



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 4. С. 438–448

Izvestiya of Saratov University. Physics, 2025, vol. 25, iss. 4, pp. 438–448

<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-4-438-448>, EDN: NPDCQA

Научная статья

УДК 535.361:610.849.19:618.723



Конструкция модулятора терагерцового излучения на основе эффекта многоволновой интерференции в слоистой структуре, состоящей из большого числа жидкокристаллических π -ячеек

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, anf.al.fadhel@yahoo.com, <https://orcid.org/0009-0007-7803-3565>
Георгий Валентинович Симоненко, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры оптики и биофотоники, simonenkogv@sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6283-6335>, AuthorID: 28982

Аннотация. На основе компьютерного моделирования предлагается оригинальная жидкокристаллическая конструкция модулятора ТГц излучения, состоящая из стопки расположенных друг за другом одинаковых «классических» π -ячеек. Принцип работы модулятора основан на явлении многоволновой интерференции, которая управляется электрическим полем. Матричным методом исследованы характеристики предлагаемого устройства – зависимости пропускания устройства от управляющего напряжения, контрастного отношения, величины пропускания модулятора при подаче на него максимального управляющего напряжения. Показано, что контрастное отношение модулятора падает с ростом длины волны модулируемого излучения, а пропускание модулятора в состоянии с максимальным значением управляющего напряжения такой зависимости не проявляет. Обнаружено, что десятичный логарифм контрастного отношения модулятора линейно зависит от числа элементарных π -ячеек, входящих в его конструкцию. Коэффициент наклона этой линейной функции убывает с ростом длины волны модулируемого излучения. Показано, что описанная конструкция жидкокристаллического модулятора ТГц излучения критична к технологическому разбросу в толщину элементарной жидкокристаллической ячейки. Однако величина этого разброса укладывается в простую технологию изготовления элементарных π -ячеек и не требует улучшения.

Ключевые слова: модулятор, жидкий кристалл, компьютерное моделирование, характеристики устройства

Для цитирования: Анфал Фадиль Ахмед Муламахавш, 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

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

Article

Design of a terahertz radiation modulator based on the effect of multi-wave interference in a layered structure consisting of a large number of liquid crystal π -cells

Anfal Fadhil Ahmed Mulamahawsh, G. V. Simonenko[✉]

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

Anfal Fadhil Ahmed Mulamahawsh, anf.al.fadhel@yahoo.com

Georgy V. Simonenko, simonenkogv@sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6283-6335>, AuthorID: 28982

Abstract. Background and Objectives: An original design of a liquid crystal THz radiation modulator is proposed based on computer modeling. It consists of a stack of identical “classical” π -cells located one after another. **Materials and Methods:** Based on a computer model and by using the matrix method, the characteristics of the proposed device are studied: dependence of the device transmission on the control voltage, contrast ratio, and the modulator transmission value when the maximum control voltage is applied to it. **Results:** It has been shown that the modulator contrast ratio decreases with increasing wavelength of the modulated radiation, and the modulator transmission in the state with the maximum value of the control voltage does not exhibit such a dependence. It has been found that the decimal logarithm of the modulator contrast ratio linearly depends on the number of elementary π -cells included in its design. The slope coefficient of this linear function decreases with increasing wavelength of the modulated radiation. It has been shown that the described design of the THz radiation LC modulator is critical



to the technological spread in the thickness of the elementary LC cell. However, the magnitude of this spread fits into the simple technology of manufacturing elementary π -cells and does not require improvement.

Keywords: modulator, liquid crystal, computer simulation, device characteristics

For citation: Anfal Fadhil Ahmed Mulamahawsh, Simonenko G. V. Design of a terahertz radiation modulator based on the effect of multi-wave interference 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

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 терагерцовый (ТГц) диапазон широко используется в беспроводной связи, системах безопасности, биологических системах визуализации и других областях науки и техники [1–8]. В силу этого актуальной задачей является разработка методов и устройств, способных модулировать исходное ТГц излучение. Для этих целей используются как механические модуляторы [9–12], так и более перспективные устройства на основе жидких кристаллов (ЖК) [13, 14]. ЖК модуляторы обладают рядом достоинств: они характеризуются хорошей широкополосной оптической анизотропией показателей преломления, являются одними из немногих материалов в ТГц-диапазоне с низкими потерями на поглощение, имеют большой диапазон перестройки фазового сдвига посредством внешнего поля [15].

Для модуляции ТГц излучения можно использовать различные конструкции ЖК устройств [13, 14, 16], которые основаны на управлении оптическими свойствами ЖК с помощью внешнего электрического поля. Так как при наложении внешнего электрического поля на слой ЖК изменяется его показатель преломления, а конструкция ЖК устройства является многослойной, то для модуляции ТГц излучения можно использовать явление многоволновой интерференции в такой структуре. С учетом этого настоящая статья посвящена исследованию оптических свойств оригинального многослойного ЖК модулятора ТГц излучения в условиях существования эффекта многоволновой интерференции и управления показателем преломления ЖК посредством внешнего электрического поля.

Конструкция модулятора и метод описания его характеристик

Принципы модуляции электромагнитного ТГц излучения могут быть основаны на использовании различных электрооптических эффектов в ЖК. Наиболее распространенным из них является управление показателем преломления

ЖК посредством воздействия внешним электрическим полем [17]. Если говорить об использовании определенных конструкций на базе ЖК ячеек, то наиболее верным выбором будет модулятор на основе «классической» π -ячейки. Это заключение обосновывается тем, что подобная конструкция имеет оптимальное сочетание динамических (малые времена срабатывания) и оптических (высокое контрастное отношение и высокий коэффициент пропускания) характеристик [18, 19]. В этом случае модуляцию электромагнитного излучения с помощью ЖК ячеек можно осуществить с использованием либо эффекта интерференции поляризованных волн [16], либо эффекта многоволновой интерференции [20]. Во втором случае модуляция излучения происходит за счет изменения показателя преломления необыкновенной волны в зависимости от внешнего управляющего напряжения. 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 значения n_e до минимального n_o , что может позволить осуществить модуляцию излучения с большой глубиной.

Следует учитывать, что модуляция излучения возможна только при выполнении условия:

$$L_{\min} = \frac{\lambda_0}{2(n_e - n_o)}, \quad (1)$$

где $L_{\min}$ – толщина слоя ЖК, λ_0 – длина волны модулируемого излучения, n_e и n_o – коэффициенты преломления ЖК для необыкновенной и обыкновенной волн соответственно. Условие (1) отражает то обстоятельство, что фаза суммарной волны, прошедшей через модулятор в состоянии, когда напряжение не подано на ЖК (показатель преломления ЖК равен n_e), должна отличаться на π от фазы волны, прошедшей через модулятор в состоянии, когда рабочее напряжение подано на ЖК (показатель преломления ЖК стремится к n_o).



Очевидно, что если для ТГц излучения использовать только одну рабочую ЖК ячейку, то условие (1) выполняется только для очень больших значений толщин слоя ЖК. Известно [18, 19], что увеличение толщины слоя ЖК приводит к резкому росту времени реакции ЖК на управляющее напряжение, так как время реакции пропорционально квадрату толщины слоя ЖК.

Для решения этой проблемы была предложена конструкция модулятора не на одной ЖК ячейке, а на основе N одинаковых ЖК ячеек [16]. Стоит заметить, что описанная в этой работе конструкция модулятора основана на эффекте интерференции поляризованных волн в многослойной структуре из ЖК ячеек. В отличие от этой конструкции, мы предлагаем использовать только эффект многоволновой интерференции в многослойной структуре, состоящей из N одинаковых ЖК ячеек. Благодаря этому в этой конструкции необязателен выходной поляризатор, что дает увеличение коэффициента пропускания устройства. На рис. 1 показана схематическое изображение структуры такого модулятора. За основу взята одна «классическая» π -ячейка, толщина которой равна 2 мкм. Выбор такой ЖК ячейки в качестве базы позволит получить малые времена полного срабатывания ЖК устройства [18]. «Классическая» π -ячейка представляет собой гомогенную нематическую ЖК ячейку с антисимметричными граничными условиями и с незакрученной структурой ЖК. Антисимметричные граничные условия в ЖК ячейке означают, что угол наклона молекул ЖК на одной ориентирующей поверхности имеет такое же значение как и угол наклона молекул

ЖК на другой ориентирующей поверхности, но с противоположным знаком. Как отмечено выше, одна такая ячейка не пригодна для модуляции ТГц излучения, поэтому для соответствующего получения максимума интерференции поляризованных волн используем набор, состоящий из N одинаковых элементарных π -ячеек, каждая из которых имеет собственное электроуправление. Значения управляющего напряжения для каждой ЖК ячейки одинаковы, а напряжение подается одновременно на все ячейки. При этом направление ориентации молекул ЖК в каждой из ячеек совпадает друг с другом. Тогда минимальное число таких π -ячеек определяется интерференционным условием (1) следующим образом:

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

где L_o – толщина одной элементарной π -ячейки.

Пусть на такую структуру падает линейно поляризованная электромагнитная волна под углом падения 0° . Вектор поляризации падающей электромагнитной волны должен совпадать с направлением поляризации необыкновенной волны, возникающей в ЖК. Тип поляризации волны, распространяющейся в ЖК ячейке, изменяться не будет, так как излучение распространяется вдоль нормали к поверхности ячейки. То есть в прямом направлении распространяется только одна электромагнитная волна и тогда коэффициент пропускания суммарного излучения T_e можно получить, используя матричный формализм Абельеса [21, 22]. В этом случае устройство будет описываться комплексной матрицей S размера 2×2 , а коэффициент пропускания T_e такого

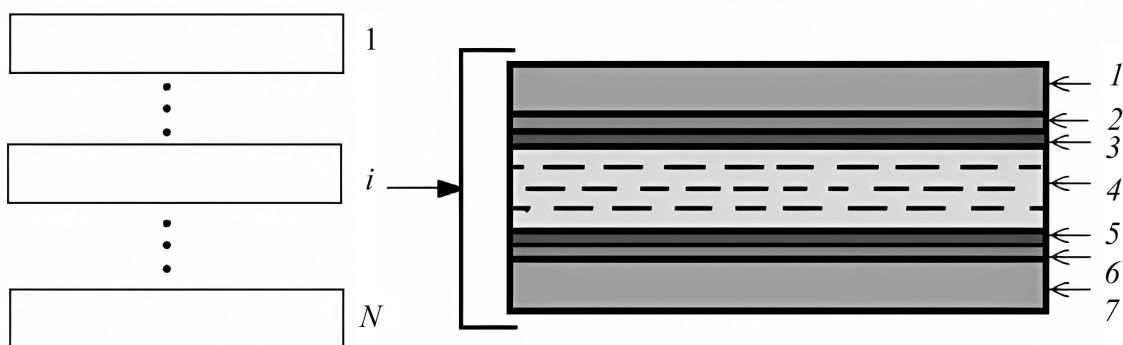


Рис. 1. Схематическое представление модулятора ТГц излучения на основе N ЖК ячеек: слева – стопка N одинаковых π -ячеек на основе ЖК; справа – отдельная ячейка: 1 и 7 – стеклянные подложки; 2 и 6 – управляющие электродные слои; 3 и 5 – ориентирующие слои; 4 – рабочий слой ЖК

Fig. 1. Schematic representation of a THz radiation modulator based on N LC cells: on the left – a stack of N identical π -cells based on LC; on the right – a single cell: 1 and 7 – glass substrates; 2 and 6 – control electrode layers; 3 and 5 – orienting layers; 4 – working LC layer



модулятора можно вычислить согласно представлению:

$$T_e = \tau \cdot \tau^*, \quad \tau = \frac{1}{S_{11}}, \quad (2)$$

где S_{11} – матричный элемент суммарной матрицы Абелеса S всего ЖК модулятора. Матрица S определяется как

$$S = I_1 \cdot (S_i)^N \cdot I_2, \quad (3)$$

где I_1, I_2 – матрицы Абелеса границы раздела воздух – стекло и стекло – воздух, соответственно; S_i – матрица Абелеса i -й π -ячейки (способ ее нахождения подробно описан в работе [22]).

На основе описанного алгоритма разработанная программа *Is-n* на языке Fortran 95 для расчета коэффициента пропускания ЖК модулятора, работающего на базе «классической» π -ячейки. Входными параметрами программы *Is-n* являются следующие параметры ЖК ячейки: показатель преломления и толщина стеклянных подложек; показатель преломления и толщина электродных слоев; показатель преломления и толщина ориентирующих слоев; средний по толщине необыкновенный показатель преломления ЖК (n_e) и толщина его слоя L_0 . К входным параметрам программы относятся также длина волны модулируемого электромагнитного излучения λ и число одинаковых ЖК ячеек N . Выходным параметром этой программы является значение коэффициента пропускания всего ЖК модулятора T_e . Для расчета среднего по толщине показателя преломления необыкновенного ЖК для заданного управляющего напряжения использовался программный комплекс MOUSE – LCD [18, 19, 23]. Точность компьютерного моделирования характеристик предложенного модулятора подтверждена сравнением с данными, полученными с помощью известного пакета программ MOUSE-LCD [19].

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим влияние основных конструктивных параметров модулятора (толщины слоя элементарной ячейки L_0 и числа элементарных ячеек N) на коэффициент пропускания модулятора T_e . При моделировании считается, что каждая элементарная π -ячейка заполнена ЖК смесью со следующими физическими параметрами (значения даны в системе СГС): $k_{11} = 10.5 \cdot 10^{-6}$ дин, $k_{22} = 6.9 \cdot 10^{-6}$ дин, $k_{33} = 16.8 \cdot 10^{-6}$ дин, $\epsilon_{\perp} = 4.88$, $\epsilon_{\parallel} = 13.54$, вращательная вязкость $\gamma_1 = 0.15$ пуаз. При этом, по данным работ [24, 25],

некоторые ЖК вещества имеют слабую дисперсионную зависимость показателей преломления, что в первом приближении позволяет считать эту характеристику постоянной для ТГц диапазона.

Кроме этого следует заметить, что, по данным работы [24], существуют ЖК смеси, для которых коэффициент поглощения в ТГц диапазоне не превышает 10 см^{-1} , что позволяет считать слой ЖК непоглощающим. Во всех дальнейших расчетах эти физические параметры ЖК оставались постоянными, а значения технологических параметров стандартной π -ячейки (толщин и показателей преломления) взяты из работы [26]. Граничные условия в каждой элементарной π -ячейке считались следующими: 2° – угол наклона молекул ЖК на первой ориентирующей поверхности, -2° – угол наклона на второй ориентирующей поверхности, 0° – угол закрутки ЖК структуры.

ЖК модулятор является разновидностью ЖК устройства преобразования оптического излучения. Построение модели ЖК модулятора электромагнитного излучения сводится к определению трех характеристик – зависимости коэффициента пропускания устройства от управляющего напряжения, контрастного отношения и максимального пропускания устройства [27].

Контрастное отношение C или контрастность ЖК модулятора определяется как

$$C = \frac{T_e^{\text{on}}}{T_e^{\text{off}}}, \quad (4)$$

где T_e^{off} – коэффициент пропускания модулятора для случая, когда управляющие напряжение на его электродах равно нулю (оп-состояние); T_e^{on} – коэффициент пропускания модулятора для случая, когда управляющие напряжение на его электродах равно рабочему значению (off-состояние). Коэффициент пропускания в состоянии с максимальным его значением соответствует коэффициенту пропускания ЖК модулятора в оп-состоянии.

Вычисленная зависимость $T_e = T_e(U)$ ЖК модулятора для различных длин волн модулируемого излучения показана на рис. 2, а. Понять, почему пропускание такого ЖК модулятора зависит от управляющего напряжения, можно с помощью формулы Эйри для многоволновой интерференции [28]:

$$T = \frac{1}{(1 + 4\rho \cdot \sin^2(\pi \cdot n \cdot \frac{L}{\lambda}) / (1 - \rho)^2)}, \quad (5)$$



где T – коэффициент пропускания излучения, ρ – коэффициент отражения границы раздела воздух – пластина, n – показатель преломления, L – толщина пластины, λ – длина волны.

Очевидно, что если показатель преломления n (в данном случае – слоя ЖК) зависит от управляющего напряжения U (рис. 2, б), то и коэффициент пропускания будет являться функцией от этой величины. Стоит отметить, что, так как предлагаемая конструкция ЖК модулятора содержит очень большое число различных слоев с различными конструктивными параметрами, то простой аналитической зависимости коэффициента пропускания от этих параметров не существует. При этом форма зависимости $T_e = T_e(U)$ является стандартной для всех электрооптических эффектов, наблюдаемых в ЖК. Однако величина коэффициента пропускания зависит от фазы интерферирующих волн, и она различна для разных длин волн модулируемого излучения при одном и том же наборе конструктивных параметров модулятора. Благодаря этому величина T_e^{off} для малых длин волн значительно меньше, чем в области больших значений λ . Поэтому значения конструктивных параметров модулятора, которые обеспечивают необходимые характеристики модуляции излучения, зависят от длины волны модулируемого излучения. Это существенным образом отличает ЖК модуляторы видимого диапазона, которые

имеют один набор величин конструктивных параметров устройства для всего модулируемого спектра излучения. В то же время значения T_e^{on} слабо зависят от длины волны излучения (см. рис. 2, а). Следовательно, контрастное отношение ЖК модулятора будет сильно зависеть от длины волны модулируемого излучения.

На рис. 3 представлена зависимость логарифма контрастного отношения ЖК модулятора от числа элементарных π -ячеек, входящих в его конструкцию. Как показывает моделирование, зависимость $\lg C$ от числа элементарных π -ячеек N описывается линейной функцией с уровнем достоверности не ниже 93%. Для меньшей длины волны модулируемого излучения прямая имеет более высокий коэффициент наклона прямой. Поэтому если используется одна и та же конструкция ЖК модулятора для различных длин волн, то модуляцию излучения более эффективно можно проводить для более коротких длин волн. В силу этого конструкция ЖК модулятора (число элементарных ЖК ячеек) существенно зависит от длины волны модулируемого излучения.

Для ЖК модуляторов видимого диапазона существенную роль играет технологический разброс толщин рабочего зазора ЖК ячейки [18, 27]. Это объясняется тем, что основным физическим явлением, на базе которого работают почти все современные ЖК устройства отображения и преобразования информации, является

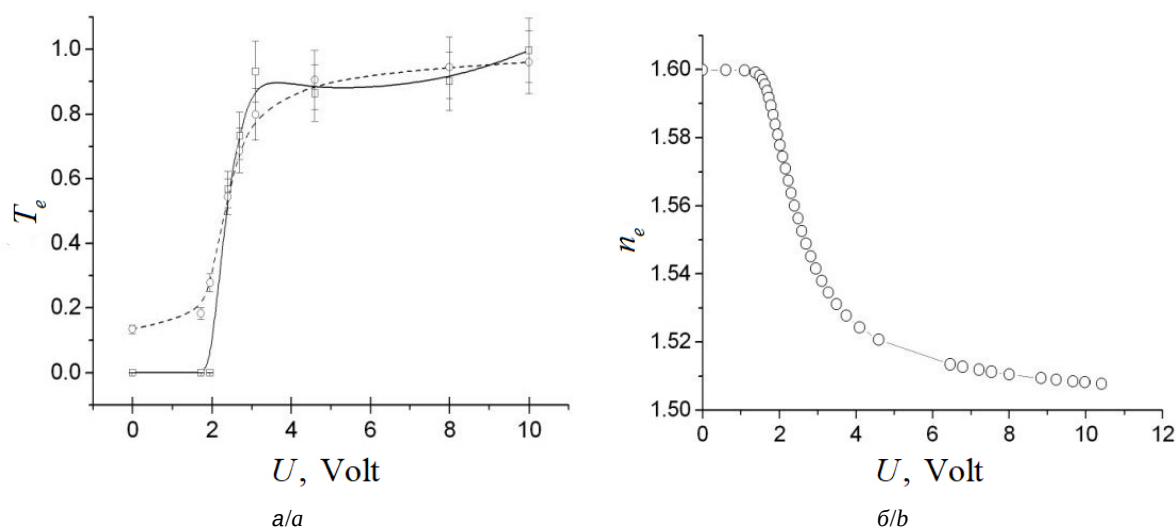


Рис. 2. Зависимость пропускания ЖК модулятора на основе π -ячейки без выходного поляризатора T_e (а) и среднего по толщине показателя преломления ЖК слоя n_e (б) от управляющего напряжения U для длин волн излучения: 17.5 мкм (---○---) и 1.5 мкм (—□—). Число элементарных π -ячеек $N = 30$

Fig. 2. Dependence of the transmission of the LC modulator based on a π -cell without an output polarizer T_e (a) and the average refractive index of the LC layer n_e (b) on the control voltage U for radiation wavelengths: 17.5 μm (---○---), 1.5 μm (—□—). The number of elementary π -cells is $N = 30$

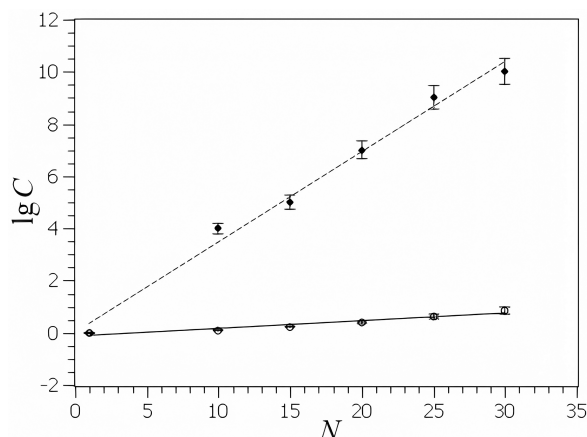


Рис. 3. Зависимость контрастного отношения ЖК модулятора от числа элементарных π -ячеек N для длин волн излучения: 17.6 мкм (—○—) и 1.5 мкм (---●---)

Fig. 3. Dependence of the contrast ratio of the LC modulator on the number of elementary π -cells N for radiation wavelengths: 17.5 μm (—○—) 1.5 μm (---●---)

тот или иной вид интерференции. Аналогичное заключение можно сделать и о предлагаемой конструкции ЖК модулятора ТГц излучения. Так,

на рис. 4 представлены зависимости коэффициента пропускания ЖК модулятора в состоянии «включено» T_e^{on} от толщины элементарной π -ячейки L_0 . Как можно видеть, зависимость $T_e^{\text{on}} = T_e^{\text{on}}(L_0)$ имеет осцилляции, число которых зависит от длины волны излучения, но не зависит от числа элементарных ЖК ячеек. Осциллирующий характер этой зависимости также можно понять, анализируя формулу (5), в которой пропускание объекта описывается гармонической функцией от отношения толщины слоя образца к длине волны излучения.

Величина амплитуды осцилляций (см. рис. 4) может составлять до 40% от максимальной величины. Это показывает, что данная конструкция ЖК модулятора ТГц излучения критична к технологическому разбросу в толщине элементарной ЖК ячейки. Однако величина этого разброса соответствует простой технологии изготовления элементарных π -ячеек [26], и поэтому не требует улучшения. Таким образом, оставаясь в рамках стандартной технологии

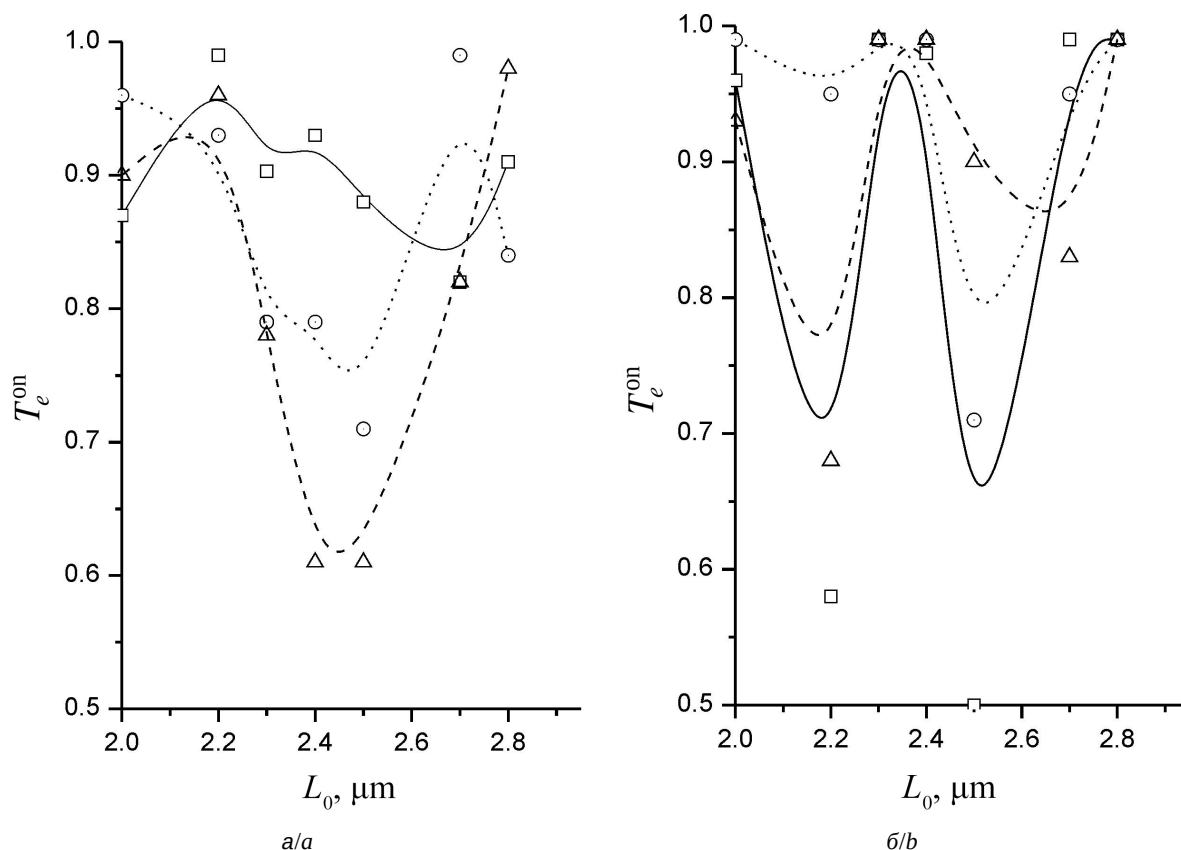


Рис. 4. Зависимость коэффициента пропускания T_e^{on} модулятора в он-состоянии от толщины элементарной π -ячейки L_0 для $\lambda = 17.5 \mu\text{m}$ (a) и $1.5 \mu\text{m}$ (б): $N = 30$ (—□—), $N = 20$ (···○···), $N = 10$ (---△---)

Fig. 4. Dependence of the transmittance of T_e^{on} of the modulator in the on-state on the thickness of the unit π -cell L_0 for $\lambda = 17.5 \mu\text{m}$ (a) and $1.5 \mu\text{m}$ (b): $N = 30$ (—□—), $N = 20$ (···○···), $N = 10$ (---△---)



производства промышленных ЖК устройств обработки и отображения информации, можно изготовить новый класс устройств модуляции излучения ТГц диапазона.

В отличие от видимого диапазона, в котором модуляция излучения производится устройством с одинаковыми технологическими параметрами для всего спектра излучения, для ТГц излучения это не так. В этом случае описанный выше модулятор с определенным набором технологических параметров пригоден только для очень узкого спектра излучения, так как основой его работы является многоволновая интерференция. Согласно современным представлениям (см., например, [29]), приоритетными областями применения предложенной конструкции ТГц модулятора могут быть:

- *медицина* (томография и иные медицинские исследования [30]), поскольку ТГц излучение является неионизирующим и относительно безопасным для человека;
- *системы безопасности*, так как высокая проникающая способность ТГц излучения позволяет использовать его для обнаружения предметов, скрытых за препятствиями [31];
- *системы связи* (беспроводные широкополосные высокоскоростные системы связи, в частности, для будущего поколения мобильной связи 6G [32]).

Практический интерес представляет сравнение основных характеристик предложенного устройства с характеристиками других конструкций модуляторов ТГц излучения [31, 33, 34]. В таблице представлены результаты такого сравнения. Описанная в статье конструкция модулятора (столбец 5) имеет сопоставимые характеристики с другими устройствами, но об-

ладает существенным преимуществом в технологии производства, так основана на стандартных ЖК ячейках, известных с середины 1970-х гг.

Заключение

В настоящей статье описана оригинальная конструкция ЖК модулятора излучения ТГц диапазона, в которой для получения модуляции используется явление многоволновой интерференции в многослойной структуре устройства. Конструкция модулятора представляет из себя стопку расположенных друг за другом одинаковых «классических» п-ячеек без выходного поляризатора. Методом компьютерного моделирования, основанного на матрицах Абелеса, проведено исследование функциональных характеристик предложенного многослойного ЖК модулятора излучения ТГц диапазона. Показано, что зависимость пропускания такого ЖК модулятора от управляющего напряжения имеет для ЖК устройства преобразования информации стандартный вид. Однако пропускание модулятора в off-состоянии (управляющее напряжение на электродах равно рабочему значению) существенно зависит от длины волны излучения и существенно меньше для малых длины волн. В то же время величина пропускания модулятора в on-состоянии (управляющее напряжение на электродах равно нулю) такой зависимости не проявляет. При этом зависимость десятичного логарифма контрастного отношения модулятора от числа элементарных п-ячеек имеет линейный характер, а коэффициент наклона этой зависимости для малых длин волн модулируемого излучения существенно больше чем для более низко частных волн. Таким образом, используя

Характеристики модуляторов ТГц-излучения

Characteristics of THz modulators

Характеристики / Characteristics	Физический принцип / Physical principle			
	На базе ячейки Голя / Based on the Golay cell [31]	На базе углеродных нанотрубок / Based on carbon tubes [33]	Интерференция поляризованных волн в ЖК / The interference of polarized waves in LC [34]	Многоволновая интерференция в ЖК / The multipath interference in LC
Глубина модуляции, % / Modulation depth, %	20	80	95	80–99
Полное время отклика прибора, мс / Full response time of the device, ms	> 25	10^{-9}	2	2
Рабочее напряжение, В / Working voltage, V	> 100	–	< 15	< 15



технологии изготовления «классических» п-ячеек, можно получить модуляцию ТГц излучения с высоким контрастным отношением и малыми временами срабатывания.

Список литературы

1. 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>
2. Wang L., Wang Ya., Zong G., Hu W., Lu Ya. Liquid crystal based tunable terahertz metadivices // *J. of Materiomics.* 2025. Vol. 11, № 1. P. 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2024.04.012>
3. 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>
4. Luomahaara J., Sipola H., Gronberg L., Mayra A., Aikio M., Timofeev A., Tappura K., Rautiainen A., Tamminen A., Vesterinen V., Leivo M., Gao F., Vasama H., Luukanen A., Hassel J. A passive, fully staring THz video camera based on kinetic inductance bolometer arrays // *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2020. Vol. 11, iss. 1. P. 101–108. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2020.3029949>
5. Mu T., Ye Y., Dai Z., Zhao R., Yang M., Ren X. Silver nanoparticles-integrated terahertz metasurface for enhancing sensor sensitivity // *Optics Express.* 2022. Vol. 30, iss. 23. P. 41101–41109. <https://doi.org/10.1364/OE.472520>
6. 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>
7. Mittleman D. M. Twenty years of terahertz imaging // *Opt. Express.* 2018. Vol. 26, iss. 8. P. 9417–9431. <https://doi.org/10.1364/OE.26.009417>
8. Sun Q. S., He Y. Z., Liu K., Fan S. T., Parrott E. P. J., Pickwell-MacPherson E. Recent Advances in Terahertz Technology for Biomedical Applications // *Quant. Imag. Med. Surg.* 2017. Vol. 7, № 3. P. 345–355. <https://doi.org/10.21037/qims.2017.06.02>
9. Alonso-del Pino M., Jung-Kubiak C., Reck T., Llombart N., Chattopadhyay G. Beam Scanning of Silicon Lens Antennas Using Integrated Piezomotors at Submillimeter Wavelengths // *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2019. Vol. 9, iss. 1. P. 47–54. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2018.2881930>
10. Yang Y., Gurbuz O. D., Rebeiz G. M. An eight-element 370–410-GHz phased-array transmitter in 45-nm CMOS SOI with PeakEIRP of 8–8.5 dBm // *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.* 2016. Vol. 64, iss. 12. P. 4241–4249. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2016.2613850>
11. Niu T., Withayachumnankul W., Ung B. S. Y., Menekse H., Bhaskaran M., Sriram S., Fumeaux C. Experimental demonstration of reflectarray antennas at terahertz frequencies // *Opt. Express.* 2013. Vol. 21, iss. 3. P. 2875–2889. <https://doi.org/10.1364/OE.21.002875>
12. 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>
13. Oh-E M., Zheng D. Reversibly switching liquid crystals between three orthogonal orientation states for use in rapid-response THz phase shifters // *Opt. Express.* 2023. Vol. 31. P. 8632–8640. <https://doi.org/10.1364/OE.484171>
14. Ji Y., Jiang X., Fan F., Zhao H., Cheng J., Wang X., Chang S. Active terahertz beam deflection based on a phase gradient metasurface with liquid crystal-enhanced cavity mode conversion // *Opt. Express.* 2023. Vol. 31. P. 1269–1281. <https://doi.org/10.1364/OE.479856>
15. Беляев В. Жидкокристаллические устройства для модуляции терагерцового излучения // *Электроника: наука, технология, бизнес.* 2020. № 5. С. 96–98. <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2020.196.5.96.98>
16. Симоненко Г. В., Муламахавш А. Ф. А. Модуляция терагерцового излучения с помощью жидкокристаллических п-ячеек // *Прикладная физика.* 2024. № 3. С. 13–19. <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2024-3-13-19>
17. He Z., Gou F., Chen R., Yin K., Zhan T., Wu S.-T. Liquid crystal beam steering devices: Principles, recent advances, and future developments // *Crystals.* 2019. Vol. 9, iss. 6. P. 292–300. <https://doi.org/10.3390/cryst9060292>
18. Симоненко Г. В. Компьютерное моделирование характеристик быстродействующих классических модуляторов на основе жидких кристаллов. Саратов : Издательство Саратовского университета, 2018. 136 с.
19. 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>
20. Муламахавш А. Ф. А., Симоненко Г. В. Оптические характеристики жидкокристаллических ячеек в терагерцовом диапазоне // *Проблемы оптической физики и биофотоники. SFM-2024 / под ред. Г. В. Симоненко, В. В. Тучина.* Саратов : Издательство «Саратовский источник», 2024. С. 71–79. <https://doi.org/10.24412/cl-37275-2024-1-71-79>
21. Azzam R. M. A., Bashara N. M. Ellipsometry and polarized light. Amsterdam, North Holland, 1977. XVII+529 p.
22. Mulamahawsh Anfal Fadhil Ahmed, Simonenko G. V. Dependence of the electromagnetic radiation transmission coefficient of liquid crystal π -cells in the Terahertz Range // *J. of Optics and Photonics Research.* 2025, P. 1–6. (online). URL: <https://ojs.bonviewpress.>



- com/index.php/JOPR/article/view/5210/1402 (дата обращения: 26.09.2025). <https://doi.org/10.47852/bonviewJOPR52025210>
23. Chigrinov V. G., Simonenko G. V., Yakovlev D. A., Podjachev Yu. B. The optimization of LCD electrooptical behavior using MOUSE – LCD software // *Mol. Cryst. Liq. Cryst. Sc. Techn. Section A. Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2000. Vol. 351. P. 17–25. <https://doi.org/10.1080/10587250008023248>
24. Park H., Parrott E. P. J., Fan Fan, Lim M., Han H., Chigrinov V. G., Pickwell-MacPherson E. Evaluating liquid crystal properties for use in terahertz devices // *Opt. Express*. 2012. Vol. 20, iss. 11. P. 11899–11905. <https://doi.org/10.1364/OE.20.011899>
25. Li X., Tan N., Pivnenko M., Sibik J., Zeitler J. A., Chu D. Daping high-birefringence nematic liquid crystal for broadband THz applications // *Liquid crystal*. 2016. Vol. 43, № 7. P. 955–962. <https://doi.org/10.1080/02678292.2016.1153732>
26. Курчаткин С. П. Поверхностные явления и структура термотропных жидких кристаллов в капиллярных объемах : дис. ... д-ра хим. наук: 02.00.04 / Саратовский государственный университет. Саратов, 2001. 290 с.
27. Сухаруев А. С. Жидкокристаллические индикаторы. М. : Радио и связь, 1991. 256 с.
28. Born M., Wolf E. Principles of optics: Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light. 7th (expanded) ed. Cambridge : Cambridge University Press, 1999. 985 p.
29. Радивон А. В., Пауков М. И., Катыба Г. М., Рагинов Н. И., Черных А. В., Езерский А. С., Циплакова Е. Г., Раков И. И., Арсенин А. В., Спектор И. Е., Зайцев К. И., Красников Д. В., Петров Н. В., Насибулин А. Г., Волков В. А., Бурданова М. Г. Пространственная модуляция терагерцового излучения при помощи генераторов оптических вихрей на основе тонких пленок одностенных углеродных нанотрубок // *Оптика и спектроскопия*. 2025. Т. 133, вып. 3. С. 303–307. <https://doi.org/10.61011/OS.2025.03.60248.15-25>
30. Smolyanskaya O. A., Chernomyrdin N. V., Konovko A. A., Zaytsev K. I., Ozheredov I. A., Cherkasova O. P., Nazarov M. M., Guillet J.-P., Kozlov S. A., Kistenev Yu. V., Coutaz J.-L., Mounaix P., Vaks V. L., Son J.-H., Cheon H., Wallace V. P., Feldman Yu., Popov I., Yaroslavsky A. N., Shkurinov A. P., Tuchin V. V. Terahertz biophotonics as a tool for studies of dielectric and spectral properties of biological tissues and liquids // *Progress in Quantum Electronics*. 2018. Vol. 62. P. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2018.10.001>
31. Гибин И. С., Котляр П. В. Приёмники излучения терагерцового диапазона (обзор) // *Успехи прикладной физики*. 2018. Т. 6, № 2. С. 117–129. EDN: UOIVWF
32. 6G: *The Next Horizon. From Connected People and Things to Connected Intelligence* / eds. Tong W., Zhu P. Cambridge : Cambridge University Press, 2021. XVI+474 p. <https://doi.org/10.1017/9781108989817>
33. 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*. 2020. Vol. 4. P. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.11.008>
34. Симоненко Г. В. Жидкокристаллический модулятор на базе п-ячейки для ТГц-измерений // *Фотоника*. 2025. Т. 19, вып. 5. С. 19–24. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2025.19.5.378.388>

References

1. Zhou Le, Zhong T., Liu Yu., Yu T., Neyts K., Luo Zh., Wang H., Sun Ji., Zhou Ji, Shen Ya. When Structured Light Encounters Liquid. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, vol. 34, art. 2404614. <https://doi.org/10.1002/adfm.202404614>
2. Wang L., Wang Ya., Zong G., Hu W., Lu Ya. Liquid crystal based tunable terahertz metadevices. *J. of Materials*, 2025, vol. 11, no. 1, pp. 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2024.04.012>
3. 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>
4. Luomahaara J., Sipola H., Gronberg L., Mayra A., Aikio M., Timofeev A., Tappura K., Rautiainen A., Tamminen A., Vesterinen V., Leivo M., Gao F., Vasama H., Luukanen A., Hassel J. A passive, fully staring THz video camera based on kinetic inductance bolometer arrays. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, 2020, vol. 11, iss. 1, pp. 101–108. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2020.3029949>
5. Mu T., Ye Y., Dai Z., Zhao R., Yang M., Ren X. Silver nanoparticles-integrated terahertz metasurface for enhancing sensor sensitivity. *Optics Express*, 2022, vol. 30, iss. 23, pp. 41101–41109. <https://doi.org/10.1364/OE.472520>
6. 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>
7. Mittleman D. M. Twenty years of terahertz imaging. *Opt. Express*, 2018, vol. 26, iss. 8, pp. 9417–9431. <https://doi.org/10.1364/OE.26.009417>
8. Sun Q. S., He Y. Z., Liu K., Fan S. T., Parrott E. P. J., Pickwell-MacPherson E. Recent advances in terahertz technology for biomedical applications. *Quant. Imag. Med. Surg.*, 2017, vol. 7, no. 3, pp. 345–355. <https://doi.org/10.21037/qims.2017.06.02>
9. Alonso-del Pino M., Jung-Kubiak C., Reck T., Lombart N., Chattopadhyay G. Beam scanning of silicon lens antennas using integrated piezomotors at submillimeter wavelengths. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, 2019, vol. 9, iss. 1, pp. 47–54. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2018.2881930>



10. Yang Y., Gurbuz O. D., Rebeiz G. M. An eight-element 370–410-GHz phased-array transmitter in 45-nm CMOS SOI with PeakEIRP of 8–8.5 dBm. *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.*, 2016, vol. 64, iss. 12, pp. 4241–4249. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2016.2613850>
11. Niu T., Withayachumnankul W., Ung B. S. Y., Menekse H., Bhaskaran M., Sriram S., Fumeaux C. Experimental demonstration of reflectarray antennas at terahertz frequencies. *Opt. Express*, 2013, vol. 21, iss. 3, pp. 2875–2889. <https://doi.org/10.1364/OE.21.002875>
12. 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>
13. Oh-E M., Zheng D. Reversibly switching liquid crystals between three orthogonal orientation states for use in rapid-response THz phase shifters. *Opt. Express*, 2023, vol. 31, pp. 8632–8640. <https://doi.org/10.1364/OE.484171>
14. Ji Y., Jiang X., Fan F., Zhao H., Cheng J., Wang X., Chang S. Active terahertz beam deflection based on a phase gradient metasurface with liquid crystal-enhanced cavity mode conversion. *Opt. Express*, 2023, vol. 31, pp. 1269–1281. <https://doi.org/10.1364/OE.479856>
15. Belyaev V. Liquid-crystal based devices for terahertz radiation modulation. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: Science, Technology, Business], 2020, no. 5, pp. 96–98. <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2020.196.5.96.98> (in Russian).
16. Simonenko G. V., Mulamakhavsh A. F. A. Modulation of terahertz radiation using liquid crystal π -cells. *Applied Physics*, 2024, no. 3, pp. 13–19. <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2024-3-13-19> (in Russian).
17. He Z., Gou F., Chen R., Yin K., Zhan T., Wu S.-T. Liquid crystal beam steering devices: Principles, recent advances, and future developments. *Crystals*, 2019, vol. 9, iss. 6, pp. 292–300. <https://doi.org/10.3390/cryst9060292>
18. Simonenko G. V. *Komp'yuternoe modelirovaniye kharakteristik bystrodeistviyushchikh klassicheskikh modulyatorov na osnove zhidkikh kristallov* [Computer simulation of characteristics of high-speed classical modulators based on liquid crystals]. Saratov, Saratov State University Publ., 2018. 136 p. (in Russian).
19. 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>
20. Mulamakhavsh A. F. A., Simonenko G. V. Optical characteristics of liquid crystal cells in the terahertz range. *Problems of Optical Physics and Biophotonics. SFM-2024*. Simonenko G. V., Tuchin V. V., eds. Saratov, Izdatelstvo Saratovskiy Istochnik, 2024. Pp. 71–79. <https://doi.org/10.24412/cl-37275-2024-1-71-79> (in Russian).
21. Azzam R. M. A., Bashara N. M. *Ellipsometry and polarized light*. Amsterdam, North Holland, 1977. XVII+529 p.
22. Mulamahawsh Anfal Fadhil Ahmed, Simonenko G. V. Dependence of the electromagnetic radiation transmission coefficient of liquid crystal π -cells in the terahertz range. *J. of Optics and Photonics Research (online first)*, 2025. 6 p. Available at: <https://ojs.bonviewpress.com/index.php/JOPR/article/view/5210/1402> (accessed September 26, 2025). <https://doi.org/10.47852/bonviewJOPR52025210>
23. Chigrinov V. G., Simonenko G. V., Yakovlev D. A., Podjachev Yu. B. The optimization of LCD electrooptical behavior using MOUSE – LCD software. *Mol. Cryst. Liq. Cryst. Sc. Techn. Section A. Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2000, vol. 351, iss. 1, pp. 17–25. <https://doi.org/10.1080/10587250008023248>
24. Park H., Parrott E. P. J., Fan Fan, Lim M., Han H., Chigrinov V. G., Pickwell-MacPherson E. Evaluating liquid crystal properties for use in terahertz devices. *Opt. Express*, 2012, vol. 20, iss. 11, pp. 11899–11905. <https://doi.org/10.1364/OE.20.011899>
25. Li X., Tan N., Pivnenko M., Sibik J., Zeitler J. A., Chu D. High-birefringence nematic liquid crystal for broadband THz applications. *Liquid Crystal*, 2016, vol. 43, no. 7, pp. 955–962. <https://doi.org/10.1080/02678292.2016.1153732>
26. Kurchatkin S. P. *Poverkhnostnye yavleniya i struktura termotropnykh zhidkikh kristallov v kapillyarnykh ob'yemakh*. Dis. d-ra khim. nauk [Surface phenomena and structure of thermotropic liquid crystals in capillary volumes. Dr. Diss. (Chem.)]. Saratov, 2001. 290 p. (in Russian).
27. Sukharier A. S. *Zhidkokristallicheskie indicatory* [Liquid crystal indicators]. Moscow, Radio i svyaz', 1991. 256 p. (in Russian).
28. Born M., Wolf E. *Principles of optics: Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. 7th (expanded) edition. Cambridge, Cambridge University Press, 1999. 985 p.
29. Radivon A. V., Paukov M. I., Katyba G. M., Raginov N. I., Chernykh A. V., Ezersky A. S., Tsipalakova E. G., Rakov I. I., Arsenin A. V., Spektor I. E., Zaitsev K. I., Krasnikov D. V., Petrov N. V., Nasibulin A. G., Volkov V. A., Burdanova M. G. Spatial modulation of terahertz radiation using optical vortex generators based on thin films of single-walled carbon nanotubes. *Opt. and Spectr.*, 2025, vol. 133, iss. 3, pp. 303–307. <https://doi.org/10.61011/OS.2025.03.60248.15-25>
30. Smolyanskaya O. A., Chernomyrdin N. V., Konovko A. A., Zaytsev K. I., Ozheredov I. A., Cherkasova O. P., Nazarov M. M., Guillet J.-P., Kozlov S. A., Kistenev Yu. V., Coutaz J.-L., Mounaix P., Vaks V. L., Son J.-H., Cheon H., Wallace V. P., Feldman Yu., Popov I., Yaroslavsky A. N., Shkurinov A. P., Tuchin V. V. Terahertz biophotonics as a tool for studies of dielectric and spectral properties of biological tissues and liquids. *Progress in Quantum Electronics*, 2018, vol. 62, pp. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2018.10.001>
31. Gibin I. S., Kotlyar P. V. Terahertz radiation detectors. *Applied Physics*, 2018, vol. 6, no. 2, pp. 117–129. EDN: UOIVWF



32. Tong W., Zhu P., eds. *6G: The Next Horizon. From Connected People and Things to Connected Intelligence*. Cambridge, Cambridge University Press, 2021. XVI+474 p. <https://doi.org/10.1017/9781108989817>
33. 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. 243–252. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.11.008>
34. Simonenko G. V. Liquid Crystal Modulator Based on a π -Cell for THz Measurements. *Photonics*, 2025, vol. 19, iss. 5, pp. 19–24. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2025.19.5.378.388>

Поступила в редакцию 11.07.2025; одобрена после рецензирования 05.09.2025;
принята к публикации 10.09.2025; опубликована 28.11.2025

The article was submitted 11.07.2025; approved after reviewing 05.09.2025;
accepted for publication 10.09.2025; published 28.11.2025