribution of the authors:

¹**Pozhidaev E. P.** – development of the concept of scientific work, methodology and research implementation, writing the text of the article.

²**Kuznetsov A. V.** – conducting research, analysis of the results, preparation of the illustrations.

³**Kaznacheev A. V.** – writing the text of the article, preparation of the illustrations.

⁴**Torgova S. I.** – preparation of the mixture, editing the text of the article.

⁵**Tkachenko T. P.** – preparation of the illustrations, editing the text of the article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

¹<https://orcid.org/0000-0002-9465-5344>

²<https://orcid.org/0000-0002-1947-6207>

³<https://orcid.org/0009-0008-1814-9256>

⁴<https://orcid.org/0000-0001-6599-5801>

⁵<https://orcid.org/0000-0003-3424-0013>

Вклад авторов:

¹**Позжидаяев Е. П.** – разработка концепции научной работы, методологии и реализации исследования, написание текста статьи.

Поступила 19.10.2023, одобрена 13.11.2023, принята 20.11.2023

Received 19.10.2023, approved 13.11.2023, accepted 20.11.2023