

НАУЧНЫЙ ОТДЕЛ

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ. ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 3. С. 286–294
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2026, vol. 26, iss. 3. P. 286–294
https://fizika.sgu.ru https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-3-286-294, EDN: MTRTNY

Научная статья
УДК 535.361:610.849.19:618.723

Пропускание модулятора терагерцового излучения в зависимости от параметров многослойной периодической жидкокристаллической структуры

Анфал Фадиль Ахмед Муламахавш, Г. В. Симоненко✉

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

Анфал Фадиль Ахмед Муламахавш, аспирант кафедры оптики и биофотоники Института физики, anfal.fadhel@yahoo.com, https://orcid.org/0009-0007-7803-3565
Симоненко Георгий Валентинович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры оптики и биофотоники Института физики, simonenkogv@sgu.ru, https://orcid.org/0000-0002-6283-6335, AuthorID: 28982

Аннотация. На основе матричного метода Абелеса в рамках компьютерного моделирования выполнено исследование оптических характеристик жидкокристаллического модулятора терагерцового излучения оригинальной конструкции на основе периодической структуры с определенным числом элементарных π-ячеек. Для модуляции излучения используется явление многоволновой интерференции в периодической жидкокристаллической структуре. Обнаружено различие в функциональных зависимостях оптической плотности устройства от конструктивных параметров жидкокристаллической ячейки в оптическом и терагерцовом диапазонах. Установлено, что оптические характеристики модулятора в терагерцовом диапазоне существенным образом зависят от величин толщин стеклянных подложек и электродных слоев элементарных жидкокристаллических ячеек. Отмечено, что число элементарных π-ячеек, входящих в конструкцию модулятора, максимально влияют на его оптические характеристики. Результаты, изложенные в статье, представляют интерес для разработчиков модуляторов терагерцового излучения.

Ключевые слова: модулятор, жидкий кристалл, компьютерное моделирование

Для цитирования: *Анфал Фадиль Ахмед Муламахавш, Симоненко Г. В.* Пропускание модулятора терагерцового излучения в зависимости от параметров многослойной периодической жидкокристаллической структуры // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 3. С. 286–294. https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-3-286-294, EDN: MTRTNY

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Transmission of a terahertz radiation modulator depending on parameters of a multilayer periodic liquid crystal structure

Anfal Fadhil Ahmed Mulamahawsh, G. V. Simonenko✉

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Anfal Fadhil Ahmed Mulamahawsh, anfal.fadhel@yahoo.com, https://orcid.org/0009-0007-7803-3565
Georgy V. Simonenko, simonenkogv@sgu.ru, https://orcid.org/0000-0002-6283-6335, AuthorID: 28982

© *Анфал Фадиль Ахмед Муламахавш, Симоненко Г. В., 2026*

Abstract. ***Background and Objectives*****:** The aim of the research is an original design of a liquid crystal modulator of terahertz radiation using the phenomenon of multi-wave interference. ***Materials and Methods*****:** To study the optical characteristics of a liquid crystal terahertz radiation modulator based on a periodic structure with a certain number of elementary π-cells, a computer simulation method based on the Abeles matrix method was used. ***Results*****:** Differences in the functional dependences of the device's optical density on the design parameters of the liquid crystal cell in the optical and terahertz ranges have been discovered. It has been established that the modulator's optical characteristics in the terahertz range depend significantly on the thicknesses of the glass substrates and electrode layers of the unit liquid crystal cells. It has been noted that the number of unit π-cells included in the modulator's design has the greatest impact on its optical characteristics. The results presented in the article are of interest to developers of terahertz radiation modulators.

Keywords: modulator, liquid crystal, computer simulation

For citation: Anfal Fadhil Ahmed Mulamahawsh, Simonenko G. V. Transmission of a terahertz radiation modulator depending on parameters of a multilayer periodic liquid crystal structure. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2026, vol. 26, iss. 3, pp. 286–294 (in Russian). https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-3-286-294, EDN: MTRTNY

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

В настоящее время сложные многослойные системы с периодическим изменением показателя преломления широко применяются в микро- и наноэлектронике, оптике, магнитных устройствах, сенсорах и фотонных кристаллах [1]. При этом одним из условий использования таких периодических структур является сопоставимость периода изменения показателя преломления в системе с длинной волны электромагнитного излучения [2]. Это условие легко выполняется в оптическом диапазоне электромагнитного излучения, в то время как для терагерцового (ТГц) диапазона, перспективного с практической точки зрения, это не так просто при сохранении габаритов устройства. Недавние исследования [3] показали, что периодическая многослойная структура на основе стандартных жидкокристаллических (ЖК) ячеек может быть использована для модуляции ТГц излучения. ТГц излучение имеет большие перспективы применения в диагностике биологических сред, в обнаружении вредных примесей в атмосфере и в беспроводной высокоскоростной связи хорошего качества [4–7].

В связи с развитием средств генерации и регистрации ТГц излучения к нему стали относить волны с длиной волны от 3 мм до 10 мкм [8, 9]. В тоже время для модуляции излучения этого диапазона все чаще стали использовать различные устройства на основе ЖК, так как ЖК легко интегрировать с метаповерхностями для создания различных динамических ТГц устройств [10–13]. Ранее было показано, что ЖК могут формировать ТГц излучение с малым временем отклика [12], что позволяет избавиться от основного недостатка ЖК устройств – большого времени реакции. При этом основное направление в области ЖК устройств обработки информации сосредоточены на уменьшении их времени реакции при обработке сигнала, основанного на модуляции его амплитуды, фазы или типа поляризации [13]. Для регистрации ТГц излучения используются фотонные или тепловые приемники [7]. При этом первые имеют сравнительно большое время срабатывания (не менее десятков миллисекунд), а вторые ограничены диапазоном длин волн до 20 мкм [7]. Учитывая перечисленные выше причины, авторы предлагают ограничиться исследованием оптических характеристик оригинальной конструкции ЖК модулятора ТГц диапазона электромагнитных волн [3] в зависимости от его конструктивных параметров только в узком интервале длин волн от 16 до 20 мкм.

Компьютерное моделирование характеристик ЖК модулятора

В отличие от обычной конструкции ЖК устройств обработки информации, где используется эффект интерференции поляризованных волн, в исследуемом модуляторе применяется эффект многоволновой интерференции в периодической слоистой структуре, содержащей ЖК [3]. При этом минимальная толщина ЖК слоя $L_{\min}$ должна следующему удовлетворять требованию:

$$L_{\min} \geqslant \frac{\lambda_0}{2(n_e - n_o)}, \qquad (*)$$

где λ_0 – длина волны модулируемого излучения; n_e и n_o – коэффициенты преломления ЖК для необыкновенной и обыкновенной волн соответственно.

При модуляции ТГц излучения с помощью одной ЖК ячейки условие (*) выполняется только для очень больших значений $L_{\min}$. Однако время реакции τ_{reac} такого устройства на управляющее напряжение будет очень большим, так как $\tau_{reac} \sim L_{\min}^2$ [14]. С помощью компьютерного

моделирования в работе [3] было показано, что для выполнения условия (*) и одновременного обеспечения малого времени реакции ЖК модулятора ТГц излучения можно использовать конструкцию устройства, которая состоит из N одинаковых ЖК ячеек малой толщины с одинаковым направлением ориентации молекул на всех ориентирующих подложках. При этом для получения малых времен реакции ЖК модулятора предложено использовать «классическую» π-ячейку, а управляющее напряжение подается одно и то же отдельно на каждую элементарную ЖК ячейку. Число таких элементарных π-ячеек $N_{\min}$ определяется условием (*) следующим образом:

$$N_{\min} = \frac{L_{\min}}{L_0},$$

где L_0 – толщина элементарной ЖК ячейки.

В предложенной конструкции модулятора выполняются два условия:

1) линейно поляризованное излучение распространяется по нормали к поверхности устройства;
2) вектор поляризации падающей электромагнитной волны совпадает с направлением поляризации необыкновенной волны (*e*-волна, *e*-тип), возникающей в ЖК.

В этом случае в такой многослойной структуре в прямом направлении распространяется только одна электромагнитная волна с *e*-типом поляризации. В обратном направлении так же будет распространяться электромагнитная *e*-волна, и суммарная интерференционная картина будет определяться взаимодействием прямой и обратной волн. Тогда для определения оптической плотности ЖК устройства D можно использовать матричный формализм Абелеса [15]. Подробности методики вычисления оптической плотности периодической слоистой ЖК структуры и программные средства для этой цели изложены в работе [3]. Точность компьютерного моделирования характеристик предложенного модулятора подтверждена сравнением с данными, полученными с помощью известного пакета программ MOUSE-LCD [16, 17]. В качестве выходной характеристики ЖК модулятора на основе многоволновой интерференции использовалась величина оптической плотности устройства D на определенной длине волны λ.

Результаты и их обсуждение

Величины входных параметров (коэффициентов упругости, показателей преломления, технологических параметров ячеек) для моделирования характеристик ЖК модулятора были взяты из работы [3]. Дисперсия показателей преломления ЖК считалась одинаковой для видимого и ТГц диапазонов. Во всех расчетах эти физические параметры ЖК оставались постоянными. Все исследования проводились для ЖК ячеек с антисимметричными граничными условиями.

В качестве основной оптической характеристики ЖК модулятора было выбрано значение оптической плотности D, вычисленное для определенной длины волны ТГц диапазона. Известно [14, 17], что на величину D существенное влияние оказывают физические постоянные ЖК и технологические параметры ЖК ячейки. Так как мы рассматриваем явление многоволновой интерференции в периодической слоистой системе, то в первую очередь на величину ее оптической плотности будут оказывать толщины различных слоев и их показатели преломления. В первую очередь следует рассмотреть зависимость оптической плотности модулятора от толщины π-ячейки (d_{lc}). При этом изменения рабочего зазора ЖК ячейки могут варьироваться только в узких интервалах относительно оптимального значения, так как существенное увеличение этого параметра приводит к значительному росту времени реакции устройства, а его сильное уменьшение влечет за собой исчезновение самого эффекта или значительное увеличение количества элементарных ячеек в модуляторе. Поэтому изменение этого параметра на оптическую плотность производилось в интервале $d_{\mathrm{lc}} = (2.5 \pm 0.5)$ мкм. Учитывая, что при производстве π-ячеек используются ЖК материалы с малым значением анизотропии показателей преломления, то влияние показателей преломления ЖК на величину D модулятора мы не рассматривали. Одновременно с этим при стандартном изготовлении ЖК устройства используется ограниченное число материалов для электродного и ориентирующего слоев, что позволяет исключить влияние на оптическую плотность модулятора значений их показателей преломления. Однако влияние толщин ориентирующего (d_{or}) и электродного (d_{el}) слоя должно существенным образом сказываться на величине оптической плотности модулятора. Кроме этого, в отличие от модулятора оптического диапазона, состоящего из одной классической π-ячейки, в данном устройстве следует учитывать толщины стеклянных подложек (d_{glas}), так как они входят в состав

периодической слоистой структуры устройства и могут определять в целом интерференционную картину. Ниже излагаются результаты компьютерного моделирования.

На рис. 1 представлен спектр поглощения ЖК модулятора на основе 30 стандартных π-ячеек в интервале от 16 до 20 мкм. Из этого рисунка видно, что с ростом длины волны величина оптической плотности, соответствующая минимуму пропускания модулятора, также увеличивается. При этом все перечисленные выше технологические параметры d_{lc}, d_{el}, d_{or} и d_{glas} существенным образом влияют только на абсолютные значения оптической плотности устройства; количество и положение максимумов остаются неизменными. При этом в интервале длин волн от 16 до 20 мкм глобальный минимум пропускания модулятора на основе стопки стандартных π-ячеек соответствует ТГц излучению с $\lambda = 19.4$ мкм. В этой связи все дальнейшие исследования проводились для данной длины волны.

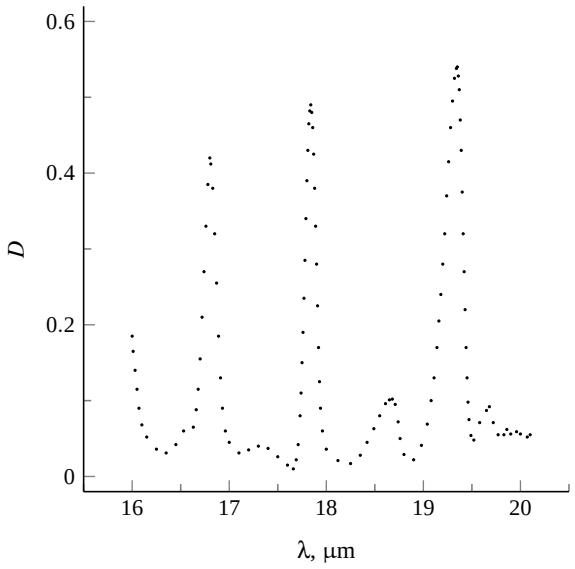


Рис. 1. Спектр поглощения модулятора на основе 30 стандартных π-ячеек

Fig. 1. Absorption spectrum of the modulator based on 30 standard π-cells

На рис. 2 показана зависимость оптической плотности D модулятора от числа элементарных π-ячеек N. Функция $D = D(N)$ монотонно возрастает, что объясняется ростом числа границ раздела в многослойной периодической структуре модулятора, и, следовательно, увеличением суммарного коэффициента отражения структуры. Рост коэффициента отражения модулятора при многоволновой интерференции слоистой структуре, в соответствии с формулой Эйри [18], приводит к уменьшению суммарного коэффициента пропускания модулятора на этой длине волны.

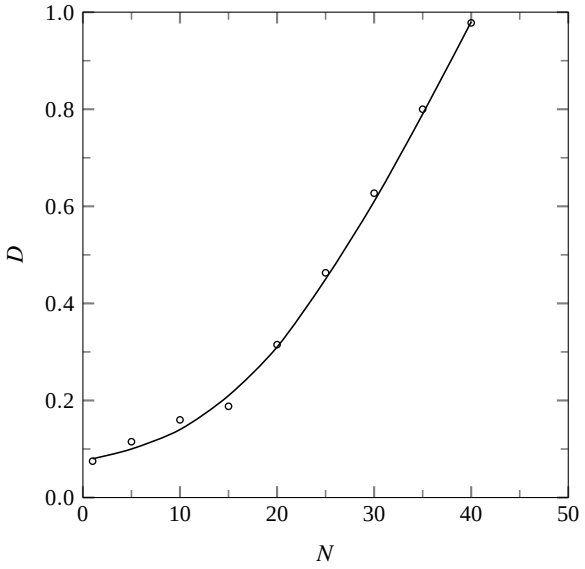


Рис. 2. Зависимость оптической плотности модулятора от числа элементарных π-ячеек на длине волны минимума пропускания $\lambda = 9.4$ мкм

Fig. 2. Dependence of the optical density of the modulator on the number of elementary π-cells at the minimum transmission wavelength $\lambda = 9.4$ μm

Представленная на рис. 3 зависимость $D = D(d_{\text{glas}})$ имеет тенденцию к осциллирующему характеру в качественном соответствии с формулой Эйри. Однако в полной мере эти осцилляции не проявляются. При этом рост числа ЖК ячеек в модуляторе N делает зависимости и $D = D(d_{\text{glas}})$ более выраженными, что показывает их сравнение для $N = 10$ и $N = 30$. Это объясняется увеличением суммарного коэффициента отражения многослойной структуры в силу роста числа границ раздела сред с различными показателями преломления. Для «классических» модуляторов оптического излучения влияние параметров стеклянных подложек выражалось только в учете френелевских отражений от внешних границ раздела, и влияние многоволновой интерференции учитывалось только в ориентирующих и электродных слоях. Это следует из того, что для оптического диапазона длина волны значительно превышает толщину электродного и ориентирующего слоев: $\lambda \gg d_{\text{el}}$ и $\lambda \gg d_{\text{or}}$, но одновременно $\lambda \ll d_{\text{glas}}$. В случае модулятора ТГц диапазона из-за большого числа элементарных ЖК ячеек и того

факта, что $\lambda \sim d_{\text{glas}}/10$ многоволновую интерференцию необходимо учитывать и в стеклянных подложках π-ячеек.

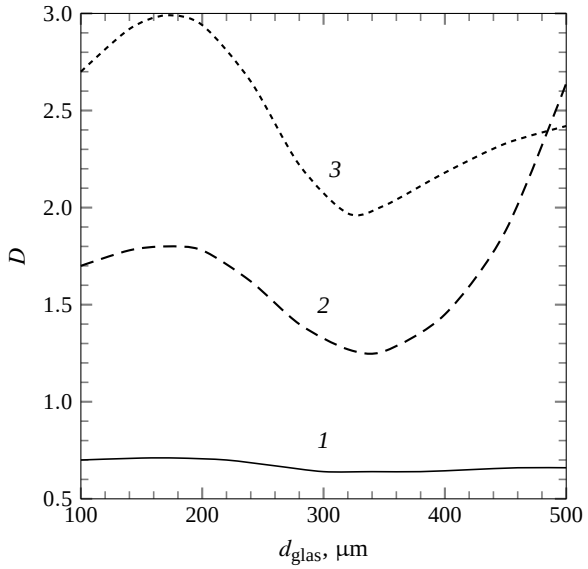


Рис. 3. Зависимость оптической плотности ЖК модулятора от толщины стеклянной подложки элементарной ЖК ячейки для различного числа π- ячеек:
1 – $N = 10$, *2* – $N = 20$, 3 – $N = 30$

Fig. 3. Dependence of the optical density of the LCD modulator on the thickness of the glass substrate of the elementary LCD cell for different numbers of π-cells:
1 – $N = 10$, *2* – $N = 20$, 3 – $N = 30$

Изменение толщины слоя ЖК в π-ячейке также влияет на величину пропускания на данной длине волны (рис. 4). При этом рост числа ЖК ячеек в модуляторе N делает и зависимости $D = D(d_{\text{lc}})$ более выраженными, что видно из сравнения графиков для $N = 10$ и $N = 30$. Это объясняется увеличением суммарного коэффициента отражения многослойной структуры из-за роста числа границ раздела сред с различными показателями преломления. В то же время зависимость $D = D(d_{\text{lc}})$, по сравнению с зависимостью $D = D(d_{\text{glas}})$, более слабая. Это объясняется тем, что вариация d_{lc} происходила в только узком интервале величин, а изменение толщины слоя ЖК одной ячейки в узком диапазоне мало влияет на пропускание всего модулятора, так как такие изменения не приводят к существенному изменению длины оптического пути интерферирующих волн.

Для ЖК модуляторов видимого излучения, которые функционируют на основе только одной рабочей ячейки, важным обстоятельством было согласование показателей преломления электродного слоя, ориентирующего слоя, стеклянной подложки и ЖК [19]. При этом считалось, что значения толщин слоев электродного d_{el} и ориентирующего d_{or} слоев следовало выбирать по возможности минимальными, а толщина слоя ЖК d_{lc} должна соответствовать оптимальному значению величины зазора электрооптического эффекта.

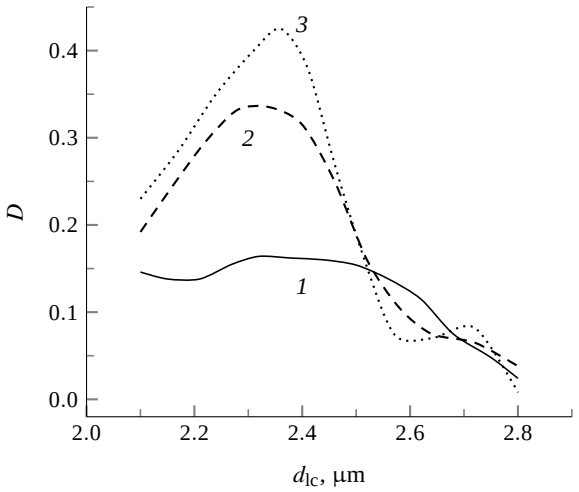


Рис. 4. Зависимость оптической плотности ЖК модулятора от толщины одной элементарной ЖК ячейки для различного числа π-ячеек: *1* – $N = 10$, *2* – $N = 20$, 3 – $N = 30$

Fig. 4. Dependence of the optical density of the LC modulator on the thickness of one unit LC cell for different numbers of π-cells: *1* – $N = 10$, *2* – $N = 20$, 3 – $N = 30$

Как показывают наши исследования, в ТГц диапазоне, кроме условия согласования показателей преломления многослойной структуры, важным условием достижения оптимальных значений оптических характеристик устройства является выбор соответствующей величины электродного слоя d_{el} (рис. 5). При этом толщина ориентирующего слоя d_{or} определяющей роли не играет (рис. 6). Отметим, что увеличение числа N элементарных ЖК ячеек в модуляторе существенным образом оказывают влияние на зависимость оптической плотности устройства от величин d_{el} и d_{or}. Зависимость $D = D(d_{\text{el}})$ носит осциллирующий характер с хорошо выраженными максимумами и минимумами, что объясняется гармонической зависимостью пропускания многослойной структуры от толщин ее составных элементов в качественном соответствии с формулой Эйри для многоволновой интерференции. В то же время Зависимость же $D = D(d_{\text{or}})$ выражена слабо. Различие в поведении функций $D = D(d_{\text{el}})$ и $D = D(d_{\text{or}})$ объясняется существенным различием в показателях преломления у электрода и ориентирующего слоя. Если показатель преломления ориентирующего слоя не сильно

отличается от показателей преломления стеклянных подложек и ЖК, то у электрода, наоборот, показатель преломления существенно больше.

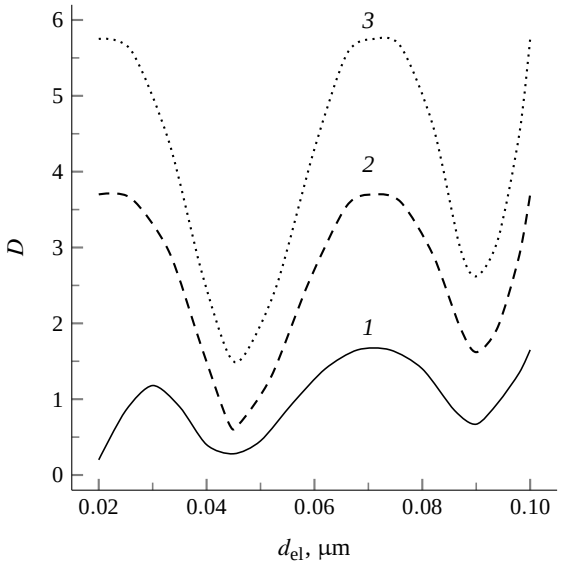


Рис. 5. Зависимость оптической плотности ЖК модулятора от толщины электродного слоя элементарной ЖК ячейки для различного числа π-ячеек:
1 – $N = 10$, *2* – $N = 0$, *3* – $N = 30$

Fig. 5. Dependence of the optical density of the LC modulator on the thickness of the electrode layer of the elementary LC cell for different numbers of π-cells:
1 – $N = 10$, *2* – $N = 0$, *3* – $N = 30$

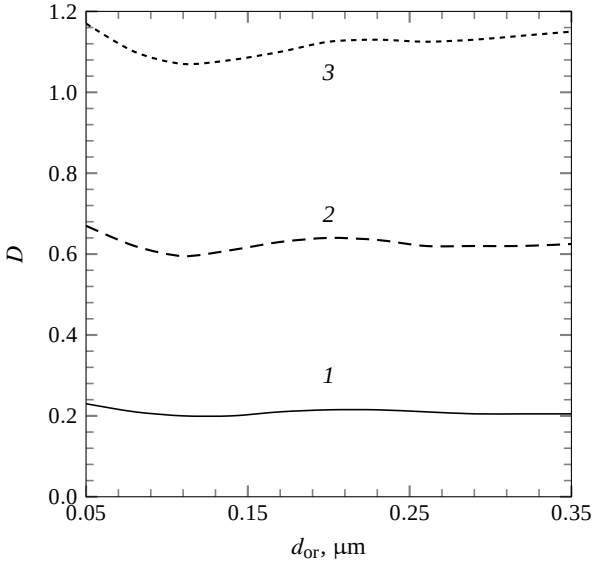


Рис. 6. Зависимость оптической плотности ЖК модулятора от толщины ориентирующего слоя элементарной ЖК ячейки для различного числа π-ячеек:
1 – $N = 10$, *2* – $N = 0$, *3* – $N = 30$

Fig. 6. Dependence of the optical density of the LC modulator on the thickness of the orienting layer of the elementary LC cell for different numbers of π-cells:
1 – $N = 10$, *2* – $N = 0$, *3* – $N = 30$

Количество максимумов и их положение в основном определяется величиной d_{lc}, в то время как число входящих в модулятор ЖК ячеек влияет только на величину оптической плотности, увеличивая ее значение с ростом N.

Подводя итоги, отметим, что для регистрации ТГц излучения существует только два типа приемников: тепловые и фотонные [7]. Первые имеют большое время срабатывания (в лучшем случае десятки миллисекунд), а у вторых верхняя граница рабочих длин волн ограничена 20 мкм [7]. В силу этого исследования выполнены только для неширокого спектрального диапазона в пределах от 15 до 20 мкм. Отдельно стоит объяснить использование термина «терагерцовое излучение» применительно к данным приведенным в статье. Известно, что традиционно к терагерцовому излучению относят электромагнитные волны с частотой в диапазоне от 0.1 до 3 ТГц (см., например, [20]), однако, существуют и другие публикации, в которых верхняя граница этого диапазона равна 100 ТГц (см., например, [21]). При этом в последнее время мощное развитие получили технические средства для генерации терагерцового излучения, в связи с чем многие исследователи сдвинули верхнюю границу ТГц диапазона от 3 к 30 ТГц [8, 9, 22]. Опираясь на это, диапазон длин волн от 15 до 20 мкм, для которого выполнены исследования, мы можем называть терагерцовым.

Заключение

В статье представлены результаты компьютерного моделирования оптических характеристик ЖК модулятора ТГц излучения, использующего эффект многоволновой интерференции в периодической структуре из N элементарных π-ячеек.

Показано, что в отличие от ЖК модулятора оптического диапазона длин волн, для ЖК модулятора ТГц диапазона его оптические характеристики существенным образом зависят еще и от толщины стеклянных подложек элементарной ЖК ячейки. Установлено, что наибольшим влиянием на оптические характеристики многослойного ЖК модулятора обладает число элементарных ячеек, входящих в конструкцию устройства. Так, увеличение количества элементарных π-ячеек в 4 раза приводит к увеличению оптической плотности модулятора в 6 раз. Вместе с этим изменение значения толщины электродного слоя в пределах от 0.01 до 0.1 мкм влечет за собой увеличение значения D до 5 раз,

в то время как изменение толщины стеклянных подложек с 100 до 500 мкм соответствует интервалу значений D от 2 до 3.

Отдельно стоит обсудить влияние толщины слоя ЖК элементарной π-ячейки. Для видимого диапазона рассматриваемый интервал вариации толщины ЖК слоя существенным образом влияет на оптические характеристики модулятора, так как эти изменения сравнимы с длиной волны модулируемого излучения. Для ТГц диапазона при таком интервале изменения толщины слоя ЖК одной ячейки величина d_{lc} слабо влияет на пропускание всего модулятора из-за малости изменений оптической длины путей интерферирующих волн по сравнению с модулируемой длиной волны. Поэтому зависимость $D = D(d_{\text{lc}})$ имеет слабовыраженный характер.

В отличие от ЖК модуляторов видимого диапазона, в котором набор оптимальных технологических параметров устройства одинаков для всего спектра модулируемого излучения, для ТГц диапазона ЖК модулятор будет иметь оптимальный набор технологических параметров только для узкого спектра ТГц излучения. Это различие обусловлено тем, что в видимом диапазоне для модуляции излучения используются электрооптические эффекты, которые не так сильно зависят от длины волны излучения (например, твист-эффект), а конструкция модулятора на основе многослойной структуры с определенным числом π-ячеек для преобразования ТГц излучения использует явление многоволновой интерференции. В этом случае модулятор с определенным набором технологических параметров пригоден только для очень узкого спектра излучения, так как условия минимума и максимума многоволновой интерференции критически зависят от длины волны излучения.

Практический интерес представляет сравнение основных характеристик исследуемого устройства с характеристиками других конструкций модуляторов ТГц излучения: ячейки Голея [7], на базе нанотрубок [23], на базе графена и других 2D метаструктур [24, 25]. Если основная оптическая характеристика всех устройств (глубина модуляции излучения) сопоставима и колеблется от 20% (ячейка Голея) до 90% (у всех остальных), то быстродействия этих устройств существенно различны. Самое малое время срабатывания у модуляторов на основе нанотрубок и графена (менее 10^{-12} с), у ЖК модулятора время срабатывания порядка 10^{-3}, а у ячейки Голея – более 10^{-2} с. Однако модуляторы на основе графена работают при температурах не выше комнатной, в то время как, например, ЖК устройства работают при температурах от -40°C до +90°C. Таким образом многослойная конструкция ТГц модулятора на базе определенного числа π-ячеек имеет сопоставимые характеристики с другими устройствами, обладая при этом существенным преимуществом в технологии производства, так как основана на стандартных ЖК ячейках, известных с середины 1970-х гг.

В заключение хотим отметить, что полученные в статье результаты можно использовать при изготовлении ТГц ЖК модулятора, однако оптимальные технологические параметры устройства будут определяться длиной волны используемого излучения.

Список литературы

1. *Gangwar R. K., Pathak A. K., Kumar S.* Recent progress in photonic crystal devices and their applications: A review // Photonics. 2023. Vol. 10, № 11. Art. 1199. https://doi.org/10.3390/photonics1011119
2. *Амин Я. М., Маджид А. А., Хусейн А. Д., Касим Н. Х., Касем В.* Фотонные кристаллы: оптимизация характеристик и перспективы оптических приложений // РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2024. Т. 16, № 6. С. 707–720. https://doi.org/10.17725/rensit.2024.16.707
3. *Муламахавш Анфал Фадиль Ахмед, Симоненко Г. В.* Конструкция модулятора терагерцового излучения на основе эффекта многоволновой интерференции в слоистой структуре, состоящей из большого числа жидкокристаллических π-ячеек // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Физика. 2025. Т. 25, вып. 4. С. 438–448. https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-4-438-448, EDN: NPDCQA
4. *Zhou Le, Zhong T., Liu Yu., Yu T., Neyts K., Luo Zh., Wang H., Sun J., Zhou Ji, Shen Ya.* When structured light encounters liquid crystals // Adv. Funct. Mater. 2024. Vol. 34. Art. 2404614. https://doi.org/10.1002/adfm.202404614
5. *Wang L., Wang Ya., Zong G., Hu W., Lu Ya.* Liquid crystal based tunable terahertz metadevices // J. of Materiomics. 2025. Vol. 11, № 1. P. 10–16. https://doi.org/10.1016/j.jmat.2024.04.012
6. *Harter T., Fuellner C., Kemal J. N., Ummethala S., Steinmann J. L., Brosi M., Hesler J. L., Bruendermann E., Mueller A. S., Freude W., Randel S., Koos C.* Generalized Kramers–Kronig receiver for coherent terahertz communications // Nature Photonics. 2020. Vol. 14, № 10. P. 601−606. https://doi.org/10.1038/s41566-020-0675-0
7. *Гибин И. С., Котляр П. В.* Приёмники излучения терагерцового диапазона (обзор) // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6, № 2. С. 117–129. EDN: UOIVWF

8. Терагерцовая фотоника: коллективная монография / [под редакцией В. Я. Панченко, А. П. Шкуринова]. М. : Российская академия наук, 2023. 711 с.
9. *Ушаков А. П., Чижов П. А., Букин В. В., Гарнов С. В.* Генерация терагерцового излучения в плазме оптического пробоя газов // УФН. 2024. Т. 194, № 2. С. 169–189. https://doi.org/10.3367/UFNr.2023.10.039579
10. *Lin Q. W., Wong H., Huitema L., Crunteanu A.* Coding metasurfaces with reconfiguration capabilities based on optical activation of phase-change materials for terahertz beam manipulations // Adv. Opt. Mater. 2022. Vol. 10, № 1. Art. 2101699. https://doi.org/10.1002/adom.202101699
11. *Fu X., Yang F., Liu C., Wu X., Cui T. J.* Terahertz beam steering technologies: From phased arrays to field-programmable metasurfaces // Adv. Opt. Mater. 2020. Vol. 8, № 3. Art. 1900628. https://doi.org/10.1002/adom.201900628
12. *Oh-e M., Zheng D.-Y.* Reversibly switching liquid crystals between three orthogonal orientation states for use in rapid-response THz phase shifters // Optics Express. 2023. Vol. 31, № 5. P. 8632–8640. https://doi.org/10.1364/oe.48417
13. *Herrmann E., Gao H., Huang Zh., Sitaram S. R., Ma K., Wang X. Sitaram, Ma Ke, Wang Xi.* Modulators for mid-infrared and terahertz light // J. Appl. Phys. 2020. Vol. 128, iss. 14. Art. 140903. https://doi.org/10.1063/5.0025032
14. *Сухариер А. С.* Жидкокристаллические индикаторы. М. : Радио и связь, 1991. 256 с.
15. *Azzam R. M. A., Bashara N. M.* Ellipsometry and polarized light. Amsterdam, North Holland, 1977. XVII+529 p.
16. *Yakovlev D. A., Chigrinov V. G., Kwok H. S.* Modeling and optimization of LCD optical performance. Chichester, Wiley, 2015. XXIII+554 p. https://doi.org/10.1002/9781118706749
17. *Симоненко Г. В.* Компьютерное моделирование характеристик быстродействующих классических модуляторов на основе жидких кристаллов. Саратов : Изд-во Саратовского университета, 2018. 136 с.
18. *Калитеевский Н. И.* Волновая оптика. СПб. : Лань, 2025. 468 с.
19. *Севостьянов В. П., Аристов В. Л., Митрохин М. В.* Жидкокристаллические дисплеи: электрооптика, управление, конструкция и технология. Минск : Микровидеосистемы, 1998. 508 с.
20. *Зайцев К. И., Долганова И. Н., Черномырдин Н. В., Командин Г. А., Лаврухин Д. В., Решетов И. В., Курлов В. Н., Пономарев Д. С., Тучин В. В., Спектор И. Е., Карасик В. Е.* Применение терагерцовых технологий в биофотонике. Часть 1: Методы терагерцовой спектроскопии и визуализации тканей // Фотоника. 2019. Т. 13, № 7. С. 680–687. https://doi.org/10.22184/1993-7296FRos.2019.13.7.680.687
21. *Князев Б. А., Черкасский В. С.* Терагерцовое излучение: публикации последнего десятилетия. Новосибирск : Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера, 2002. 42 с.
22. *Singh A., Pashkin A., Winnerl St., Welsch M., Beckh C., Sulzer Ph., Leitenstorfer A., Helm M., Schneider H.* Up to 70 THz bandwidth from an implanted Ge photoconductive antenna excited by a femtosecond Er:fibre laser // Light: Science & Applications. 2020. Vol. 9. Art. 30. https://doi.org/10.1038/s41377-020-0265-4
23. *Burdanova M. G., Katyba G. M., Kashtiban R., Komandin G. A., Butler-Caddle E., Staniforth M., Mkrtchyan A. A., Krasnikov D. V., Gladush Y. G., Sloan J., Nasibulin A. G., Lloyd-Hughes J.* // Carbon. 2021. Vol. 173. P. 245–252. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.11.008
24. *Макеева Г. С.* Магнитоплазмоника графена как платформа для создания устройств терагерцового и среднего инфракрасного диапазонов с комбинированной электрической и магнитной перестройкой (обзор проблемы) // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2024. № 4. С. 118–138. https://doi.org/10.21685/2072-3040-2024-4-10
25. *Guo Q., Yu R., Li C., Yuan Sh., Deng B., de Abajo F. J. G., Xia F.* Efficient electrical detection of mid-infrared graphene plasmons at room temperature // Nature Materials. 2018. Vol. 17. P. 986–992. https://doi.org/10.1038/s41563-018-0157-7

References

1. Gangwar R. K., Pathak A. K., Kumar S. Recent progress in photonic crystal devices and their applications: A review. *Photonics*, 2023, vol. 10, no. 11, art.1199. https://doi.org/10.3390/photonics1011119
2. Amin Ya. M., Majeed A. A., Hussein A. J., Qasim N. H., Qasem W. Advancements in photonic crystals that paving the way for next-generation optical devices. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, vol. 16, no. 6, pp. 707– 720. https://doi.org/10.17725/j.rensit.2024.16.707
3. Mulamahawsh Anfal Fadhil Ahmed, Simonenko G. V. Design of a terahertz radiation modulator based on the effect of multi-wave interfence in a layered structure consisting of a large number of liquid crystal π-cells. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2025, vol. 25, iss. 4, pp. 438–448 (in Russian). https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-4-438-448, EDN: NPDCQA
4. Zhou Le, Zhong T., Liu Yu., Yu T., Neyts K., Luo Zh., Wang H., Sun J., Zhou Ji, Shen Ya. When structured light encounters liquid crystals. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, vol. 34, art. 2404614. https://doi.org/10.1002/adfm.202404614
5. Wang L., Wang Ya., Zong G., Hu W., Lu Ya. Liquid crystal based tunable terahertz metadevices. *J. of Materiomics*, 2025, vol. 11, no.1, pp. 10–16. https://doi.org/10.1016/j.jmat.2024.04.012
6. Harter T., Fuellner C., Kemal J. N., Ummethala S., Steinmann J. L., Brosi M., Hesler J. L., Bruendermann E., Mueller A. S., Freude W., Randel S., Koos C. Generalized Kramers – Kronig receiver for coherent terahertz communications. *Nature Photonics*, 2020,

vol. 14, no. 10, pp. 601−606. https://doi.org/10.1038/s41566-020-0675-0

7. Gibin I. S., Kotlyar P. V. Teraherz radiation detectors. *Uspekhi prikladnoj fiziki*, 2018, vol. 6, no. 2, pp. 117–129 (in Russian). EDN: UOIVWF
8. *Teragertsovaya fotonika: Kollektivnaya monografiya* [Panchenko V. Ya., Shkurinov A. P., eds. Terahertz photonics: Collective monograph]. Moscow, Russian Academy of Sciences Publ., 2023. 711 p. (in Russian).
9. Ushakov A. P., Chizhov P. A., Bukin V. V., Garnov S. V. Generation of terahertz radiation in the plasma of optical gas breakdown. *Phys. Usp.*, 2024, vol. 67, no. 2, pp. 157–170. https://doi.org/10.3367/UFNe.2023.10.039579
10. Lin Q. W., Wong H., Huitema L., Crunteanu A. Coding metasurfaces with reconfiguration capabilities based on optical activation of phase-change materials for terahertz beam manipulations. *Adv. Opt. Mater.*, 2022, vol. 10, no. 1, art. 2101699. https://doi.org/10.1002/adom.202101699
11. Fu X., Yang F., Liu C., Wu X., Cui T. J. Terahertz beam steering technologies: From phased arrays to field-programmable metasurfaces. *Adv. Opt. Mater.*, 2020, vol. 8, no. 3, art. 1900628. https://doi.org/10.1002/adom.201900628
12. Oh-e M., Zheng D.-Y. Reversibly switching liquid crystals between three orthogonal orientation states for use in rapid-response THz phase shifters. *Optics Express*, 2023, vol. 31, no. 5, pp. 8632–8640. https://doi.org/10.1364/oe.48417
13. Herrmann E., Gao H., Huang Zh., Sitaram S. R., Ma K., Wang Xi. Modulators for mid-infrared and terahertz light. *J. Appl. Phys.*, 2020, vol. 128, iss. 14, art. 140903. https://doi.org/10.1063/5.0025032
14. *Sukharier A. S. Zhidkokristallicheskie indikatory* [Liquid crystal indicators]. Moscow, Radio i svyaz', 1991. 256 p. (in Russian).
15. Azzam R. M. A., Bashara N. M. *Ellipsometry and polarized light.* Amsterdam, North Holland, 1977. XVII+529 p.
16. Yakovlev D. A., Chigrinov V. G., Kwok H. S. *Modeling and optimization of LCD optical performance.* Chichester, Wiley, 2015. XXIII+554 p. https://doi.org/10.1002/9781118706749
17. Simonenko G. V. *Komp'yuternoe modelirovanie kharakteristik bystrodejstvuyushchikh klassicheskikh modulyatorov na osnove zhidkhikh kristallov* [Computer simulation of characteristics of high-speed classical modulators based on liquid crystals]. Saratov, Saratov State University Publ., 2018. 136 p. (in Russian).
18. Kaliteevsky N. I. *Volnovaya optika* [Wave optics]. St. Petersburg, Lan', 2025. 468 p. (in Russian).
19. Sevostyanov V. P., Aristov V. L., Mitrokhin M. V. *Zhidkokristallicheskie displei: elektrooptika, upravlenie, konstrukciya i tekhnologiya* [Liquid crystal displays: electro-optics, control, design and technology]. Minsk, Microvideosystemy, 1998. 508 p. (in Russian).
20. Zaytsev K. I., Dolganova I. N., Chernomyrdin N. V., Komandin G. A., Lavrukhin D. V., Reshetov I. V., Kurlov V. N., Ponomarev D. S., Tuchin V. V., Spektor I. E., Karasik V. E. Application of terahertz technologies in Biophotonics. Pt. 1: Methods of terahertz spectroscopy and tissue imaging. *Photonics*, 2019, vol. 13, no. 7, pp. 680–687 (in Russian). https://doi.org/10.22184/1993-7296FRos.2019.13.7.680.687
21. Knyazev B. A., Cherkassky V. S. *Teragertsovoe izluchenie: publikatsii poslednego desyatiletiya* [Terahertz radiation: Publications of the last decade]. Novosibirsk, Budker Institute of Nuclear Physics Publ., 2002. 42 p. (in Russian).
22. Singh A., Pashkin A., Winnerl St., Welsch M., Beckh C., Sulzer Ph., Leitenstorfer A., Helm M., Schneider H. Up to 70 THz bandwidth from an implanted Ge photoconductive antenna excited by a femtosecond Er:fibre laser. *Light: Science & Applications*, 2020, vol. 9, art. 30. https://doi.org/10.1038/s41377-020-0265-4
23. Burdanova M. G., Katyba G. M., Kashtiban R., Komandin G. A., Butler-Caddle E., Staniforth M., Mkrtchyan A. A., Krasnikov D. V., Gladush Y. G., Sloan J., Nasibulin A. G., Lloyd-Hughes J. Ultrafast, high modulation depth terahertz modulators based on carbon nanotube thin films. *Carbon*, 2021, vol. 173, pp. 245–252. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.11.008
24. Makeeva G. S. Graphene magnetoplasmonics as a platform for creating THz and Mid-IR devices with combined electrical and magnetic tuning (overview of the problem). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki = University proceedings. Volga Region. Physical and Mathematical Sciences*, 2024, no. 4, pp. 118–138 (in Russian). https://doi.org/10.21685/2072-3040-2024-4-10
25. Guo Q., Yu R., Li C., Yuan Sh., Deng B., de Abajo F. J. G., Xia F. Efficient electrical detection of mid-infrared graphene plasmons at room temperature. *Nature Materials*, 2018, vol. 17, pp. 986–992. https://doi.org/10.1038/s41563-018-0157-7

Поступила в редакцию 08.05.2026; одобрена после рецензирования 03.06.2026;
принята к публикации 17.06.2026; опубликована 30.09.2026

The article was submitted 08.05.2026; approved after reviewing 03.06.2026;
accepted for publication 17.06.2026; published 30.09.2026