

**РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА
НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ПОККЕЛЬСА****В. А. Матвеев^{1,2*}, А. Ю. Гришенцев¹, А. Г. Коробейников^{1,3}**¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия² НИИ телевидения, Санкт-Петербург, Россия

* Stellar13@gmail.com

³ Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова РАН, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Представлены результаты разработки и изготовления электрооптического модулятора на основе эффекта Поккельса, который наблюдается в нелинейных оптических средах с двойным лучепреломлением и заключается в линейном изменении показателя преломления необыкновенного луча в зависимости от напряженности внешнего электрического поля. На основании эффекта Поккельса и за счет интерференции обыкновенного и необыкновенного лучей появляется возможность управления прозрачностью нелинейной оптической среды. В качестве оптического нелинейного материала выбран ниобат лития LiNbO_3 . Рассматриваются этапы отработки технологического процесса изготовления оптического модулятора, включая математическое моделирование, изготовления изделий из нелинейных кристаллов ниобата лития. Произведена систематизация математической модели эффекта Поккельса на примере одноосных кристаллов. Результаты моделирования применены для проектирования электрооптических модуляторов. Изложен технологический процесс распиловки, шлифовки и полировки кристалла ниобата лития, предложен метод шлифовки кристалла порошком различных фракций оксида алюминия. Корпус электрооптического модулятора изготовлен методом фотополимерной печати. Управление модуляцией осуществляется за счет внешнего электрического поля от изготовленного блока питания. Приведены результаты экспериментов по регистрации коноскопических изображений, визуальный анализ которых показал высокое качество кристалла ниобата лития и отсутствие внутренних дефектов. Исследования электрооптического модулятора показали достаточное высокое соответствие результатов эксперимента и приведенной в работе теоретической модели.

Ключевые слова: эффект Поккельса, ниобат лития, нелинейная оптика, электрооптический модулятор

Ссылка для цитирования. Матвеев В. А., Гришенцев А. Ю., Коробейников А. Г. Разработка и изготовление электрооптического модулятора на основе эффекта Поккельса // Изв. вузов. Приборостроение. 2025. Т. 68, № 3. С. 239–248. DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-3-239-248.

**DEVELOPMENT AND MANUFACTURING OF AN ELECTRO-OPTICAL MODULATOR
BASED ON THE POKKELS EFFECT****V. A. Matveev^{1,2*}, A. Yu. Grishentsev¹, A. G. Korobeynikov^{1,3}**¹ ITMO University, St. Petersburg, Russia² Research Institute of Television, St. Petersburg, Russia

* Stellar13@gmail.com

³ N. V. Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the RAS,
St. Petersburg Branch, St. Petersburg, Russia

Abstract. Presented are the results of development and production of an electro-optical modulator based on the Pockels effect, which is observed in nonlinear optical media with double refraction and consists in a linear change in

the refractive index of an extraordinary ray depending on the external electric field strength. Using the Pockels effect and the interference of ordinary and extraordinary rays, it becomes possible to control the transparency of a nonlinear optical medium. Lithium niobate LiNbO_3 is chosen as the optical nonlinear material. The stages of development of the technological process, production of the optical modulator, including mathematical modeling, manufacturing products from nonlinear lithium niobate crystals are considered. The mathematical model of the Pockels effect is systematized using uniaxial crystals as an example. The modeling results are used to design electro-optical modulators. The technological process of sawing, grinding and polishing a lithium niobate crystal is described, a method for grinding the crystal with powder of different fractions of aluminum oxide is proposed. The body of the electro-optical modulator is manufactured by photopolymer printing. Modulation control is performed by means of an external electric field from the manufactured power supply unit. The results of experiments on recording conoscopic images are presented, the visual analysis of which shows the high quality of the lithium niobate crystal and the absence of internal defects. The studies of the electro-optical modulator demonstrate a sufficiently high correspondence between the experimental results and the described theoretical model.

Keywords: Pockels effect, lithium niobate, nonlinear optics, electro-optical modulator

For citation: Matveev V. A., Grishentsev A. Yu., Korobeynikov A. G. Development and manufacturing of an electro-optical modulator based on the Pockels effect. *Journal of Instrument Engineering*. 2025. Vol. 68, N 3. P. 239–248 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-3-239-248.

Введение. Впервые термин *нелинейная оптика* появился в научной литературе в начале 60-х годов прошлого столетия [1]. Нелинейными оптическими эффектами называют эффекты, свойства и характер протекания которых зависят от интенсивности излучения. Основоположники развития и становления нелинейной оптики — Н. Г. Басов, Л. В. Келдыш, Р. Терхьюн, П. Франкен, Дж. Джордмейн, П. Мейкер и др. Значительный вклад в исследования, способствовавшие продвижению нелинейной оптики, был сделан С. И. Вавиловым и его научной группой. Влияние внешнего электрического поля на изменение показателя преломления двулучепреломляющих кристаллов было открыто в 1893 г. немецким физиком Фридрихом Поккельсом (1865–1913). Эффект Поккельса проявляется как линейное изменение показателя преломления оптической среды, зависящее от приложенного внешнего электрического поля.

Нелинейные оптические свойства материальной среды в зависимости от напряженности электрического поля оптического излучения описываются с помощью разложения тензора поляризации среды P_i , $i = 1, 2, 3$, в ряд по степеням тензора напряженности электрического компонента ϵ_k , $k = 1, 2, 3$, электромагнитного поля светового излучения. Используя правило Эйнштейна, запишем:

$$P_i = P_i^L + P_i^{\text{NL}} = (\alpha_{ik}\epsilon_k) + (\chi_{ikl}\epsilon_k\epsilon_l + \chi_{iklm}\epsilon_k\epsilon_l\epsilon_m + \dots), \quad (1)$$

где выражение в первых скобках правой части определяет компоненты тензора линейной поляризованности P_i^L , а выражение во вторых скобках — компоненты нелинейной поляризованности P_i^{NL} , которые, в свою очередь, складываются из квадратичной, кубической и т. д.; символами α и χ обозначены тензоры (соответствующих порядков) диэлектрической восприимчивости; индексы i, k, l, m обозначают пространственные координаты, по которым производится суммирование произведений тензорных компонентов вектора напряженности светового поля и диэлектрической восприимчивости.

В зависимости от значимости вклада слагаемых уравнения (1) в нелинейные оптические свойства различают квадратичную и кубическую нелинейность. Квадратичная нелинейность свойственна твердым кристаллам, таким как LiNbO_3 — ниобат лития; LiIO_3 — йодат лития; CsH_2AsO_4 (CDA) — дегидроарсенат цезия и др.

Следует различать нелинейную восприимчивость [2], связанную с собственным электрическим компонентом поля оптического излучения, и нелинейность, обусловленную внешним электрическим полем E_i , $i = 1, 2, 3$. Так, например, ниобат лития обладает квадратичной нелинейной восприимчивостью по (1), проявляющейся как способность синтезировать вторую гармонику (за счет „выпрямления“ оптического сигнала), и линейным электрооптическим эффектом Поккельса, проявляющимся как линейно зависимый от внешнего поля эффект двойного лучепреломления в оптических средах при наложении постоянного или переменного внешнего электрического поля.

Нелинейные оптические свойства вещества обеспечивают возможности управления оптическими сигналами, такие как модуляция, синтез разности и суммы частот принятого излучения, управление преломлением и поляризацией и др. Вместе с тем технология обработки оптических кристаллов является наукоемким и трудоемким процессом, требующим специального оборудования и значительных практических навыков, что определяет цены на соответствующие оптические компоненты.

Для экспериментальной деятельности лаборатории радиочастотной и оптической связи, развернутой на базе факультета безопасности информационных технологий Университета ИТМО (Санкт-Петербург), было принято решение об изготовлении модулятора электрооптического (МЭО) на основе эффекта Поккельса в сотрудничестве с компанией АО „НИИ телевидения“ (Санкт-Петербург). Для полного цикла изготовления МЭО (от необработанного кристалла к готовому изделию) необходимо решение следующих задач:

- определение ориентации оптических осей кристалла;
- математическое моделирование МЭО для определения и выбора его геометрических размеров и параметров электропитания;
- шлифование кристалла в соответствии с заданными размерами;
- полирование рабочих поверхностей кристалла и изготовление накладных или напыленные токопроводящих электродов;
- изготовление управляемого блока питания;
- корпусирование изделия;
- тестирование и апробация изделия.

Таким образом, формируется цель исследований — разработка и изготовление оптического модулятора на основе эффекта Поккельса.

Основы построения и принцип действия оптического модулятора. В качестве основы построения МЭО был выбран монокристаллический ниобат лития LiNbO_3 , номер в химической реферативной службе CAS: 12031-63-9. Ниобат лития — кристалл с неоднородной химической связью, относится к классу гетеродесмических кристаллических соединений и является достаточно распространенным электрооптическим материалом, не ядовит, хорошо обрабатывается. Ниобат лития обладает рядом специфических свойств [3, 4], в частности, является отрицательным одноосным сегнетоэлектрическим кристаллом, т. е. $n_o > n_e$, где n_o — обыкновенный (англ. ordinary) и n_e — необыкновенный (англ. extraordinary) показатели преломления. Класс симметрии ниобата лития — $3m$ по классификации К. Германа и Ш. В. Могена или C_{3v} по классификационной модели А. Шнефлиса. Ниобат лития обладает нелинейной (квадратичной) оптической поляризуемостью (1), способностью к инверсной заселенности, пьезоэлектрическими свойствами. Окно прозрачности ниобата лития — от 0,4 до 5,5 мкм, кристаллы ниобата лития используются в Nd:YAG-лазерах для генерации второй гармоники с длиной волны накачки 1064 нм. Кристаллы и монокристаллы ниобата лития выращивают методом Чохральского [5], что определяет ориентацию кристаллической решетки, в результате значительно упрощается задача определения оптических осей, которая в частном случае решается, например, методом коноскопии Малляра [6]. Монокристаллы ниобата лития характеризуются достаточно „рыхлой“ структурой катионной подрешетки, что допускает внедрение разнообразных ионов и несколько затрудняет выращивание монокристаллического ниобата лития [4,7].

Возможно изготовление МЭО на основе продольного и поперечного электрооптического эффекта, в зависимости от ориентации вектора напряженности внешнего электрического поля относительно направления распространения оптического сигнала. Ниобат лития чаще применяется для изготовления МЭО на основе поперечного эффекта, для реализации продольного эффекта Поккельса используют кристаллы KDP.

Обобщенная структурная схема МЭО на основе эффекта Поккельса изображена на рис. 1.

Принцип действия МЭО следующий: лазерное излучение от источника 1 поступает на поляризационный светоделитель 2, линейно поляризованное излучение, проходя через кристалл ниобата лития 4, попадает на второй поляризационный светоделитель 5, за которым расположен

фотоприемник 6. Поворот индикатрисы эллипсоида показателя преломления (далее — ИПП) осуществляется за счет приложенного к кристаллу напряжения с помощью электродов 3 из медной фольги. За счет измерения разности фазы, происходящей вследствие поворота ИПП, необыкновенного луча относительно фазы обыкновенного, кристалл в результате интерференции изменяет свою прозрачность. Таким образом, осуществляется модуляция оптического излучения.

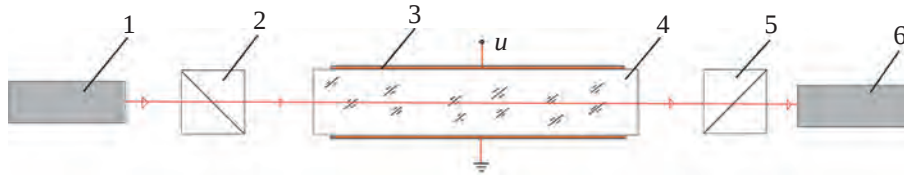


Рис. 1

Математическая модель МЭО. В одноосных кристаллах (к которым относится ниобат лития) уравнение ИПП имеет вид двусосного эллипсоида вращения:

$$\frac{x^2}{n_o^2} + \frac{y^2}{n_o^2} + \frac{z^2}{n_e^2} = 1, \quad (2)$$

где x, y, z — координаты по соответствующим ортогональным осям Ox, Oy, Oz , причем Oz совпадает с оптической осью кристалла.

Для ниобата лития на длине волны оптического излучения $\lambda = 535$ нм при отсутствии внешнего электрического поля $n_o = 2,29$ и $n_e = 2,20$ [8].

В случае приложенного внешнего электрического поля, характеризуемого тензором E_i , $i = 1, 2, 3$, по соответствующим координатам (x, y, z) , запишем выражение для расчета изменения коэффициента преломления:

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_k = r_{ki}E_i, \quad (3)$$

где r_{ki} — электрооптический тензор второго ранга.

Отметим, что преобразование изначально тензора третьего ранга r_{kji} электрооптической восприимчивости к тензору второго ранга r_{ki} возможно за счет симметрии тензора $r_{kji} = r_{jki}$ относительно перестановки пары первых индексов. Для ниобата лития в соответствии с понятием о симметрии классов [2, 9] определено четыре порождающих значения электрооптического тензора: $r_{33} = 30,8 \cdot 10^{-12}$ м/В; $r_{13} = 8,6 \cdot 10^{-12}$ м/В; $r_{22} = 3,4 \cdot 10^{-12}$ м/В; $r_{42} = 28,0 \cdot 10^{-12}$ м/В, и четыре вычисляемых: $r_{12} = -r_{22}$, $r_{61} = -2r_{22}$, $r_{23} = r_{13}$ и $r_{51} = r_{42}$. Остальные значения электрооптического тензора равны нулю.

Электрооптический тензор r_{ki} в матричном виде (r_{ki}) называют матрицей электрооптических коэффициентов, которая для ниобата лития при нормальной ориентации кристалла [8] имеет вид

$$(r_{ki}) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & r_{51} & r_{61} \\ r_{12} & r_{22} & 0 & r_{42} & 0 & 0 \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}^T. \quad (4)$$

Введем тензор первого ранга v_k для задания координат, который в матричном виде имеет форму $(v_k) = (x^2 \ y^2 \ z^2 \ yz \ xz \ xy)$, и тензор первого ранга E_i , $i = 1, 2, 3$, определяющий воздействие на кристалл ниобата лития внешнего электрического поля: $(E_i) = (E_1 \ E_2 \ E_3)$. Тензорное произведение $v_k r_{ki} E_i$ будет соответствовать правой части выражения (3). Учитывая (2), запишем в общем виде выражение для зависимости оптической индикатрисы от тензора E_i напряженности внешнего электрического поля:

$$\Phi(E_i) = \frac{x^2}{n_o^2} + \frac{y^2}{n_o^2} + \frac{z^2}{n_e^2} + v_k r_{ki} E_i = \left(\frac{1}{n_o^2} + r_{12} E_2 + r_{13} E_3 \right) x^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} + r_{22} E_2 + r_{23} E_3 \right) y^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} + r_{33} E_3 \right) z^2 + 2r_{42} E_2 yz + 2r_{51} E_1 xz + 2r_{61} E_1 xy = 1. \quad (5)$$

Уравнения (2) и (5) задают эллипсоиды ИПП в трехмерном пространстве в зависимости от напряженности внешнего поля E_i . Для произвольно выбранных значений тензора E_i , определяющего напряженность внешнего электрического поля, и нормали $(k_i) = (k_1 \ k_2 \ k_3)$ к фронту волны (в нелинейной среде направление нормали k_i в общем случае отличается от направления обыкновенного и необыкновенного лучей) показатели преломления будут определяться полуосями эллипса, полученного в результате сечения эллипсоида (5) плоскостью, определенной уравнением $k_1 x + k_2 y + k_3 z = 0$ заданной тензором нормали k_i и проходящей через начало координат. В общем случае определить большую полуось эллипса $n_{\max}$ (учитывая, что ниобат лития — отрицательный кристалл, $n_{\max} = n_o$) можно на основе решения функции максимизации:

$$\left. \begin{aligned} n_{\max} &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \rightarrow \max; \\ \Phi(E_i) &= 1; \\ k_1 x + k_2 y + k_3 z &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

а малую полуось эллипса $n_{\min} = n_e(E_i)$ — на основе решения функции минимизации:

$$\left. \begin{aligned} n_{\min} &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \rightarrow \min; \\ \Phi(E_i) &= 1; \\ k_1 x + k_2 y + k_3 z &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Полученные по (6), (7) значения показателей преломления позволяют вычислить длину L кристалла и длины сторон прямоугольного, или в частном случае квадратного, сечения кристалла, обеспечивающие заданную разность фаз φ для обыкновенной и необыкновенной волн,

с учетом напряженности внешнего поля E_i : $L = \frac{c\varphi}{\omega(n_{\max} - n_{\min})}$, где $\omega = 2\pi\nu$ — круговая частота оптического излучения, c — скорость света в вакууме; или, наоборот, — определить разность фаз обыкновенной и необыкновенной волн по заданным размерам и напряженности поля:

$$\varphi = \frac{L\omega(n_{\max} - n_{\min})}{c}.$$

Моделирование производилось в среде Wolfram Mathematica*. В качестве примера приведем построение эллипсоида $\Phi(E_i) = 1$ и эллипса ИПП (рис. 2) в кристалле ниобата лития: при $(k_i) = (0 \ 0 \ 1)$ и $(E_i) = (2 \cdot 10^5 \ 0 \ 0)$ и длине кристалла $L = 19,8939$ мм получаем фазовую пластину $\varphi = 180^\circ$, при $(E_i) = (0 \ 0 \ 0)$ и неизменных прочих параметрах получаем фазовую задержку $\varphi = 0^\circ 10' 58'' \approx 0$.

Изготовление и обработка кристаллов оптического модулятора. В качестве сырья для изготовления электрооптического модулятора на основе эффекта Поккельса были выбраны

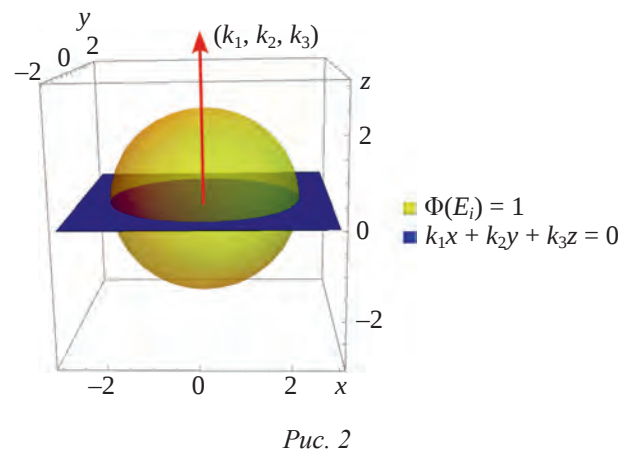


Рис. 2

* Wolfram Mathematica, <https://www.wolfram.com/>

обрезки кристалла ниобата лития, полученные в ходе распиловки материала на алмазно-отрезном станке К8611М алмазным кругом типа 1А1R $150 \times 0,8 \times 32 \times 5$ АС32 200/160 75% М2-01¹. После распиловки обрезки имели форму брусков с треугольным сечением (рис. 3, а), которые для дальнейшей обработки были подшлифованы по одной из сторон на станке ОС-320 микропорошком М40² карбида кремния 63С³ до достижения ровной поверхности. Образцы были промыты, высушены при комнатной температуре и затем нагреты до $\sim 60\text{--}80^\circ\text{C}$ для дальнейшей жесткой блокировки [10] с помощью воска на наклеечном приспособлении — стеклянной пластинке (рис. 3, б, в).

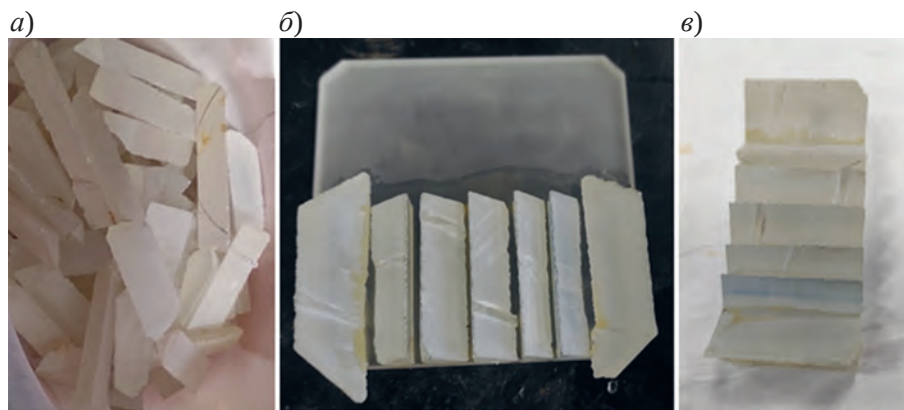


Рис. 3

После остывания от блока распиловкой алмазным кругом были отделены лишняя часть стеклянной пластины и нависающие концы заготовок для получения ровных торцевых поверхностей и приближения размеров заготовки к планируемым линейным (рис. 3, в). После распиловки торцы были подшлифованы абразивом 63С фракции М40 до получения равномерной матовой поверхности без заколов по краям⁴, соответствующей $R_a = 2,5$. Размер торцов заготовки на блоке был подогнан с соблюдением параллельности 0,03 мм и оставлен припуск 0,2 мм с каждой стороны для последующей обработки. Контроль размеров осуществлялся микрометром. Дальнейшая шлифовка торцов с каждой стороны производилась на латунном шлифовальнике, установленном в станок Д-150, абразивом белый электрокорунд марки 25А⁵ с контролем длины и параллельности сторон в несколько технологических переходов: М28 — 0,13 мм; М14 — 0,05 мм; М10 — 0,002 мм. После тонкой шлифовки блок надлежало отполировать, для чего были изготовлены два смоленных полировальника с использованием полировальной смолы ПС-6 и ПС-12⁶ для просветления и доводки чистоты⁷ поверхности. Для просветления заготовок применялся полирующий порошок на основе оксида церия CeO_2 крупностью 0,8–0,12 мкм, а для доводки был использован оксид алюминия Al_2O_3 крупностью 0,3 мкм. Фотографии кристаллов в процессе обработки представлены на рис. 4: а — процесс полирования оксидом церия на смоленном полировальнике; б — полированные заготовки; в — чистая поверхность после доводки.

¹ ГОСТ 32833-2014. Межгосударственный стандарт. Круги алмазные отрезные. Технические условия. М.: Стандартиформ, 2015.

² ГОСТ 3647-80. Материалы шлифовальные. Классификация. Зернистость и зерновой состав. М.: Изд-во стандартов, 1997.

³ ГОСТ 26327-84. Материалы шлифовальные из карбида кремния. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1994.

⁴ ОСТ 3-643-86. Заготовки оптических деталей. Припуски на обработку глубоким шлифованием и полированием. М.: Изд-во стандартов, 1994.

⁵ ГОСТ 28818-90. Материалы шлифовальные из электрокорунда. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1990.

⁶ РТМ 3-72-70. Смолы наклеечные и полировочные, применяемые при обработке оптических материалов. СПб: ГОИ им. С.И. Вавилова, 1971.

⁷ ГОСТ 11141-84. Детали оптические. Классы чистоты поверхностей. Методы контроля. М.: Изд-во стандартов, 1984.

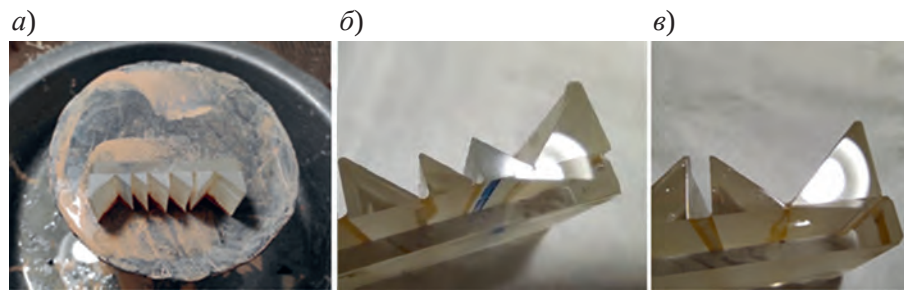


Рис. 4

По окончании процесса полирования торцы заготовок были защищены шеллаком, разведенным в спирте, и затем была произведена шлифовка острых углов заготовок, заблокированных на стеклянной пластине (рис. 5, а). После шлифовки была произведена разблокировка заготовок с последующей их блокировкой на другую сторону в целях повторения шлифовки оставшегося острого угла. Затем осуществлялась разблокировка, фасетирование и промывка. Фотография готового кристалла приведена на рис. 5, б).

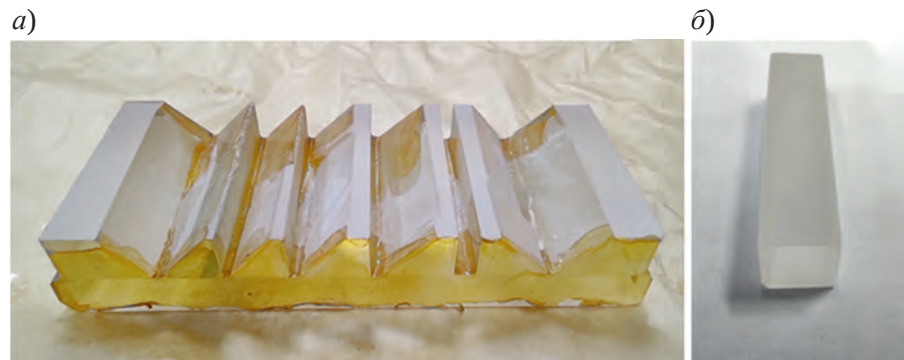


Рис. 5

Изготовление корпуса и блока питания. На рис. 6, а показан корпус МЭО, представляющий собой срез трехмерной модели; на рис. 6, б — корпус в сборе (без верхней крышки и матового стекла, используемого для получения коноскопических изображений). Корпус МЭО изготавливался на принтере AnyCubic Photon M5S методом фотополимерной печати по SLA-технологии (от англ. Stereolithography) из оптически непрозрачного диэлектрического фотополимера. Следует отметить, что фотополимерная печать обеспечивает высокую точность (например, для используемого принтера 19 мкм по оси Ox и 24 мкм по оси Oy), а сами фотополимеры являются хорошими диэлектриками, в отличие, например, от черных и цветных филаментов, используемых при FDM-печати (от англ. Fused Deposition Modeling), в которые добавляют электропроводящие красители, что значительно снижает диэлектрическую прочность и обуславливает существенные токи утечки при высоких напряжениях. Управляемый блок питания МЭО обеспечивает гармоническое переменное напряжение с возможностью внешней модуляции и с частотой от 700 Гц до 30 кГц при выходном напряжении с амплитудой $\pm 1,1$ кВ, гарантируя глубину модуляции порядка $\sim 98\%$. Собственная емкость изготовленного МЭО имеет значение порядка $12,9 \cdot 10^{-12}$ Ф, что при наличии высокоскоростного источника напряжения обеспечивает возможности для „разгона“ МЭО.

Модуляторы на основе нелинейных кристаллов, например на основе интерферометра Маха — Цендера, обеспечивают частоту модуляции до 10 ГГц, что достигается в основном за счет миниатюризации, которая в совокупности со снижением управляющего напряжения и емкости конденсатора, создающего управляющее поле, обеспечивает возможность гигагерцовой модуляции. Еще более высокочастотные, обеспечивающие модуляцию в терагерцовом диапазоне модуляторы на плазмонах [11] разрабатываются в настоящее время, например, в Институте науки и технологий (Россия, Сколково).

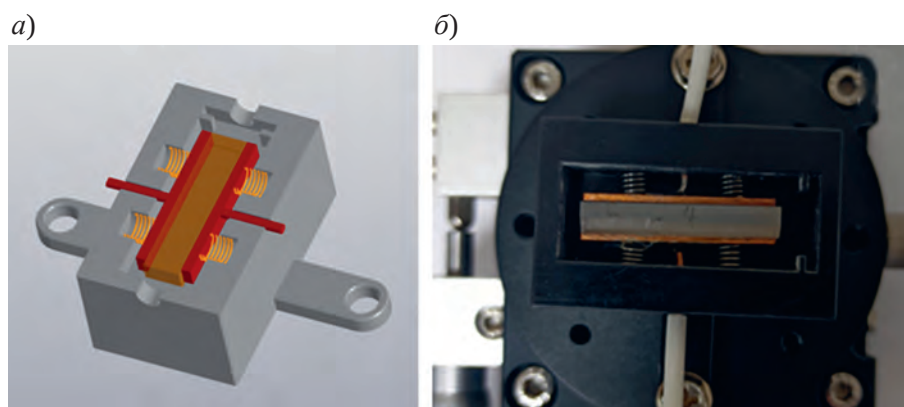


Рис. 6

В результате обработки заготовок было изготовлено несколько экземпляров кристаллов с различной ориентацией оптических граней относительно осей кристалла. Так, например, один из образцов, изготовленный с линейными размерами кристалла ниобата лития $6,00 \times 6,00 \times 26,00$ мм может работать в режиме затвора, т. е. фазовой пластины $\varphi = \pi$, обеспечивающей непрозрачность при напряженности внешнего электрического поля $(E_i) = (153,08 \ 0 \ 0)$ кВ/м и прозрачность при напряженности $(E_i) = (0 \ 0 \ 0)$ В/м.

Эксперименты. В процессе исследований был собран испытательный лабораторный стенд для разработанного МЭО. В ходе экспериментов был выполнен контроль качества кристалла ниобата лития за счет получения и визуального анализа коноскопических изображений. Общий вид лабораторной установки во включенном состоянии приведен на рис. 7, а, где 1 — МЭО, 2 — поляризатор, 3 — источник излучения (полупроводниковый лазер 532 нм), 4 — фотоприемник, 5 — управляемый генератором блок питания МЭО, 6 — поляризационный светоделительный куб (анализатор), 7 — осциллограф, 8 — экран. В ходе исследований коноскопических изображений изготовленных кристаллов дефектов не выявлено, пример коноскопического изображения при прохождении луча вдоль оси Ox приведен на рис. 7, б. Исследования зависимости фазы необыкновенной волны от напряжения показали, что напряжение $u = 920$ В позволяет получить разность фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами, равную π , что соответствует теоретическим оценкам (919,98 В), полученным на основе приведенной выше математической модели.

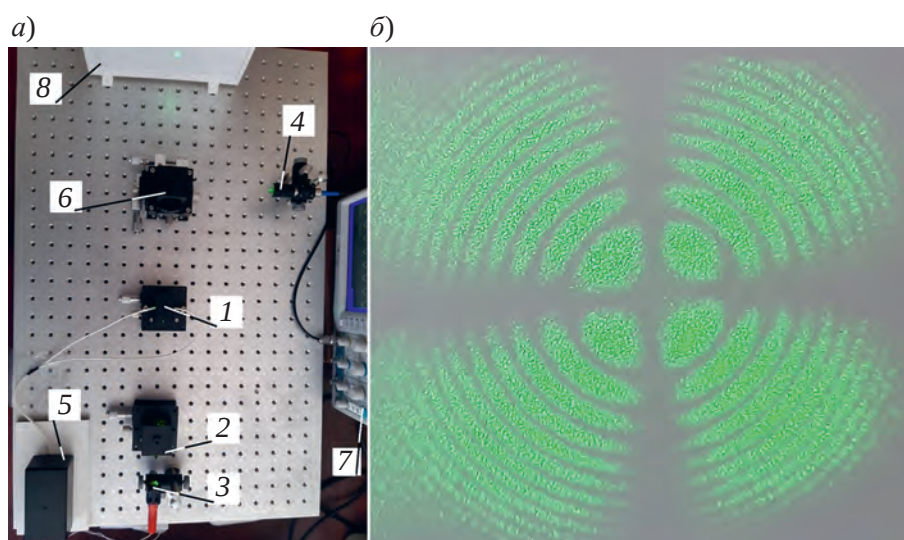


Рис. 7

Заключение. В ходе исследований разработан и изготовлен опытный образец электрооптического модулятора на основе эффекта Поккельса. Достаточно подробно изложены технологические этапы обработки кристалла ниобата лития и систематизирована в удобную для технологического применения электрооптическая модель одноосных нелинейных кристаллов. Визуальное исследование коноскопических изображений показывает достаточно высокое качество кристаллов. Разработанный электрооптический модулятор имеет собственную электрическую емкость $12,9 \cdot 10^{-12}$ Ф и обеспечивает работу в режиме затвора и модулятора. Использование разработанного высоковольтного блока питания позволяет производить модуляцию на частотах до 30 кГц. Полученные скорости работы модулятора и затвора вполне достаточны для лабораторных экспериментов и исследований свойств нелинейных кристаллов. Ниобат лития имеет частоту накачки 1064 нм и частоту второй гармоники 532 нм в видимом диапазоне, что удобно для лабораторных экспериментов и наблюдений.

По мнению авторов, ценность представленного практического исследования заключается в отработке технологического процесса, в том числе шлифовке ниобата лития порошком различных фракций оксида алюминия, систематизации математического аппарата, необходимого для проектирования ячейки Поккельса, а также в оснащении оптическим модулятором на основе эффекта Поккельса, в частности, лаборатории радиочастотной и оптической связи (действующей на базе факультета безопасности информационных технологий Университета ИТМО) для исследовательских и образовательных целей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бломберген Н. Нелинейная оптика. М.: Изд-во „Мир“, 1966. 424 с.
2. Дмитриев В. Г., Тарасов Л. В. Прикладная нелинейная оптика. М.: Физматлит, 2004. 512 с.
3. Гурзадян Г. Г., Дмитриев В. Г., Никогосян Д. Н. Нелинейно-оптические кристаллы. Свойства и применение в квантовой электронике. М.: Радио и Связь, 1991. 159 с.
4. Строганова Е. В. Исследование, синтез и выращивание оптических градиентно-активированных кристаллов на основе ниобата лития: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Краснодар, 2017. 279 с.
5. Черная Т. С., Волк Т. Р., Верин И. А., Симонов В. И. Пороговые концентрации в допированных цинком кристаллах ниобата лития и их структурная обусловленность // Кристаллография. 2008. Т. 53, № 4. С. 612–617.
6. Сидоров Н. В., Яничев А. А., Палатников М. Н., Габаин А. А., Пикуль О. Ю. Оптическая однородность, дефекты и фоторефрактивные свойства стехиометрического, конгруэнтного и легированных цинком кристаллов ниобата лития // Оптика и спектроскопия. 2014. Т. 117, № 1. С. 76–85.
7. Калинин В. Т., Сидоров Н. В., Палатников М. Н. Фундаментальные основы технологии высокосоввершенных монокристаллов ниобата и танталата лития: аналитический обзор. Апатиты: КНЦ РАН, 2005. 32–47 с.
8. Яриш А. Квантовая электроника и нелинейная оптика: Пер. с англ. М.: Сов. радио, 1973. 456 с.
9. Цернике Ф., Мидвинтер Дж. Прикладная нелинейная оптика. М.: Изд-во „Мир“, 1976. 263 с.
10. Окатов М. А., Антонов Э. А. и др. Справочник технолога-оптика. СПб: Политехника, 2004. 679 с.
11. Земцов Д. С., Земцова А. К., Смирнов А. С., Гарбузов К. Н., Стариков Р. С., Косолобов С. С., Драчёв В. П. Эффективные и простые в изготовлении интегральные плазмонные решетки для телекоммуникационного оптического диапазона // Компьютерная оптика. 2023. Т. 47, № 2. С. 224–229. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1168.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Владимир Александрович Матвеев** — студент; Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий; НИИ телевидения, начальник оптического цеха; E-mail: Stellar13@gmail.com
- Алексей Юрьевич Гришенцев** — д-р техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий; E-mail: AGrishentsev@yandex.ru
- Анатолий Григорьевич Коробейников** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН; зам. директора по науке; E-mail: Korobeynikov_A_G@mail.ru

Поступила в редакцию 26.07.24; одобрена после рецензирования 31.07.24; принята к публикации 28.01.25.

REFERENCES

1. Bloembergen N. *Nonlinear optics*, NY, W.A. Benjamin, 1965, 222 p.
2. Dmitriev V.G., Tarasov L.V. *Prikladnaya nelineynaya optika* (Applied Nonlinear Optics), Moscow, 2004, 512 p. (in Russ.)
3. Gurzadyan G.G., Dmitriev V.G., Nikogosyan D.N. *Nelineynno-opticheskiye kristally. Svoystva i primeneniye v kvantovoy elektronike* (Nonlinear Optical Crystals. Properties and Application in Quantum Electronics), Moscow, 1991, 159 p. (in Russ.)
4. Stroganova E.V. *Issledovaniye, sintez i vyrashchivaniye opticheskikh gradiyentno-aktivirovannykh kristallov na osnove niobata litiya* (Study, Synthesis and Growth of Optical Gradient-Activated Crystals Based on Lithium Niobate), Doctor's thesis, Krasnodar, 2017, 279 p. (in Russ.)
5. Chernaya T.S., Volk T.R., Verin I.A., Simonov V.I. *Crystallography Reports*, 2008, no. 4(53), pp. 573–578.
6. Sidorov N.V., Yanichev A.A., Palatnikov M.N., Gabain A.A., Pikoul O.Yu. *Optics and Spectroscopy*, 2014, no. 1(117), pp. 72–81.
7. Kalinnikov V.T., Sidorov N.V., Palatnikov M.N. *Fundamental'nyye osnovy tekhnologii vysokosovershennykh monokristallov niobata i tantalata litiya: analiticheskiy obzor* (Fundamental Principles of the Technology of Highly Perfected Lithium Niobate and Tantalate Single Crystals: an Analytical Review), Apatity, 2005, 32–47 p. (in Russ.)
8. Yariv A. *Quantum Electronics*, John Wiley & Sons, 1989.
9. Zernike F. and Midwinter J.E. *Applied Nonlinear Optics*, NY, 1973.
10. Okatov M.A. Antonov E.A., et al., *Spravochnik tekhnologa-optika* (Handbook of Optical Technologist), St. Petersburg, 2004, 679 p. (in Russ.)
11. Zemtsov D.S., Zemtsova A.K., Smirnov A.S., Garbuzov K.N., Starikov R.S., Kosolobov S.S., Drachev V.P. *Computer Optics*, 2023, no. 2(47), pp. 224–229, DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1168. (in Russ.)

DATA ON AUTHORS

- | | |
|--------------------------------|---|
| Vladimir A. Matveev | — Student; ITMO University, Faculty of Secure Information Technologies; JSC Research Institute of Television, Head of the Optical Workshop; E-mail: Stellar13@gmail.com |
| Alexey Yu. Grishentsev | — Dr. Sci., Associate Professor; ITMO University, Faculty of Secure Information Technologies; E-mail: AGrishentsev@yandex.ru |
| Anatoly G. Korobeynikov | — Dr. Sci., Professor; N. V. Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the RAS, St. Petersburg Branch, Deputy Director for Science; E-mail: Korobeynikov_A_G@mail.ru |

Received 26.07.24; approved after reviewing 31.07.24; accepted for publication 28.01.25.