

УДК 532.5, 532.6

DOI: 10.18384/2310-7251-2022-3-59-74-86

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ОПТОФЛЮИДНОЙ ЯЧЕЙКЕ С ПОЛИМЕРНЫМИ ПОДЛОЖКАМИ

**Саидгазиев А. Ш., Пасечник С. В., Шмелева Д. В., Харламов С. С.,
Васильева А. А.**

*МИРЭА – Российский технологический университет
119454, г. Москва, проспект Вернадского, д. 78, Российская Федерация*

Аннотация

Цель работы – описание использования электрокинетических явлений в жидких кристаллах для создания нового класса устройств микрофлюидики – оптофлюидиков, предназначенных для управления электромагнитным излучением, в том числе, ТГц-диапазона частот.

Процедуры и методы. Оптический метод исследования изменений ориентационной структуры в слоях ЖК, вызванных сдвиговым течением, генерируемым электроосмотическим насосом. Моделирование поведения ЖК в экспериментальной ячейке, содержащей электроосмотический насос и плоские слои нематического жидкого кристалла.

Результаты. Экспериментальные зависимости интенсивности поляризованного излучения, проходящего через плоские слои ЖК, от управляющего напряжения, приложенного к электроосмотическому насосу. Результаты расчётов гидродинамических и механо-оптических характеристик экспериментальной ЖК-ячейки.

Теоретическая и/или практическая значимость. Реализована новая идея, заключающаяся в использовании сдвигового течения, индуцированного электроосмотическим насосом, для управления оптическим излучением. Разработанная конструкция ЖК-ячейки и полученные экспериментальные результаты могут быть использованы для создания новых устройств управления электромагнитным излучением, в том числе, ТГц-диапазона частот.

Ключевые слова: нематический жидкий кристалл, терагерцовый диапазон, электрокинетические явления, осмотический поток, конфигурация директора, интенсивность оптического излучения, E7, полипропилен

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (грант № ФСФЗ-2020-0019) и Российского фонда фундаментальных исследований (соглашение РФИ № 19-32-90055)

USE OF ELECTROKINETIC PHENOMENA IN AN OPTOFLUID CELL WITH POLYMER SUBSTRATES

A. Saidgaziev, S. Pasechnik, D. Shmeleva, S. Kharlamov, A. Vasilyeva

*MIREA – Russian Technological University
prosp. Vernadskogo 78, Moscow 119454, Russian Federation*

Abstract

Aim. We describe the use of electrokinetic phenomena in liquid crystals to produce a new class of microfluidics devices, i.e. optofluidics designed to control electromagnetic radiation, including the THz frequency range.

Methodology. Use is made of an optical method for studying changes in the orientational structure in LC layers caused by a shear flow generated by an electroosmotic pump. The LC behavior in an experimental cell containing an electroosmotic pump and flat layers of a nematic liquid crystal is simulated.

Results. We have obtained experimental dependences of the intensity of polarized radiation passing through flat LC layers on the control voltage applied to the electroosmotic pump. Results of calculations of hydrodynamic and mechano-optical characteristics of an experimental LC cell are presented.

Research implications. A new idea has been implemented, which consists in using a shear flow induced by an electroosmotic pump to control optical radiation. The developed design of the LC cell and the obtained experimental results can be used to develop new devices for controlling electromagnetic radiation, including the THz frequency range.

Keywords: nematic liquid crystal, terahertz range, electrokinetic phenomena, osmotic flow, director configuration, optical radiation intensity, E7, polypropylene

Acknowledgments. This work was supported by Ministry of Education and Science of Russian Federation (Grant No. FSFZ-2020- 0019) and Russian Foundation for Basic Research (RFBR Project No. 19-32-90055).

Введение

Широкое применение жидких кристаллов (ЖК) в дисплейной промышленности основано на электрооптических эффектах, возникающих вследствие изменения начальной ориентации локальной оптической оси (директора) под действием электрического поля. Альтернативным способом управления оптическими свойствами ЖК является использование сдвиговых потоков, которые также индуцируют переориентацию ЖК [3]. Хотя исследования механооптических свойств жидких кристаллов имеют давнюю историю, только в настоящее время они были реализованы на базе микрофлюидного чипа, что позволило объявить о появлении нового класса ЖК – оптофлюидных устройств [9]. Такие устройства могут быть использованы в качестве модуляторов света для различных частотных диапазонов, например видимого и ближнего инфракрасного. В последнее время было отмечено, что применение механооптических явлений представляет особый интерес для разработки ЖК-устройств, работающих в ТГц-диапазоне оптофлюидных ЖК-модуляторов [4]. Стандартная схема электрического управ-

ления, используемая в ЖК-дисплеях, не работает в ТГц-диапазоне, в частности из-за больших потерь энергии в электродах ИТО. Поэтому были предложены альтернативные варианты управления ТГц-излучением с помощью жидкокристаллических элементов.

Применение сдвиговых потоков вместо магнитных полей (или дополнительно к магнитным полям) может рассматриваться как перспективный подход к разработке жидкокристаллических модуляторов, работающих в ТГц-диапазоне. Недавно было показано, что приложение относительно низкого электрического напряжения постоянного тока к тонким полимерным пористым плёнкам вызывало интенсивные электроосмотические потоки, достаточные для практического применения в оптофлюидных модуляторах ТГц-диапазона частот [5; 7; 8]. Это позволило предложить новый тип оптофлюидного жидкокристаллического модулятора, который включает электроосмотический насос, производящий электроосмотические потоки, а также ряд плоских каналов с заданной начальной ориентацией.

Конструкция и принцип действия оптофлюидной ячейки

В данной работе была выбрана в качестве объекта исследования нематическая жидкокристаллическая смесь E7 (рис. 1) [6]. Данная смесь обладает широким температурным интервалом существования нематической фазы, что позволяет использовать её в моделях технических устройств. Кроме того, в литературе имеется обширная информация о данной смеси (в том числе показатель преломления и коэффициент поглощения в ТГц-диапазоне), позволяющая проводить математическое моделирование рассматриваемых явлений.

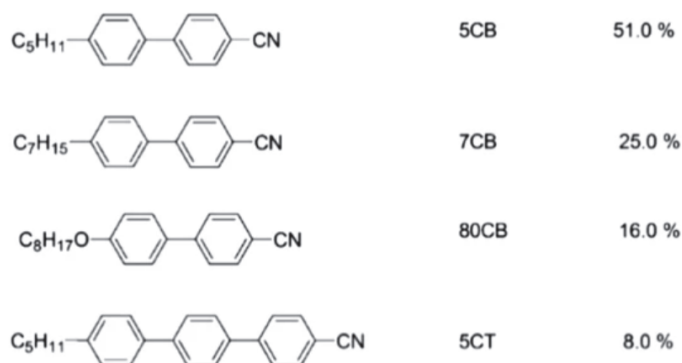


Рис. 1 / Fig. 1. Молекулярная структура E7 / Molecular structure of E7

Источник: [6]

Отметим, что E7 характеризуется относительно большим значением анизотропии показателя преломления в ТГц-диапазоне частот ($\Delta n = (n_e - n_o) = 0,13$) [2], что позволяет рассчитывать на эффективные модуляции электромагнитного излучения. Материальные параметры E7 приведены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Материальные параметры ЖК E7, используемые в модели /**Material parameters of LCD E7 used in the model**

Параметры	Обозначение	Значение параметров (при $t \approx 23^\circ\text{C}$)
Коэффициент Месовича	η_1	0.264 Па*с
Вращательная вязкость	γ_1	0.224 Па*с
Модуль упругости Франка	K_{33}	$17.5 \cdot 10^{-12}$ Н
Главные значения тензора диэлектрической проницаемости	$\epsilon_{\perp}$	2.61
	$\epsilon_{\parallel}$	3.03
Показатель преломления необыкновенной волны (для 1 ТГц)	n_e	1.73
Показатель преломления обыкновенной волны (для 1 ТГц)	n_o	1.6
Коэффициент поглощения (для 1 ТГц)	α	18 см^{-1}

Источник: [2]

Ранее в подобных экспериментах использовались стеклянные подложки [7], имеющие малое поглощение в видимом диапазоне длин волн. Однако данный материал не подходит для использования в ТГц-диапазоне частот из-за большого значения коэффициента поглощения. В связи с этим, в описанной ниже конструкции ЖК-ячейки использовались полимерные подложки (полипропилен), имеющие относительно низкое поглощение в ТГц-диапазоне частот ($\alpha = 0.58 \text{ см}^{-1}$ при 1 ТГц) [1].

Оптофлюидная ячейка (рис. 2) состоит из двух электроосмотических насосов, расположенных в её концевых частях, и двух плоских капилляров, расположенных в её центральной части. Каждый насос включает в себя образец пористой ПЭТ-плёнки толщиной 23 мкм и площадью $S = 0.6 \text{ см}^2$ с большим количеством ($N_0 = 8 \cdot 10^7$ шт/см²) одинаковых субмикронных открытых пор диаметром $d=0.5$ мкм, ориентированных вдоль нормали (ось z) к плоскости плёнки. Плёнка расположена между двумя электродами из тонкой медной фольги с толщиной 40 мкм, необходимыми для создания внутри пор электрического поля напряжённостью E_i и электроосмотического потока после приложения к электродам постоянного напряжения U .

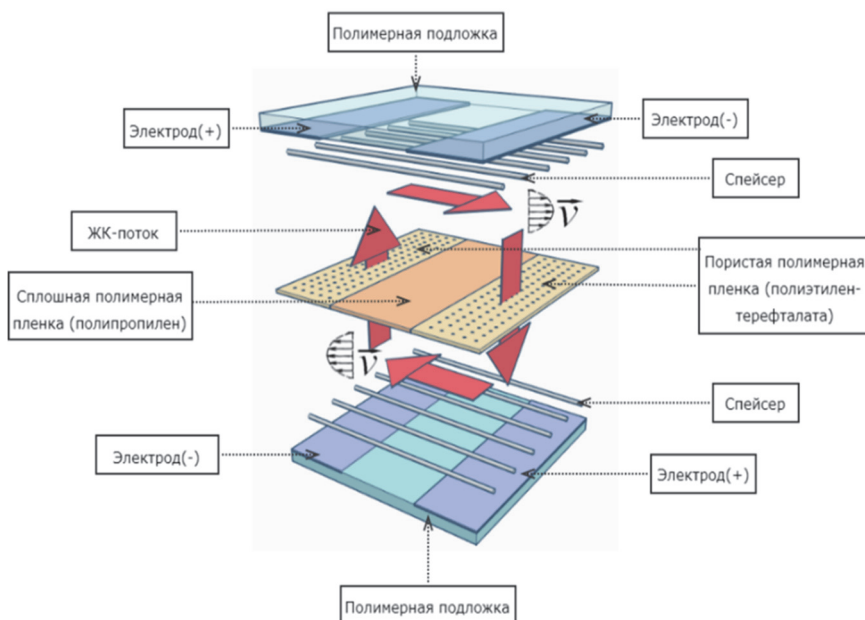


Рис. 2 / Fig. 2. Конструкция и принцип действия оптофлюидной ячейки /
Design and principle of operation of an optofluidic cell

Источник: по данным авторов.

В свою очередь, это приводит к возникновению течения Пуазейля с параболическим профилем скоростей $v(z)$ в двух плоских каналах с зазором $h = 52$ мкм с исходной гомеотропной ориентацией, образованных полимерными подложками из полипропилена с толщиной 400 мкм и центральной полипропиленовой перегородкой с толщиной 120 мкм. Полипропиленовые подложки, центральная перегородка и ПЭТ-плёнки предварительно обрабатывались 5%-м раствором хромолана для получения гомеотропной поверхностной ориентации.

Экспериментальная установка была смонтирована на оптический скамье (рис. 3). Ячейка закреплена на оптической скамье и помещена между скрещенными поляризаторами, ориентированными под азимутальным углом 45° относительно направления потока ЖК через плоские каналы. Приложение постоянного электрического напряжения U к ячейке вызывало электроосмотический поток в насосах, что приводило к возникновению течения Пуазейля в плоских каналах.

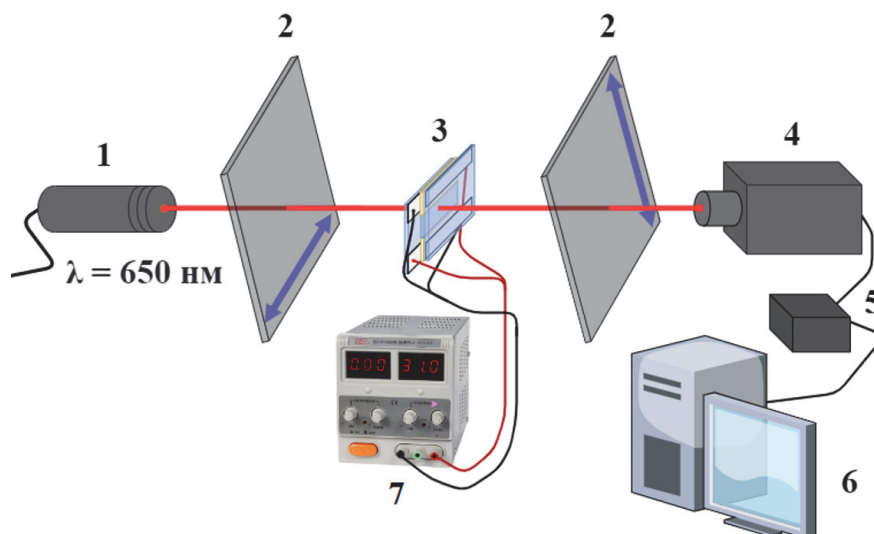


Рис. 3 / Fig. 3. Схема экспериментальной установки с ЖК-ячейкой.

1 – источник лазерного излучения, 2 – поляризатор, 3 – ЖК-ячейка, 4 – фотоприёмник, 5 – блок АЦП, 6 – персональный компьютер, 7 – источник питания /
Scheme of the experimental setup with an LC cell.

1 – laser radiation source, 2 – polarizer, 3 – LCD cell, 4 – photodetector, 5 – ADC unit, 6 – personal computer, 7 – power supply

Источник: по данным авторов.

В свою очередь, поток Пуазейля приводил к отклонению ориентации от начальной гомеотропной структуры и соответствующим изменениям интенсивности света с длиной волны 650 нм, которые регистрировались фотодиодом и после преобразования в цифровой сигнал поступали на приёмник для хранения и обработки информации в программе L-CARD.

Ключевым эффектом, ответственным за изменения интенсивности света являлось двулучепреломление. В результате проявления пространственной анизотропии показателя преломления возникает разница в фазовых задержках между обыкновенными и необыкновенными лучами, вследствие чего на выходе из анализатора напряжённость электрического поля обоих вышедших лучей векторно складывается, что приводит к осцилляции интенсивности.

Результаты эксперимента с оптофлюидной ячейкой

На рис. 4 приведены временные зависимости интенсивности света от времени, полученные при включении и выключении управляющего напряжения U .

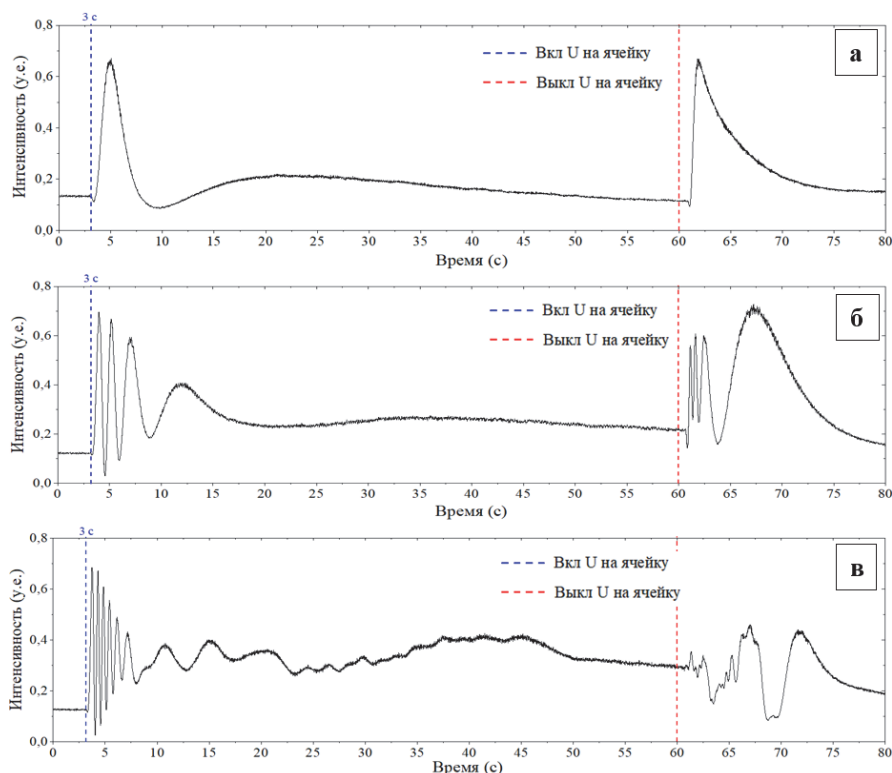


Рис. 4 / Fig. 4. Зависимость интенсивности (у. е.) от времени (с) $\delta(t)$ для напряже-
ния на ячейке (а) $U = 6\text{В}$, (б) $U = 10\text{В}$ и (в) $U = 14\text{В}$ / Dependences of intensity (a. u.)
on time (с) $\delta(t)$ for a cell voltage (а) $U = 6\text{В}$, (б) $U = 10\text{В}$ and (в) $U = 14\text{В}$

Источник: по данным авторов.

В процессе получения экспериментальных данных на ячейку подавалось постоянное напряжение до 20В. Основным условием выбора экспериментальных зависимостей, соответствующих линейному движению директора в плоскости потока, являлось отсутствие искажения осцилляций интенсивности как во время роста фазы при поданном потоке, так и во время убывания фазы при возвращении директора ЖК в исходную ориентацию. Данному выбору соответствовал диапазон напряжений 6–10В, при больших напряжениях возникали искажения временных зависимостей, которые можно объяснить выходом директора из плоскости потока и появлением долгоживущих гидродинамических неустойчивостей [3].

Обработка первичных зависимостей $I(t)$ позволила определить временные зависимости (рис. 5) разности фаз $\delta(t)$ между обыкновенным и необыкновенными лучами согласно формуле (1):

$$I(t) = I_0 * \sin^2 2\varphi * \sin^2 \frac{\delta(t)}{2}, \sin^2 2\varphi = 1 \quad (1)$$

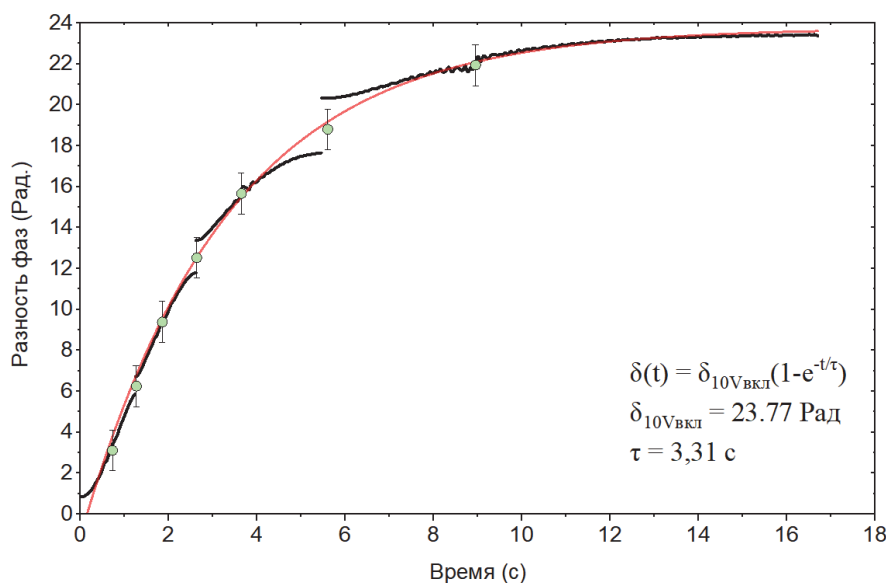


Рис. 5 / Fig. 5. Зависимость фазовой задержки $\delta(t)$ от времени, прошедшего после включения управляющего напряжения $U = 10\text{В}$ / Dependences of the phase delay $\delta(t)$ on the time elapsed after switching on the control voltage $U = 10\text{В}$

Источник: по данным авторов.

Экспериментальная зависимость хорошо описывается экспоненциальным законом (2), которому соответствует сплошная линия на рис. 5:

$$\delta(t) = \delta_{\max} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = 23.77 \left(1 - e^{-\frac{t}{3.31}}\right) \quad (2)$$

Полученное характеристическое время $\tau = 3,31 \text{ с}$ близко к теоретическому значению ($\tau_n = 3,46 \text{ с}$) времени релаксации директора к исходному состоянию без учёта обратного потока (3):

$$\tau_n = \frac{\gamma_1 * h^2}{\pi^2 * K_{33}} \quad (3)$$

Результаты моделирования работы оптофлюидной ячейки

Моделирование проводилось на основе предложенной ранее гидродинамической модели [7], включающей внутреннее Z_i и внешнее Z_e гидродинамические сопротивления, соединённые последовательно.

Объёмный расход через капилляр Q_i в зависимости от осевой составляющей E_z напряжённости электрического поля представлен в виде выражения (4):

$$Q_i = -(\varepsilon_0 * \varepsilon * \xi) \left(\frac{\pi * R^2}{\eta}\right) * E_z, \quad kR \gg 1 \quad (4)$$

где η – сдвиговая вязкость жидкости в поре, ξ – дзета потенциал.

Общая объёмная скорость Q потока ЖК выражается формулой (5):

$$Q = \frac{Q_i N_0 S}{(1+r)}, r = Z_e/Z_i \quad (5)$$

Угол поворота директора ЖК может быть записан в виде (6):

$$\Theta_r(\tilde{z}) = \frac{\alpha_2 * G}{6k_{33} * \eta_1} * z * \left(z^2 - \frac{h^2}{4} \right) \quad (6)$$

Разность фаз δ представляется выражением (7):

$$\delta = \frac{2 * \pi * 2h}{\lambda} * \frac{n_o(n_e^2 - n_o^2)}{2n_e^2} * \langle \Theta^2 \rangle \quad (7)$$

где n_o и n_e – показатель преломления обыкновенной и необыкновенной волны; $\langle \Theta^2 \rangle$ – усреднённый квадрат угла Θ отклонения директора от исходной гомеотропной ориентации; λ – длина волны излучателя, проходящего через ячейку.

На рис. 6 в свою очередь приведены зависимости рассчитанных величин (объёмной скорости потока и угла поворота директора ЖК при $z = 0.3h$) от напряжённости электрического поля при разных значениях вязкости η ЖК в поре.

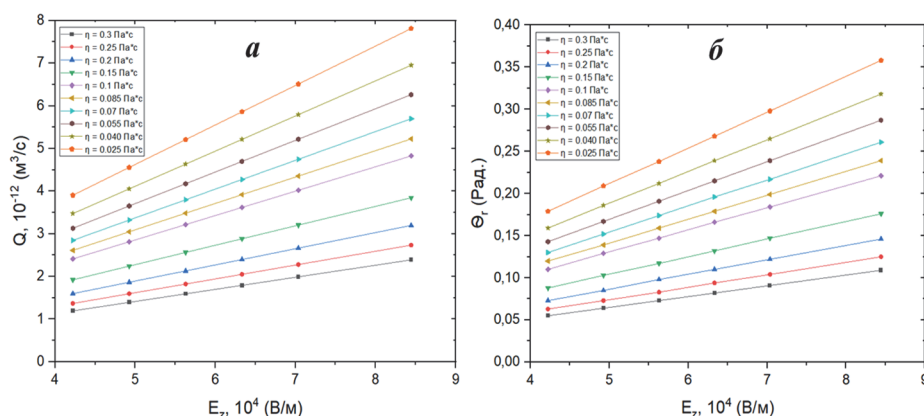


Рис. 6 / Fig. 6. Зависимости параметров от напряжённости электрического поля в поре: (а) объёмной скорости потока; (б) угла поворота директора ЖК при $z = 0.3h$ / Dependences of the parameters on the electric field strength in the pore: (a) volumetric flow rate; (b) rotation angle of the LCD director

Источник: по данным авторов.

Были проведены расчёты разности фаз от напряжённости и их сравнение с полученными экспериментальными значениями (рис. 7). Результат срав-

нения показывает совпадение экспериментальных и теоретических зависимостей $\delta(E_z)$ при значениях сдвиговой вязкости в поре порядка $\eta = 0,1 \text{ Па}\cdot\text{с}$, что находится в диапазоне значений сдвиговой вязкости для Е7 ($0,04 \dots 0,264 \text{ Па}\cdot\text{с}$).

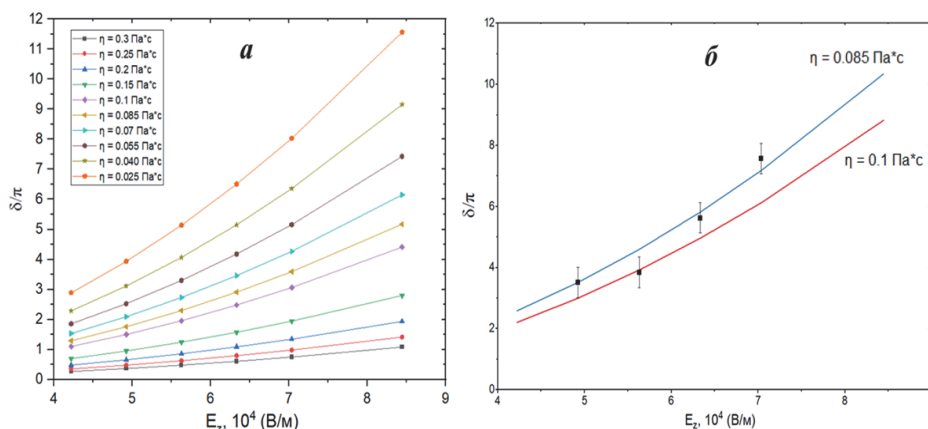


Рис. 7 / Fig. 7. (а) Зависимости разность фаз от напряжённости электрического поля в поре; (б) Сравнение теоретических и экспериментальных полученных данных зависимости разности фаз от напряжённости поля / (а) Dependences of the phase difference on the electric field strength in the pore; (б) comparison of theoretical and experimental data on the dependence of the phase difference on the field strength

Источник: по данным авторов.

Заключение

Описаны возможности практического применения оптофлюидной ячейки. Разработана и реализована уникальная конструкция оптофлюидной ЖК-ячейки. Выполнен комплекс оптических исследований поведения плоских ЖК-слоёв при воздействии электроосмотических потоков. Рассчитаны параметры ЖК-ячейки, определяющие оптический отклик ЖК-слоёв на воздействие электроосмотического потока. Установлена возможность использования оптофлюидной ячейки для модуляции оптического излучения, в том числе в терагерцовом диапазоне частот. Выполнено сравнение результатов обработки экспериментальных данных со следствиями существующей теории ЖК. Установлен диапазон напряжений (0–10В), соответствующий линейному движению директора плоскости потока.

Статья поступила в редакцию 18.05.2022 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Studying of dielectric properties of polymers in the terahertz frequency range / Fedulova E. V., Nazarov M. M., Angeluts A. A., Kitai M. S., Sokolov V. I., Shkurinov A. P. // Proceedings of SPIE. 2012. Vol. 8337. Saratov Fall Meeting 2011: Optical Technologies in Biophysics and Medicine XIII. id. 83370I. DOI: 10.1117/12.923855.

2. Refractive indices and birefringence of hybrid liquid crystal - nanoparticles composite materials in the terahertz region / Mavrona E., Chodorow U., Barnes M. E., Parka J., Palka N., Saitzek S., Blach J.-F., Apostolopoulos V., Kaczmarek M. // *AIP Advances*. 2015. Vol. 5. id. 077143. DOI: 10.1063/1.4927392.
3. Pasechnik S. V., Chigrinov V. G., Shmeliova D. V. *Liquid Crystals: Viscous and Elastic Properties in Theory and Applications*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2009. 436 p.
4. Pasechnik S. V., Shmeliova D. V. Terafluidic devices: Perspectives and Problems // *IEEE 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. 2015. P. 1–2. DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2015.7327669.
5. Electrorheology of Liquid Crystals / Pasechnik S. V., Shmeliova D. V., Kharlamov S. S., Semina O. A., Saidgaziev A. Sh., Chigrinov V. G. // *Жидкие кристаллы и их практическое использование*. 2018. Т. 18. № 3. С. 89–93. DOI: 10.18083/LCAppl.2018.3.89.
6. Electro-optical effects of organic N-benzyl-2-methyl-4-nitroaniline dispersion in nematic liquid crystals / Selvaraj P., Subramani K., Srinivasan B., Hsu C.-J., Huang C.-Y. // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10 (1). id. 14273. DOI: 10.1038/s41598-020-71306-1.
7. Liquid crystal optofluidic device based on electro-kinetic phenomena in porous polymer films / Shmeliova D. V., Saidgaziev A. Sh., Kharlamov S. S., Visotsky A. S., Safonov M. A., Konovalova A. A., Pasechnik S. V. // *Жидкие кристаллы и их практическое использование*. 2020. Т. 20. № 3. С. 72–79. DOI: 10.18083/LCAppl.2020.3.72.
8. Electrokinetic Phenomena in Homeotropic Layers of Nematic Liquid Crystal / Shmeliova D. V., Pasechnik S. V., Kharlamov S. S., Saidgaziev A. Sh., Podolsky V. A. // *Жидкие кристаллы и их практическое использование*. 2021. Т. 21. № 3. С. 39–44. DOI: 10.18083/LCAppl.2021.3.39.
9. Optofluidic modulator based on peristaltic nematogen microflows / Vasdekis A. E., Cuennet J. G., De Sio L., Psaltis D. // *Nature Photonics*. 2011. Vol. 5. Iss. 4. P. 234–238. DOI: 10.1038/NPHOT.2011.18.

REFERENCES

1. Fedulova E. V., Nazarov M. M., Angeluts A. A., Kitai M. S., Sokolov V. I., Shkurinov A. P. Studying of dielectric properties of polymers in the terahertz frequency range. In: *Proceedings of SPIE*, 2012, vol. 8337. Saratov Fall Meeting 2011: Optical Technologies in Biophysics and Medicine XIII, id. 83370I. DOI: 10.1117/12.923855.
2. Mavrona E., Chodorow U., Barnes M. E., Parka J., Palka N., Saitzek S., Blach J.-F., Apostolopoulos V., Kaczmarek M. Refractive indices and birefringence of hybrid liquid crystal - nanoparticles composite materials in the terahertz region. In: *AIP Advances*, 2015, vol. 5, id. 077143. DOI: 10.1063/1.4927392.
3. Pasechnik S. V., Chigrinov V. G., Shmeliova D. V. *Liquid Crystals: Viscous and Elastic Properties in Theory and Applications*. Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH, 2009. 436 p.
4. Pasechnik S. V., Shmeliova D. V. Terafluidic devices: Perspectives and Problems. In: *IEEE 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2015, p. 1–2. DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2015.7327669.
5. Pasechnik S. V., Shmeliova D. V., Kharlamov S. S., Semina O. A., Saidgaziev A. Sh., Chigrinov V. G. Electrorheology of Liquid Crystals. In: *Zhidkie kristally i ikh prakticheskoe ispol'zovanie* [Liquid Crystals and their Application], 2018, vol. 18, no. 3, pp. 89–93. DOI: 10.18083/LCAppl.2018.3.89.

6. Selvaraj P., Subramani K., Srinivasan B., Hsu C.-J., Huang C.-Y. Electro-optical effects of organic N-benzyl-2-methyl-4-nitroaniline dispersion in nematic liquid crystals. In: *Scientific Reports*, 2020, vol. 10 (1), id. 14273. DOI: 10.1038/s41598-020-71306-1.
7. Shmeliova D. V., Saidgaziev A. Sh., Kharlamov S. S., Visotsky A. S., Safonov M. A., Konovalova A. A., Pasechnik S. V. Liquid crystal optofluidic device based on electrokinetic phenomena in porous polymer films. In: *Zhidkie kristally i ikh prakticheskoe ispol'zovanie* [Liquid Crystals and their Application], 2020, vol. 20, no 3, pp. 72–79. DOI: 10.18083/LCAppl.2020.3.72.
8. Shmeliova D. V., Pasechnik S. V., Kharlamov S. S., Saidgaziev A. Sh., Podolsky V. A. Electrokinetic Phenomena in Homeotropic Layers of Nematic Liquid Crystal. In: *Zhidkie kristally i ikh prakticheskoe ispol'zovanie* [Liquid Crystals and their Application], 2021, vol. 21, no. 3, pp. 39–44. DOI: 10.18083/LCAppl.2021.3.39.
9. Vasdekis A. E., Cuennet J. G., De Sio L., Psaltis D. Optofluidic modulator based on peristaltic nematogen microflows. In: *Nature Photonics*, 2011, vol. 5, iss. 4, pp. 234–238. DOI: 10.1038/NPHOT.2011.18.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сайдгазиев Айвр Шавкатович – младший научный сотрудник проблемной лаборатории молекулярной акустики МИРЭА – Российского технологического университета;

e-mail: ayvrdedal@gmail.com;

Пасечник Сергей Вениаминович – доктор физико-математических наук, заведующий проблемной лабораторией молекулярной акустики МИРЭА – Российского технологического университета;

e-mail: s-p-a-s-m@mail.ru;

Шмелева Дина Владимировна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник проблемной лаборатории молекулярной акустики МИРЭА – Российского технологического университета;

e-mail: shmeliova@mail.ru;

Харламов Семен Сергеевич – младший научный сотрудник проблемной лаборатории молекулярной акустики МИРЭА – Российского технологического университета;

e-mail: semen.kharlamov.95@mail.ru;

Васильева Анастасия Алексеевна – инженер проблемной лаборатории молекулярной акустики МИРЭА – Российского технологического университета;

e-mail: barika@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Saidgaziev Aivr Shavkatovich – Research Assistant, Problematic Laboratory of Molecular Acoustics, MIREA – Russian Technological University;

e-mail: ayvrdedal@gmail.com;

Pasechnik Sergey Veniaminovich – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Laboratory Head, Problematic Laboratory of Molecular Acoustics, MIREA – Russian Technological University;
e-mail: s-p-a-s-m@mail.ru;

Shmeleva Dina Vladimirovna – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Problematic Laboratory of Molecular Acoustics, MIREA – Russian Technological University;
e-mail: shmeliova@mail.ru;

Kharlamov Semyon Sergeevich – Research Assistant, Problematic Laboratory of Molecular Acoustics, MIREA – Russian Technological University;
e-mail: semen.kharlamov.95@mail.ru;

Vasilieva Anastasia Alekseevna – Engineer, Problematic Laboratory of Molecular Acoustics, MIREA – Russian Technological University;
e-mail: barika@bk.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Саидгазиев А. Ш., Пасечник С. В., Шмелева Д. В., Харламов С. С., Васильева А. А. Использование электрокинетических явлений в оптофлюидной ячейке с полимерными подложками // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2022. № 3. С. 74-86.

DOI: 10.18384/2310-7251-2022-3-59-74-86

FOR CITATION

Saidgaziev A. Sh., Pasechnik S. V., Shmeleva D. V., Kharlamov S. S., Vasilyeva A. A. Use of electrokinetic phenomena in an optofluid cell with polymer substrates. In: *Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2022, no. 3, pp. 74-86.

DOI: 10.18384/2310-7251-2022-3-59-74-86