

УДК 535.361; 610.849.19; 618.723  
EDN: FGDWYB

PACS: 42.79.Kr



## Модуляция терагерцового излучения с помощью жидкокристаллических $\pi$ -ячеек

Г. В. Симоненко, А. Ф. А. Муламахавш

*Исследована новая конструкция жидкокристаллического модулятора для терагерцового диапазона. Предложенная конструкция состоит из набора тонких стандартных  $\pi$ -ячеек, каждая из которых имеет собственное электроуправление, а весь набор помещен между поляризатором и анализатором. Если исходное терагерцовое излучение поляризовано линейно, то входной поляризатор в устройстве отсутствует, что существенно повышает суммарный коэффициент пропускания модулятора. Число стандартных жидкокристаллических  $\pi$ -ячеек определяется толщиной одной такой ячейки и условием максимума коэффициента пропускания интерференции поляризованных волн. Полное время срабатывания такого модулятора определяется быстродействием одной стандартной  $\pi$ -ячейки составляет несколько миллисекунд. При этом коэффициент пропускания, для длины волны не превышающей 30 мкм, такого устройства может быть не менее 15 %. Увеличить суммарный коэффициент пропускания жидкокристаллического модулятора можно путем оптимизации оптических параметров стандартной жидкокристаллической ячейки, что позволит одновременно увеличить диапазон модуляции ТГц-излучения.*

*Ключевые слова:* жидкие кристаллы, модуляторы, терагерцовое излучение.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-3-13-19

### Введение

В последние годы терагерцовая (ТГц) технология привлекла значительное внимание из-за ее потенциального применения в вычислительных и коммуникационных системах следующего поколения [1], биологических и медицинских науках [2], тестировании без-

опасности пищевых продуктов [3], космических науках [4] и в системах визуализации [5, 6]. В свою очередь развитие устройств, основанных на ТГц-излучении, требует разработки оптических элементов, таких как частотные фильтры, аттенюаторы, поляризаторы [5, 7, 8] для передачи и модуляции ТГц-волн. В настоящее время существует большое число таких устройств: механически управляемых [9, 10], термически управляемых [11, 12], электрически управляемых [13, 14] и магнитно управляемых [15, 16]. Все эти устройства используют различные физические эффекты в различных средах и имеют свои достоинства и недостатки. К основным недостаткам вышесказанных методов можно отнести низкую глубину модуляции и модуляция излучения в узкой полосе пропускания. В этой связи особый интерес представляют модуляторы терагерцового излучения, основанные на электрооптических эффектах в жидких кристаллах

Симоненко Георгий Валентинович, профессор,  
д.ф.-м.н.

E-mail: simonenkogv@sgu.ru

Муламахавш Анфал Фадиль Ахмед, аспирант.

E-mail: anfal.fadhel@yahoo.com

Саратовский национальный исследовательский  
государственный университет им. Н. Г. Чернышевского.  
Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83.

Статья поступила в редакцию 7.03.2024

После доработки 1.04.2024

Принята к публикации 7.04.2024

Шифр научной специальности: 1.3.6, 2.2.6

© Симоненко Г. В., Муламахавш А. Ф. А., 2024

(ЖК) [17, 18, 19, 20]. К преимуществам ЖК-устройств по сравнению с перечисленными выше можно отнести малые рабочие напряжения, относительно малые времена электрооптического отклика и широкий диапазон рабочих температур. Конечно, у таких ЖК-модуляторов есть ряд недостатков, таких как необходимость использования толстых слоев ЖК ввиду большой длины волны в ТГц-режиме, что приводит к высоким рабочим напряжениям и большому времени отклика [19]. Однако эти недостатки не носят принципиального характера и могут иметь определенные пути их преодоления. Данная статья посвящена поиску путей решения подобных задач.

### Результаты и обсуждение

Как известно из общего курса оптики и радиофизики, терагерцовое излучение является разновидностью электромагнитной волны. Поэтому основные принципы модуляции световой волны с помощью ЖК-устройств можно перенести на терагерцовый диапазон. Одним из таких принципов является использование различных электрооптических эффектов в ЖК. Стоит отметить, что наиболее распространенным в ЖК-устройствах отображения и преобразования информации является эффект управляемого электрическим полем интерференции поляризованных волн [21]. Существует большое число конструкций подобных ЖК-устройств, однако, если речь вести об использовании «классических» ЖК-ячеек на основе нематиков, то наиболее оптимальным выбором будет конструкция модулятора на базе «классической»  $\pi$ -ячейки [22]. Такой выбор основан на двух преимуществах  $\pi$ -ячейки: полное время срабатывания подобного ЖК-устройства не превышает единиц миллисекунд; коэффициент пропускания  $T$  этого модулятора составляет не менее 35 % [23]. Простейшее устройство модулятора на основе  $\pi$ -ячейки представляет из себя слоистую планарную структуру, состоящую из следующих элементов: поляризатор; гомогенная ЖК-ячейка с антисимметричными граничными условиями с незакрученной структурой ЖК; анализатор. Известно, что в этом случае коэффициент пропускания можно оценить, ис-

пользуя простое выражение для интерференции поляризованных волн в виде [24]:

$$T = T_0 \times \sin^2 \Delta / 2, \quad (1)$$

$$\Delta = \phi_e - \phi_o = 2\pi \times (n_e - n_o) \times L / \lambda_0, \quad (2)$$

где  $T_0$  – суммарный коэффициент пропускания двух поляризаторов,  $\lambda_0$  – длина волны модулируемого излучения,  $n_e$ ,  $n_o$  – коэффициенты преломления ЖК для необыкновенной и обыкновенной волн соответственно,  $L$  – толщина слоя ЖК.

Очевидно, что при изменении значения показателя преломления ЖК необыкновенной волны, изменяется разность фаз интерферирующих волн, и, следовательно, меняется коэффициент пропускания модулятора. При этом показатель преломления ЖК для необыкновенной волны меняется при воздействии на ЖК электрического поля от своего максимального ( $n_e$ ) до минимального (равного  $n_o$ ) значения. Это позволяет осуществлять модуляцию излучения с большой глубиной.

Используя выражения (1) и (2) легко получить минимальную толщину слоя ЖК, для которой можно наблюдать эффект управляемым электрическим полем двойного лучепреломления (см. таблицу). При этом значения показателей преломления ЖК  $n_e$  и  $n_o$  в терагерцовом диапазоне были взяты из работ [19, 25, 26]. По данным работ [25, 26] некоторые ЖК-вещества имеют слабую дисперсионную зависимость анизотропии показателей преломления, что в первом приближении позволяет считать эту характеристику постоянной для терагерцового диапазона. Кроме этого следует заметить, что по данным работы [25] существуют ЖК-смеси, для которых коэффициент поглощения в ТГц-диапазоне не превышает  $10 \text{ см}^{-1}$ . Такое значение коэффициента поглощения при толщине слоя ЖК от 40 до 100 мкм приводит к изменению пропускания от 96 % до 90 %. Это позволяет для дальнейших исследований считать слой ЖК не поглощающим. Отметим, что с ростом длины волны модулируемого излучения растет и минимальная толщина ЖК-ячейки, естественно, приводит к резкому росту времени полного срабатывания ЖК-устройства (см. таблицу). Для расчета характеристик такого ЖК-моду-

лятора был использован модернизированный комплекс программ MOUSE-LCD [27], в котором оптический блок программ был расширен на ТГц-диапазон. При моделировании характеристик ЖК-модулятора в ТГц-режиме считалось, что анализатор и поляризатор являются идеальными, а оптические параметры проводящих и ориентирующих слоев ЖК-ячейки не

зависят от длины волны модулируемого излучения. Как видно из этой таблицы стандартная конструкция ЖК-модулятора на основе  $\pi$ -ячейки имеет один существенный недостаток – у нее слишком большие значения времени полного срабатывания. Поэтому рассмотрим более сложную конструкцию ЖК-модулятора на основе  $\pi$ -ячейки.

Таблица

Полное время срабатывания ЖК устройства в зависимости от длины волны модулируемого сигнала

Длина волны сигнала, мкм	0,5	10	20	40	80
Толщина слоя ЖК, мкм	1,25	17	33	67	133
Пропускание модулятора, %	37	37	37	37	37
Полное время срабатывания устройства, мсек	2,5	444	1778	7111	28444

Возьмем за основу одну «классическую»  $\pi$ -ячейку, толщина которой изменяется от 2 до 4 мкм. Это позволит получить малые времена полного срабатывания ЖК-устройства. Как показано выше, одна такая ячейка не пригодна для модуляции терагерцового излучения, поэтому для соответствующего получения максимума интерференции поляризованных волн используем набор, состоящий из  $N$  одинаковых элементарных  $\pi$ -ячеек. Каждая из таких элементарных ячеек имеет собственное электроуправление, а весь набор таких ячеек помещен между двумя поляризаторами. Минимальное число таких  $\pi$ -ячеек определяется условием максимума интерференции поляризованных волн:

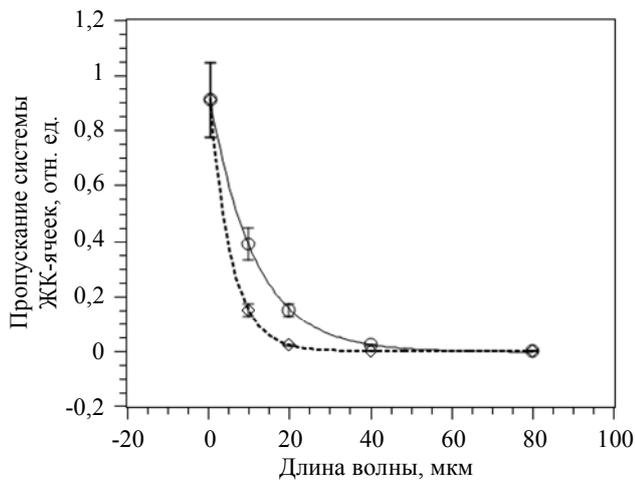
$$\lambda_0 = 2N(n_e - n_o) \times L_0, \quad (3)$$

где  $L_0$  – толщина одной элементарной  $\pi$ -ячейки.

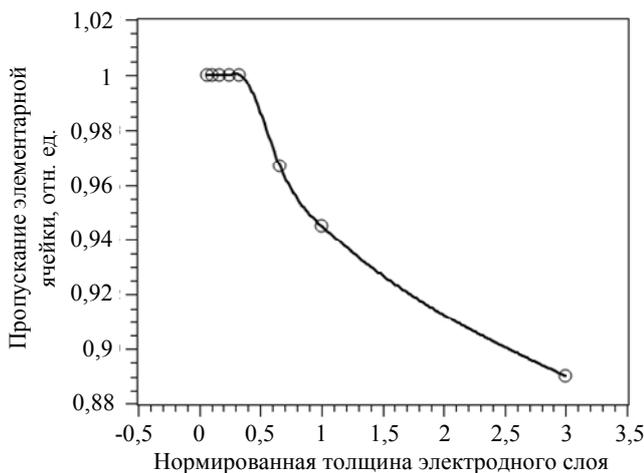
Очевидно, что с ростом длины волны излучения число таких ЖК-ячеек растет линейным образом и так как в этом случае существует множество границ раздела с различными показателями преломления, суммарный коэффициент пропускания такой системы может быть очень малым. На рисунке 1 представлены зависимости коэффициента пропускания модулятора от длины волны модулируемого излучения для конструкции на базе ЖК-ячейки толщиной 2 и 4 мкм. Отметим, что на этом рисунке представлены не спектр пропускания какого-то одного модулятора излучения с определенным числом эле-

ментарных ячеек, а коэффициенты пропускания различных модуляторов для определенных интервалов длин волн ТГц-излучения. То есть для излучения с длиной волны 20 мкм и 30 мкм модуляторы будут иметь различное число элементарных ячеек в соответствии с выражением (3). При этом конструкция модулятора на базе ячейки толщиной 4 мкм имеет для одной и той же длины волны модулируемого излучения в разы меньше элементарных ячеек, чем модулятор на базе ячейки толщиной 2 мкм. Из этого рисунка предлагаемая конструкция обладает приемлемыми значениями коэффициента пропускания ( $T \geq 10\%$ ) только для ТГц-диапазона с длиной волны до 30 мкм. Конструкция модулятора на базе ЖК-ячейки толщиной 2 мкм имеет времена полного срабатывания в 4 раза меньше, чем модулятор на основе ЖК-ячейки толщиной 4 мкм, но коэффициент пропускания для первой конструкции имеет приемлемое значение только для  $\lambda_0 \leq 15$  мкм. Падение пропускания модулятора на базе системы  $\pi$ -ячеек с ростом длины волны модулируемого излучения связано с увеличением френелевских потерь на отражение от границ раздела различными показателями преломления в устройстве. При этом максимальное влияние на пропускание оказывает толщина электродного слоя. На рисунке 3 представлена зависимость пропускания элементарной  $\pi$ -ячейки от толщины электродного слоя для длины волны 20 мкм. Как видно из этого рисунка коэффициент пропускания ячейки растет с уменьшением толщины элек-

тродного слоя, но начиная с определенного значения толщины ее дальнейшее уменьшение не приводит к увеличению пропускания.



**Рис. 1.** Зависимость коэффициента пропускания системы ЖК-ячеек от длины волны модулируемого сигнала на основе одной ячейки:  $\diamond$  – толщина ячейки 2 мкм;  $\circ$  – толщина ячейки 4 мкм

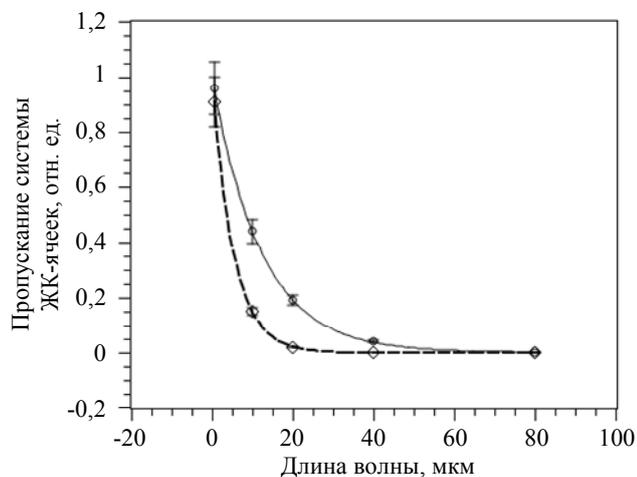


**Рис. 2.** Зависимость коэффициента пропускания элементарной  $\pi$ -ячейки от толщины электродного слоя. Нормировка толщины электродного слоя производилось на толщину слоя стандартной ЖК-ячейки [28]

Улучшить оптические характеристики такого модулятора можно, если найти оптимальные значения параметров элементов устройства. К этим параметрам относятся показатели преломления и толщины ориентирующих и проводящих слоев одной  $\pi$ -ячейки, толщины стеклянных подложек этой ячейки. Явление, с которым связано повышение коэффициента пропускания для многослойной структуры ЖК-модулятора – это явление мно-

голучевой интерференции волн ТГц-диапазона. Нами для расчета коэффициента пропускания многослойной системы с учетом явления многолучевой интерференции использовалась комбинация матриц методов Абеллеса и Джонса [29]. Как отмечалось выше, наибольшее влияние на величину коэффициента пропускания оказывают физические параметры электродного слоя (толщина слоя и его показатель преломления). Это объясняется тем, что различие в показателях преломления стеклянных подложек, ориентирующих слоев и среднего показателя преломления ЖК невелики. Например, показатель преломления обычного стекла равен 1,52, средний показатель преломления ЖК 1,6, а показатель преломления ориентирующих слоев 1,6. Такое соотношение между показателями преломления элементов ЖК-ячейки говорит о том, что основные потери на френелевское отражение будет приходиться на границы раздела стекло – электродный слой и электродный слой ориентант, так как комплексный показатель преломления электродного слоя равен  $(2 + i \times 0,08)$ . Данные по значениям толщин и показателей преломления стандартной ЖК-ячейки представлены в работе [28]. Поэтому основным конструктивным фактором, который определяет величину потерь в многослойном модуляторе ЖК ТГц-диапазона является толщина электродного слоя. На рисунке 3 представлена зависимость коэффициента пропускания многослойного модулятора на основе  $\pi$ -ячеек для конструкции со стандартными и оптимальными значениями толщин электродных слоев. Оптимальное значение толщины электродного слоя соответствует минимальным потерям в коэффициенте пропускания на френелевские отражения с учетом многолучевой интерференции в многослойной структуре модулятора. Сравнение этих зависимостей для двух вариантов показывает, что в этом случае данная конструкция модулятора может быть использована для длин волн вплоть до 40 мкм. В результате оптимизации параметров конструкции можно увеличить длину волны модуляции ТГц-излучения с 20 мкм до 30 мкм. Френелевские потери с учетом многолучевой интерференции в многослойной структуре модулятора на фоне основного эффекта управляемой электрическим полем интерференции поляри-

зованных волн в ЖК являются вторичным явлением, однако оно существенно ограничивает число элементарных  $\pi$ -ячеек, а следовательно и длину волны модулируемого ТГц-излучения.



**Рис. 3.** Зависимость коэффициента пропускания системы ЖК-ячеек от длины волны модулируемого сигнала на основе одной ячейки толщиной 2 мкм:  $\diamond$  – система со стандартными параметрами проводящих и ориентирующих слоев;  $\circ$  – система с оптимизированными параметрами проводящих и ориентирующих слоев

Таким образом, использование конструкции модулятора с большим числом тонких  $\pi$ -ячеек и оптимальными значениями оптических параметров слоистых структур, входящих в состав устройства позволяет говорить о том, что возможно создать ЖК-модулятор в области ТГц-диапазона (вплоть до 40 мкм), который будет иметь малые времена полного срабатывания и приемлемые оптические характеристики.

### Заключение

Исследована новая конструкция ЖК-модулятора для терагерцового диапазона. Предложенная конструкция состоит из набора тонких стандартных  $\pi$ -ячеек, каждая из которых имеет собственное электроуправление, а весь набор помещен между поляризатором и анализатором. Если исходное терагерцовое излучение поляризовано линейно, то входной поляризатор в устройстве отсутствует, что существенно повышает суммарный коэффициент пропускания модулятора. Число стан-

дартных ЖК  $\pi$ -ячеек определяется толщиной одной такой ячейки и условием максимума коэффициента пропускания интерференции поляризованных волн. Полное время срабатывания такого модулятора определяется быстродействием одной стандартной  $\pi$ -ячейки составляет несколько миллисекунд. При этом коэффициент пропускания, для длины волны не превышающей 30 мкм, такого устройства может быть не менее 15 %. Увеличить суммарный коэффициент пропускания ЖК-модулятора можно путем оптимизации оптических параметров стандартной ЖК-ячейки (показатели преломления и толщины проводящих и ориентирующих слоев), это позволит одновременно увеличить диапазон модуляции ТГц-излучения.

### ЛИТЕРАТУРА

- Chanana A., Zhai Y., Baniya S., Zhang C., Vardany Z. V., Nahata A. / Nat. Commun. 2017. Vol. 8. № 1. P. 1328.
- Tonouchi M. / Nat. Photonics. 2007. Vol. 1. № 2. P. 97–105.
- Wang C., Qin J. Y., Xu W. D., Chen M., Xie L. J., Ying Y. B. / Trans. ASABE. 2018. Vol. 61. № 2. P. 411–424.
- Hangyo M. / Jpn. J. Appl. Phys. 2015. Vol. 54. № 12. P. 120101.
- Chen H. M., Su J., Wang J. L., Zhao X. Y. / Opt. Express. 2011. Vol. 19. P. 3559–3603.
- Louise H., Michael P., Philip T. / Nat. Photon. 2008. Vol. 2. P. 541–544.
- Li J. S. / Opt. Commun. 2007. Vol. 269. P. 98–101.
- Li J. S. / Optik. 2014. Vol. 125. P. 4543–4549.
- Gavdush A. A., Chernomyrdin N. V., Lavrukhin D. V., Cao Yang, Komandin G. A., Spektor I. E., Perov A. N., Dolganova I. N., Katyba G. M., Kurlov V. N., Ponomarev D. S., Skorobogatiy M., Reshetov I. V., Zaytsev K. I. / Optics Express. 2020. Vol. 28. № 18. P. 26228–26238.
- Ruan J.-F., Lan F., Tao Z., Meng Z.-F., Ji S.-W. / Physics letters A. 2022. Vol. 421. P. 127705.
- Ling F., Huang R., Meng Q., Li W., Zhang B. / Proceeding of SPIE. 2017. Vol. 10250. P. 102500X\_1–102500X\_5.
- Huang Y., He Q., Zhang D., Kanamori Y. / Optical review. 2021. Vol. 28. P. 92–98.
- Odum M. A. Управляемый фильтр ТГц-диапазона: сборник трудов Всероссийской конференции «Микроэлектроника СВЧ», 2012. С. 335–339.
- Jiang M., Hu F., Qiu Y., Zhang L. / Journal of Physics D: Applied Physics. 2019. Vol. 53. № 6. P. 1–8.
- Li S., Liu H., Sun Q., Huang N. / IEEE Photonics Technology Letters. 2015. Vol. 27. № 7. P. 752–754.

16. Chen S., Fan F., Chang S., Miao Y. / Optics Express. 2014. Vol. 22. № 6. P. 6313–6321.
17. Wu H. Y., Hsieh C. F., Tang T. T., Pan R. P., Pan C. L. / IEEE Photonics Technol. Lett. 2006. Vol. 18. № 6. P. 1488–1490.
18. Pan C. L., Hsieh C. F., Pan R. P., Tanaka M., Miyamaru F., Tani M., Hangyo M. / Opt. Express. 2005. Vol. 13. P. 3921–3930.
19. Беляев В. / СВЧ-электроника. 2020. № 5. С. 96–98.
20. Wilk R., Vieweg N., Kopschinski O., Koch M. / Opt. Express. 2009. Vol. 17. № 9. P. 7377–7382.
21. Chigrinov V. G. Liquid crystal devices: Physics and applications. – Boston-London: Artech House, 1999.
22. Bos P. J., Beran K. R. / Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1984. Vol. 113. P. 329–339.
23. Симоненко Г. В. Компьютерное моделирование характеристик быстродействующих классических модуляторов на основе жидких кристаллов. – Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 2018.
24. Сухариев А. С. Жидкокристаллические индикаторы. – М.: Радио и связь, 1991.
25. Hongkyu P., Fan F., Parront E. P. J., Han H. / Opt. Express. 2012. Vol. 20. № 11. P. 11899.
26. Li X., Tan N., Pivnenko M., Sibik J., Zeitler J. A., Chtn D. / Liquid crystal. 2016. Vol. 43. № 7. P. 955–962.
27. Chigrinov V. G., Simonenko G. V., Yakovlev D. A., Podjachev Yu. B. / Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2000. Vol. 351. P. 17–25.
28. Курчаткин С. П. Поверхностные явления и структура термотропных жидких кристаллов в капиллярных объемах: дисс. ... д-ра хим. наук. – Саратов: гос. ун-т, 2001.
29. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. – М.: Мир, 1981.

PACS: 42.79.Kr

## Modulation of terahertz radiation using liquid crystal $\pi$ -cells

G. V. Simonenko and A. F. A. Mulamakhavsh

Saratov National Research State University named after N. G. Chernyshevsky  
83 Astakhanskaya st., Saratov, 410012, Russia  
E-mail: simonenkogv@sgu.ru

Received 7.03.2024; revised 1.04.2024; accepted 7.04.2024

***In this work, a new design of a liquid crystal modulator for the terahertz range was studied using a computer method. The proposed design consists of a set of thin standard  $\pi$ -cells, each of which has its own electrical control, and the entire set is placed between the polarizer and the analyzer. If the initial terahertz radiation is linearly polarized, then there is no input polarizer in the device, which significantly increases the total transmittance of the modulator. The number of standard liquid crystal  $\pi$ -cells is determined by the thickness of one such cell and the condition for the maximum transmittance of the interference of polarized waves. The total response time of such a modulator is determined by the speed of one standard  $\pi$ -cell and is several milliseconds. In this case, the transmittance coefficient for a wavelength not exceeding 30 microns of such a device can be at least 15 %. It is possible to increase the total transmittance of a liquid crystal modulator by optimizing the optical parameters of a standard liquid crystal cell, which will simultaneously increase the modulation range of THz radiation.***

**Keywords:** liquid crystals, modulators, terahertz radiation.

### REFERENCES

1. Chanana A., Zhai Y., Baniya S., Zhang C., Vardeny Z. V. and Nahata A., Nat. Commun. **8** (1), 1328 (2017).
2. Tonouchi M., Nat. Photonics **1** (2), 97–105 (2007).
3. Wang C., Qin J. Y., Xu W. D., Chen M., Xie L. J. and Ying Y. B., Trans. ASABE **61** (2), 411–424 (2018).

4. Hangyo M., *Jpn. J. Appl. Phys.* **54** (12), 120101 (2015).
5. Chen H. M., Su J., Wang J. L. and Zhao X. Y., *Opt. Express* **19**, 3559–3603 (2011).
6. Louise H., Michael P., Philip T., *Nat. Photon.* **2**, 541–544 (2008).
7. Li J. S., *Opt. Commun.* **269**, 98–101 (2007).
8. Li J. S., *Optik* **125**, 4543–4549 (2014).
9. Gavdush A. A., Chernomyrdin N. V., Lavrukhin D. V., Cao Yang, Komandin G. A., Spektor I. E., Perov A. N., Dolganova I. N., Katyba G. M., Kurlov V. N., Ponomarev D. S., Skorobogatiy M., Reshetov I. V. and Zaytsev K. I., *Optics Express*. **28** (18), 26228–26238 (2020).
10. Ruan J.-F., Lan F., Tao Z., Meng Z.-F. and Ji S.-W., *Physics letters A* **421**, 127705 (2022).
11. Ling F., Huang R., Meng Q., Li W. and Zhang B., *Proceeding of SPIE* **10250**, 102500X\_1–102500X\_5 (2017).
12. Huang Y., He Q., Zhang D. and Kanamori Y., *Optical review* **28**, 92–98 (2021).
13. Odit M. A., Controlled THz-band filter. *Proceedings of the All-Russian conference "Microwave microelectronics"*, 2012, pp. 335–339.
14. Jiang M., Hu F., Qian Y. and Zhang L., *Journal of Physics D: Applied Physics* **53** (6), 1–8 (2019).
15. Li S., Liu H., Sun Q. and Huang N., *IEEE Photonics Technology Letters* **27** (7), 752–754 (2015).
16. Chen S., Fan F., Chang S. and Miao Y., *Optics Express* **22** (6), 6313–6321 (2014).
17. Wu H. Y., Hsieh C. F., Tang T. T., Pan R. P. and Pan C. L., *IEEE Photonics Technol. Lett.* **18** (6), 1488–1490 (2006).
18. Pan C. L., Hsieh C. F., Pan R. P., Tanaka M., Miyamaru F., Tani M. and Hangyo M., *Opt. Express* **13**, 3921–3930 (2005).
19. Belyaev V., *Microwave electronics*, № 5, 96–98 (2020).
20. Wilk R., Vieweg N., Kopschinski O. and Koch M., *Opt. Express* **17** (9), 7377–7382 (2009).
21. Chigrinov V. G. *Liquid crystal devices: Physics and applications*. Boston-London, Artech House, 1999.
22. Bos P. J. and Beran K. R., *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **113**, 329–339 (1984).
23. Simonenko G. V., *Computer simulation of characteristics of high-speed classical modulators based on liquid crystals*, Saratov, Saratov University, 2018 [in Russian].
24. Sukharier A. S., *Liquid crystal indicators*, Moscow, Radio i svyaz, 1991 [in Russian].
25. Hongkyu P., Fan F., Parront E. P. J. and Han H., *Opt. Express* **20** (11), 11899 (2012).
26. Li X., Tan N., Pivnenko M., Sibik J., Zeitlet J. A. and Chtn D., *Liquid crystal* **43** (7), 955–962 (2016).
27. Chigrinov V. G., Simonenko G. V., Yakovlev D. A. and Podjachev Yu. B., *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **351**, 17–25 (2000).
28. Kurchatkin S. P., *Surface phenomena and structure of thermotropic liquid crystals in capillary volumes*. PhD thesis (Chem.). Saratov, 2001 [in Russian].
29. Azzam R. M. A. and Bashara N. M., *Ellipsometry and Polarized Light*, North-Holland, Amsterdam, 1977.