

Оптический журнал

Фотоника, нанофотоника и радиофотоника
Photonics, nanophotonics and radio photonics

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-01-80-90

УДК 621.372.8

Подавление высших мод в интегрально-оптическом фазовом модуляторе на основе тонкопленочного ниобата лития

Михаил Владимирович Парфенов¹✉, Александр Викторович Тронев²,
Петр Михайлович Агрозов³, Игорь Владимирович Ильин⁴,
Андрей Владимирович Варламов⁵, Анна Александровна Усикова⁶,
Юрий Михайлович Задиранов⁷, Александр Валерьевич Шамрай⁸

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

¹mvparfenov@mail.ioffe.ru <https://orcid.org/0000-0003-3867-9007>

²a.tronev@mail.ioffe.ru <https://orcid.org/0000-0001-5417-6712>

³piotrag@mail.ioffe.ru <https://orcid.org/0000-0002-1248-7069>

⁴iiv@mail.ioffe.ru <https://orcid.org/0000-0001-7809-0630>

⁵wwa@mail.ioffe.ru <https://orcid.org/0000-0003-4083-8919>

⁶usikova@mail.ioffe.ru <https://orcid.org/0000-0003-2235-2229>

⁷zadiranov@mail.ioffe.ru <https://orcid.org/0000-0002-7394-9749>

⁸achamrai@mail.ioffe.ru <https://orcid.org/0000-0003-0292-8673>

Аннотация

Предмет исследования. Дифференциальное модовое затухание и фильтрация фундаментальной моды в канальных оптических волноводах, полученных травлением тонкой пленки ниобата лития на буферном слое диоксида кремния. **Цель работы.** Разработка метода подавления высших мод в многомодовых канальных волноводах на основе тонкопленочного ниобата лития и определение топологии высокоэффективного интегрально-оптического фазового модулятора на основе тонкопленочного ниобата лития, изготавливаемого с использованием контактной фотолитографии. **Метод.** Численное моделирование и экспериментальное исследование оптических и электрооптических характеристик интегрально-оптического модулятора. **Основные результаты.** Проанализировано влияние планарных электродов на дифференциальное затухание высших мод и определены условия квази-одномодового режима распространения оптического излучения в фазовом интегрально-оптическом модуляторе на основе канального волновода, изготовленного травлением тонкопленочного ниобата лития. Предложена топология интегрально-оптического фазового модулятора, для которой экспериментально продемонстрировано эффективное подавление высших мод и высокая эффективность электрооптической модуляции. Достигнутый параметр эффективности $U_{\pi}L \approx 4$ В см в 4 раза меньше, чем у коммерчески доступных интегрально-оптических фазовых модуляторов на основе объемного ниобата лития. **Практическая значимость.** Предложены подходы к решению задачи быстрого и недорогого производства интегрально-оптических модуляторов на основе тонкопленочного ниобата лития с использованием массово доступной стандартной контактной фотолитографии, имеющей значительные ограничения по разрешению и точности совмещения.

Ключевые слова: тонкопленочный ниобат лития, оптический волновод, моды оптических волноводов, интегральная оптика, электрооптический модулятор

Благодарность: работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект № 19-19-00511.

Ссылка для цитирования: Парфенов М.В., Тронев А.В., Агрузов П.М., Ильичев И.В., Варламов А.В., Усикова А.А., Задиранов Ю.М., Шамрай А.В. Подавление высших мод в интегрально-оптическом фазовом модуляторе на основе тонкопленочного ниобата лития // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 1. С. 80–90. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-01-80-90>

Коды OCIS: 130.2790, 130.3730, 130.3120

High-order modes suppression in an integrated optical thin-film lithium niobate phase modulator

MIKHAIL V. PARFENOV¹✉, ALEKSANDR V. TRONEV², PETR M. AGRUZOV³,
IGOR V. ILICHEV⁴, ANDREI V. VARLAMOV⁵, ANNA A. USIKOVA⁶,
YURII M. ZADIRANOV⁷, ALEKSANDR V. SHAMRAI⁸

Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

¹mvparfenov@mail.ioffe.ru <https://orcid.org/0000-0003-3867-9007>

²a.tronev@mail.ioffe.ru <https://orcid.org/0000-0001-5417-6712>

³piotrag@mail.ioffe.ru <https://orcid.org/0000-0002-1248-7069>

⁴jiv@mail.ioffe.ru <https://orcid.org/0000-0001-7809-0630>

⁵wwa@mail.ioffe.ru <https://orcid.org/0000-0003-4083-8919>

6usikova@mail.ioffe.ru <https://orcid.org/0000-0003-2235-2229>7zadiranov@mail.ioffe.ru <https://orcid.org/0000-0002-7394-9749>8achamrai@mail.ioffe.ru <https://orcid.org/0000-0003-0292-8673>

Abstract

Subjects of study are differential modal damping and filtering of fundamental mode in channel optical waveguides fabricated through etching of lithium niobate thin film on silicon dioxide buffer layer. **Aims of study** are development of a method for high-order modes suppression in multimode channel waveguides based on thin-film lithium niobate and determination of the topology of a highly efficient integrated optical phase modulator based on thin-film lithium niobate, fabricated using contact photolithography. **Method.** Numerical simulation and experimental investigation of optical and electro-optical properties of an integrated optical modulator. **Main results.** For an integrated optical phase modulator based on a channel waveguide produced by etching thin-film lithium niobate, the influence of planar electrodes on the differential damping of high-order modes is analyzed, and the conditions for the quasi-single-mode light propagation are determined. The topology of an integrated optical phase modulator is proposed, for which the effective suppression of high-order modes and the high efficiency of electro-optical modulation are experimentally demonstrated. The achieved parameter of modulation efficiency $U_{\pi}L \approx 4 \text{ V cm}$ is 4 times less than that of commercially available integrated optical phase modulators based on bulk lithium niobate. **Practical significance.** Approaches to solving the problem of fast and inexpensive production of integrated optical modulators based on thin-film lithium niobate using mass-available standard contact photolithography, which has significant limitations in resolution and alignment accuracy, are shown.

Keywords: thin-film lithium niobate, optical modulator, modes of optical waveguides, integrated optics, modulator

Acknowledgment: the research was funded by the Russian Science Foundation, grant № 19-19-00511.

For citation: Parfenov M.V., Tronev A.V., Agruzov P.M., Ilichev I.V., Varlamov A.V., Usikova A.A., Zadiranov Y.M., Shamrai A.V. High-order modes suppression in an integrated optical thin-film lithium niobate phase modulator [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 1. P. 80–90. [https://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-01-80-90](http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-01-80-90)

OCIS codes: 130.2790, 130.3730, 130.3120

ВВЕДЕНИЕ

Ниобат лития (LiNbO_3) является одним из наиболее распространенных материалов интегральной оптики [1]. Наличие свойств для эффективного управления оптическим излучением делает его удобным материалом подложки для изготовления модуляторов [1–3]. Первоначально развитие волноводной фотоники на подложке ниобата лития было связано с волноводами, изготовленными в его приповерхностном слое диффузионными методами [1, 3, 4], такими как термическая диффузия титана или низкотемпературный протонный обмен с последующим отжигом. Данными методами изготавливаются современные коммерчески доступные сверхширокополосные интегрально-оптические модуляторы, где в приповерхностном слое монокристаллической объемной подложки ниобата лития сформированы слабонаправляющие оптические волноводы с малым контрастом показателя преломления относительно показателей преломления подложки ниобата лития (порядка 10^{-3}) [4]. Малый контраст показателя преломления, характерный для таких волноводов, ограничивает возможности локализации оптического излучения и модулирующего электрического поля и в итоге определяет предельное значение полосы частот интегрально-оптических модуляторов на объемных подложках ниобата лития, которое у коммерчески доступных устройств составляет 40 ГГц.

Актуальным современным направлением, преодолевающим ограничения устройств на основе диффузионных волноводов в объемных подложках ниобата лития, является технология изготовления волноводных устройств на основе тонкопленочного ниобата лития [4], где благодаря гибридной структуре подложки с тонкой волноведущей монокристаллической пленкой ниобата лития и буферным разделяющим слоем на основе диоксида кремния (SiO_2) достигается на порядки более высокий контраст показателя преломления (порядка 1) [5].

В настоящее время уже продемонстрировано большое количество интегрально-оптических устройств на основе тонкопленочного ниобата лития, таких как электро-оптические модуляторы [6, 7], перестраиваемые колцевые резонаторы [8, 9], брэгговские решетки [10], параметрические усилители и преобразователи длины волны, лазеры [11–13], генера-

торы спутанных фотонов для квантовых систем связи [14] и другие устройства. Благодаря меньшим размерам и высокой числовой апертуре оптических волноводов большинство этих устройств имеют размеры и эффективность работы, не достижимые для стандартных интегрально-оптических устройств на основе диффузионных волноводов на подложках объемного ниобата лития.

В то же время высокий контраст показателя преломления обуславливает малые поперечные размеры волноводов (менее 1 мкм), обеспечивающих одномодовый режим распространения оптического излучения [15], и необходимость предельно высокого разрешения при формировании топологии волноводных структур на их основе. Поэтому при изготовлении интегрально-оптических устройств на основе тонкопленочного ниобата лития, как правило, используют высокоразрешающую электронно-лучевую литографию [6, 9].

Разрешение и точность контактной фотолитографии, обычно использующейся для массового производства интегральной оптики на объемном ниобате лития, позволяет формировать на основе тонкопленочного ниобата лития лишь многомодовые волноводы [15]. Целью данной работы являлись разработка метода подавления высших мод в многомодовых канальных волноводах на основе тонкопленочного ниобата лития и определение топологии высокоэффективного интегрально-оптического фазового модулятора на основе тонкопленочного ниобата лития, изготавливаемого методами контактной фотолитографии.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТА ПО ВОЛНОВОДНОЙ СТРУКТУРЕ

Фазовый электрооптический модулятор в простейшей базовой топологии представляет собой прямой волновод, получаемый травлением тонкой кристаллической пленки ниобата лития, сформированной на диэлектрической подложке (например, объемного кристалла ниобата лития) с буферным слоем диоксида кремния. В работе рассматривался ниобат лития в кристаллографической ориентации X-резца. Для модуляции излучения вдоль травленого гребня сформированы планарные электроды (рис. 1). Приложение электрического поля к электродам вызывает

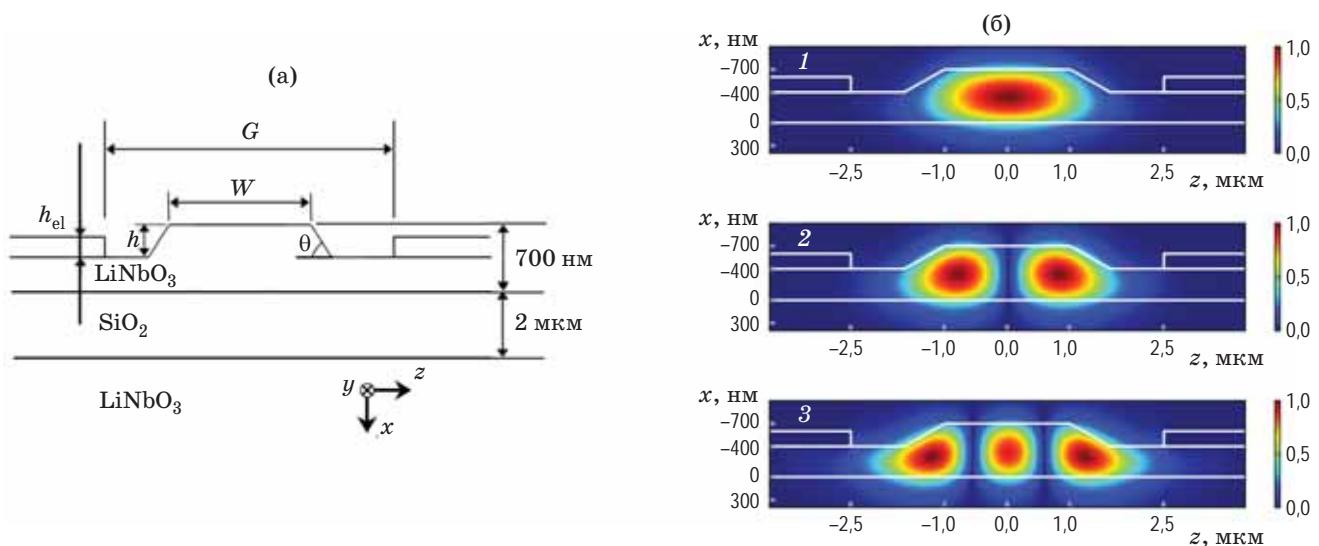


Рис. 1. Поперечное сечение структуры канального волновода с планарными электродами, образующими фазовый интегрально-оптический модулятор на основе тонкопленочного ниобата лития. Схема модулятора (пояснения в тексте) — (а), пространственное распределение нормированного абсолютного значения горизонтальной компоненты электрического поля мод в волноводе с шириной травленого гребня 2 мкм (1 — фундаментальная мода (TE_{00}), 2 — первая высшая мода (TE_{10}), 3 — вторая высшая мода (TE_{20})) — (б)

Fig. 1. Cross-section of a channel optical waveguide with planar electrodes forming integrated optical phase thin-film lithium niobate modulator. (a) Scheme of the modulator (explanations are in the text). (b) Spatial distribution of normed absolute value of horizontal electric field in a waveguide with width of etched ridge 2 μm , here, (1) fundamental mode (TE_{00}), (2) first high-order mode (TE_{10}), (3) second high-order mode (TE_{20})

в ниобате лития — электрооптическом материале волноводов — изменение показателя преломления, приводящее к модуляции фазы оптической волны, распространяющейся по волноводу. При сближении электродов и волновода повышаются погонные потери оптических мод волновода, вызванные поглощением в металле электродов. Поскольку различные моды имеют и различное пространственное распределение интенсивности, было предложено использовать этот факт для реализации фильтрации фундаментальной волноводной моды за счет дифференциального модового затухания и подавления высших мод.

Был проведен численный анализ конфигурации интегрально-оптического фазового модулятора на основе тонкопленочного ниобата лития, представленной на рис. 1а. При моделировании определялся модовый состав волновода модулятора, сформированного путем травления тонкопленочного ниобата лития, в зависимости от геометрических размеров волновода. Анализ проводился методом конечных элементов с использованием пакета COMSOL Multiphysics. Было рассмотрено вли-

яние ширины волноводного канала $W = 1,5$, 2 и 3 мкм. Его минимальная ширина 1,5 мкм близка к предельному значению для контактной фотолитографии, которое помимо оптического разрешения определяется площадью и однородностью засветки, а также толщиной, контрастностью и разрешающей способностью использующихся фоторезистов. Глубина травления тонкой пленки ниобата лития была выбрана $h = 300$ нм, угол наклона стенок $\theta = 25^\circ$, что соответствует литературным данным [16]. Анализ проводился при условии распространения оптического излучения на длине волны $\lambda = 1550$ нм, имеющего линейную горизонтальную поляризацию (квази TE волноводные моды). Данная поляризация обеспечивала в выбранной кристаллографической ориентации X-резца использование для модуляции наибольшего электрооптического коэффициента ($r_{33} = 33$ пм/В [17]). При численном моделировании двулучепреломляющий слой кристаллического ниобата лития был заменен изотропным материалом с показателем преломления, равным показателю преломления необыкновенного луча с $\lambda = 1550$ нм

в ниобате лития $n_e = 2,14$ [1]. Данное упрощение ранее эффективно использовалось авторами при моделировании волноводных явлений в интегрально-оптических устройствах на подложках ниобата лития [18, 19], оно применимо при слабом взаимодействии поляризационных мод, характерном для сильного двулучепреломления ниобата лития.

Планарные золотые электроды ($n = 1,5785 - 15,658i$ [20]) располагались симметрично с обеих сторон оптического волновода. Электроды имеют значительную толщину (в нашем анализе $h_{el} = 200$ нм), чтобы обеспечивать низкое активное сопротивление. Поскольку их толщина, как правило, значительно превосходит глубину проникновения оптического излучения в металл, она слабо влияет на распространение оптического излучения. Чего нельзя сказать о межэлектродном зазоре, а точнее о расстоянии от краев электродов до границы гребня травленого канального волновода. Проведенный анализ показал, что можно обеспечить эффективное подавление высших мод за счет сближения электродов модулятора к краям травленого волновода. Такую модовую фильтрацию качественно можно объяснить сильной пространственной локализацией фундаментальной моды под вытравленным гребнем и более слабой локализацией мод высших порядков (рис. 1б). В качестве количественной характеристики степени подавления высших мод нами была использована разность между погонными потерями ближайшей высшей моды (α_{h0}) и погонными потерями фундаментальной волноводной моды (α) — коэффициент подавления высших мод (ξ)

$$\xi = \alpha_{h0} - \alpha.$$

Результаты проведенного моделирования показали (рис. 2), что при приближении электродов к краям волновода можно обеспечить сильное подавление высших мод (более 80–90 дБ при длине электродов 1 см), однако при этом вносимые погонные потери фундаментальной моды тоже существенно растут. В таком случае значение межэлектродного зазора следует выбирать как компромиссное между суммарными потерями устройства и степенью подавления высших мод. В частности, при ширине межэлектродного зазора

$G = 5$ мкм, ширине гребня волновода 1,5 или 2 мкм и длине волновода в несколько сантиметров значение погонных потерь остается не больше потерь ввода-вывода при стыковке с оптическим волокном (около 10–30 дБ воложно-волокно [16]), характерных для интегрально-оптических устройств на основе тонкопленочного ниобата лития. Результаты расчетов для различных геометрических размеров гребня (глубины травления и ширины) также хорошо объясняются изменением локализации оптического излучения (размера модовых пятен), приводящим к изменению потерь при взаимодействии с электродами. Уменьшение геометрических размеров травленого гребня как по ширине, так и по высоте приводит к «выдавливанию» мод за его пределы в планарный остаточный слой тонкой пленки ниобата лития, к ослаблению локализации мод (тем большей, чем больше порядок моды) и,

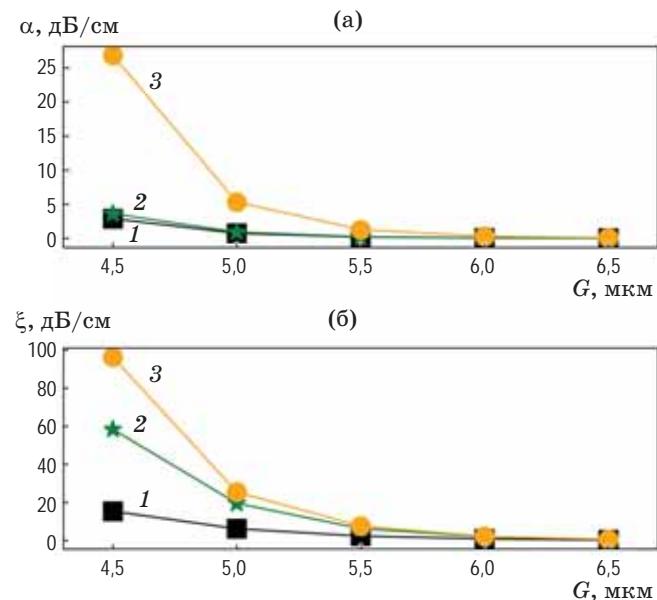


Рис. 2. Влияние ширины межэлектродного зазора на волноводные моды. Зависимости потерь фундаментальной моды (α) — (а) и зависимости коэффициента подавления высших мод (ξ) от ширины межэлектродного зазора (G) при ширинах травленого гребня волновода 1,5 (1), 2,0 (2), 3,0 (3) мкм — (б)

Fig. 2. Influence of interelectrode gap width on waveguide modes. (a) Dependences of losses of fundamental mode (α) and (b) dependences of high-order mode suppression coefficient (ξ) on interelectrode gap width (G) at widths of etched ridges (1) 1.5, (2) 2.0, (3) 3.0 μm

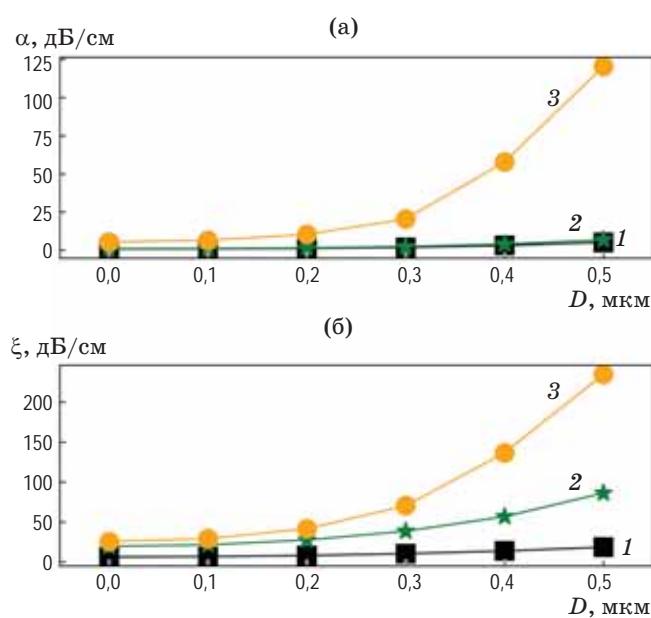


Рис. 3. Влияние погрешности совмещения волновода и центра межэлектродного зазора на подавление высших мод. Зависимости потерь фундаментальной моды (α) — (а) и зависимости коэффициента подавления высших мод (ξ) от сдвига центра волновода относительно центра межэлектродного зазора (D) при ширинах травленого гребня волновода 1,5 (1), 2,0 (2), 3,0 (3) мкм — (б)

Fig. 3. Effect of alignment error between the waveguide and the center of the interelectrode gap on high-order mode suppression. (a) Dependences of losses of fundamental mode (α) and (b) high-order mode suppression coefficient (ξ) on shift between center of waveguide and center of interelectrode gap (D) at widths of etched ridges (1) 1.5, (2) 2.0, (3) 3.0 μm

соответственно, к высоким дифференциальному модовым потерям.

Принимая во внимание ограничение разрешения и точности предполагаемой к использованию контактной фотолитографии, был проведен анализ влияния погрешностей совмещения топологии волновода и топологии планарных электродов, приводящих к нарушению поперечной симметрии в конфигурации фазового модулятора (смещению волновода относительно центра межэлектродного зазора). Анализ показал, что погрешности совмещения приводят к дополнительному росту дифференциального модового затухания, к росту коэффициента подавления высших мод и к усилинию наблюдаемого выделения фундаментальной моды (рис. 3).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ДЕМОНСТРАЦИЯ ФАЗОВОГО МОДУЛЯТОРА С МОДОВОЙ ФИЛЬТРАЦИЕЙ НА ПЛАНАРНЫХ ЭЛЕКТРОДАХ

На основе проведенного анализа была выбрана конфигурация для изготовления экспериментальных образцов фазовых интегрально-оптических модуляторов на основе тонкопленочного ниобата лития. Толщина слоя тонкой пленки ниобата лития, глубина ее травления, толщина золотых электродов были выбраны аналогичными использованным в расчете (700, 300 и 200 нм соответственно). Ширина межэлектродного зазора была выбрана как $G = 5$ мкм. Устройства были изготовлены на основе подложки тонкопленочного ниобата лития фирмы NanoLN. Гребни волноводов толщиной около 300 нм были сформированы плазменным травлением пленки ниобата лития через хромовую маску толщиной 150 нм. Длина изготовленных образцов составляла 18 мм при длине электродов 12 мм. Были проанализированы распределения интенсивности на выходных торцах волноводов при различных условиях ввода излучения. Схема использующейся экспериментальной установки приведена на рис. 4а. Ввод излучения в образец проводился с помощью трехкоординатной пьезоподвижки с линзованным волокном (диаметр перетяжки линзированного волокна — 2 мкм, рабочее расстояние — 12 мкм). Изменение условий ввода осуществлялось перемещением волокна в горизонтальном направлении (поперек волноводного канала, вдоль границы раздела между пленкой ниобата лития и буферным разделительным слоем диоксида кремния). Было выявлено, что распределение интенсивности в образцах без электродов при смещении входного волокна меняет вид: смещается положение максимума интенсивности (рис. 4б). В то же время в случае аналогичных образцов с планарными электродами характер распределения интенсивности не изменяется (рис. 4в). Таким образом, возможность подавления высших мод за счет узкого межэлектродного зазора была подтверждена.

Итоговая эффективность работы электрооптического модулятора как устройства во многом определяется степенью перекрытия электрического поля, создаваемого электродами модулятора, и полем моды волновода. Количественной характеристикой электрооптического взаимо-

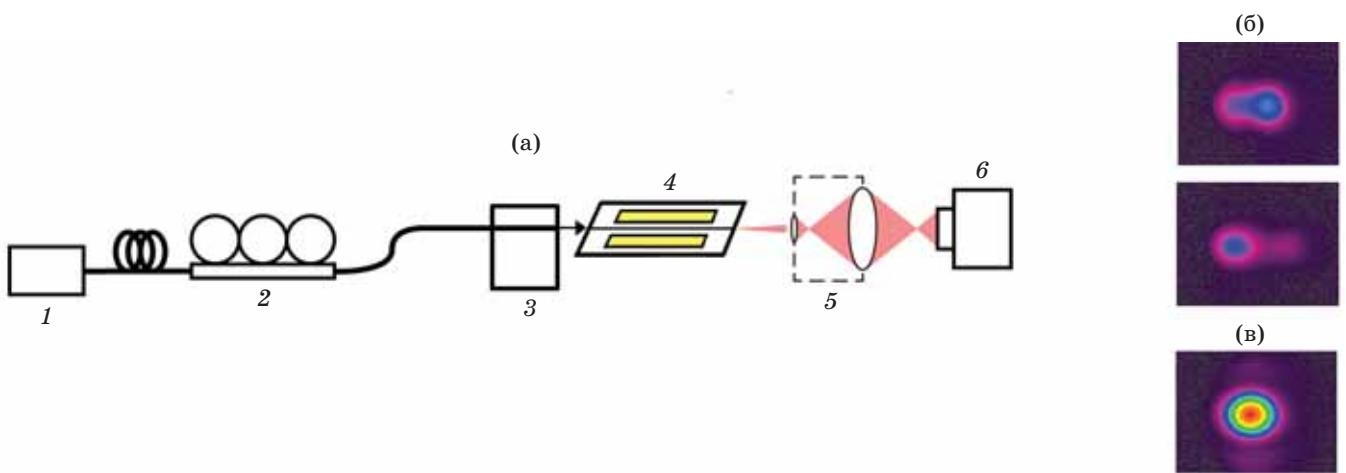


Рис. 4. Эксперимент по изучению влияния условий ввода излучения на пространственное распределение его интенсивности в поперечном сечении модовых пятен на выходном торце волноводов. Схема экспериментальной установки (1 — лазер, 2 — контроллер поляризации, 3 — пьезоподвижка, 4 — фазовый модулятор, 5 — объектив, 6 — инфракрасная камера). Примеры вариаций распределения интенсивности при смещении волокна на входе образцов волноводов без электродов (б) и с электродами (в)

Fig. 4. Experiment for investigation of influence of light input coupling on the spatial its intensity distribution of light on the waveguide output. (a) Experimental setup (1 is laser, 2 is polarization controller, 3 is piezostage, 4 is phase modulator, 5 is objective, 6 is infrared camera) and captured intensity distributions at different light input conditions for waveguides (б) without electrodes and (в) with electrodes

действия является произведение управляющего (полуволнового) напряжения модулятора и длины электродов [17, 21], которое вычисляется как

$$U_{\pi}L = \frac{\lambda}{n_e^3 r_{33} \Gamma},$$

где Γ — коэффициент, определяющий степень перекрытия оптического и электрического полей через интеграл перекрытия,

$$\Gamma = \frac{\iint E_{el} E_{opt}^2 dS}{\iint E_{opt}^2 dS}.$$

Здесь E_{el} и E_{opt} — распределения электрического и оптического полей в поперечном сечении волновода соответственно. Расчет распределения электрического поля проводился в программном пакете COMSOL Multiphysics при значениях диэлектрической проницаемости $\epsilon_x = 35$, $\epsilon_z = 95$, $\epsilon_{SiO_2} = 3,9$ [22]. Результаты расчета использованы для построения теоретических зависимостей параметра эффективности электрооптической модуляции травленых гребенчатых волноводов разной ширины от размера межэлектродного зазора (рис. 5).

Точки, представляющие результаты измерений параметра $U_{\pi}L$ экспериментальных образцов с межэлектродным зазором 5 мкм, хорошо ложатся на расчетные кривые.

Полуволновое напряжение уменьшается сужением межэлектродного зазора. В то же время при увеличении ширины травленого гребня полуволновое напряжение также уменьшается. Таким образом, чем эффективнее заполнение межэлектродного пространства гребнем волновода, тем эффективнее происходит модуляция.

Измерения полуволнового напряжения экспериментальных образцов фазовых модуляторов проводились в составе волноводного интерферометра Маха–Цендера (рис. 6), который был собран на основе волноводных компонентов с сохранением поляризации. В одно плечо интерферометра помещался исследуемый фазовый модулятор с контроллерами поляризации (поскольку для ввода и вывода излучения использовалось линзованное волокно без сохранения поляризации). В другое плечо был установлен регулируемый аттенюатор для повышения контраста интерференционной картины и эффективности интерферометрического преобразования фазовой

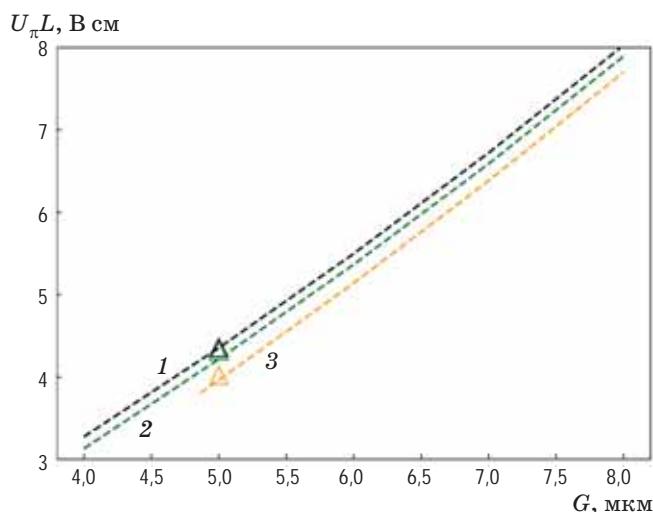


Рис. 5. Зависимости параметра эффективности электрооптической модуляции $U_{\pi}L$ от ширины межэлектродного зазора (G) при фиксированной толщине пленки ниобата лития 700 нм, глубине травления 300 нм и ширинах травленого гребня волновода 1,5(1), 2,0(2), 3,0(3) мкм. Пунктирными линиями обозначены результаты расчета, треугольниками — результаты эксперимента.

Fig. 5. Dependence of modulation efficiency parameter $U_{\pi}L$ on interelectrode gap width (G) at fixed lithium niobate film width of 700 nm, etching depth of 300 nm and widths of etched ridges (1) 1.5, (2) 2.0, (3) 3.0 μm . Dashed curves represent results of simulation, experimental results are marked with triangles

модуляции в модуляцию интенсивности. Для модуляции использовался синусоидальный сигнал на частоте 1 кГц с размахом амплитуды ± 5 В. Измеренное значение полуволнового напряжения составило примерно 3,35 В и при длине электродов 1,2 см дает значение параметра эффективности модуляции $U_{\pi}L \approx 4$ В см. Полученное значение сопоставимо с известными из литературы данными для модуляторов на основе одномодовых волноводов, изготовленных на подложках тонкопленочного ниобата лития [16].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты проведенного исследования показали правильность изначальных предположений о возможности подавления высших мод. При этом в работе был сделан акцент на использовании узкого межэлектродного зазора

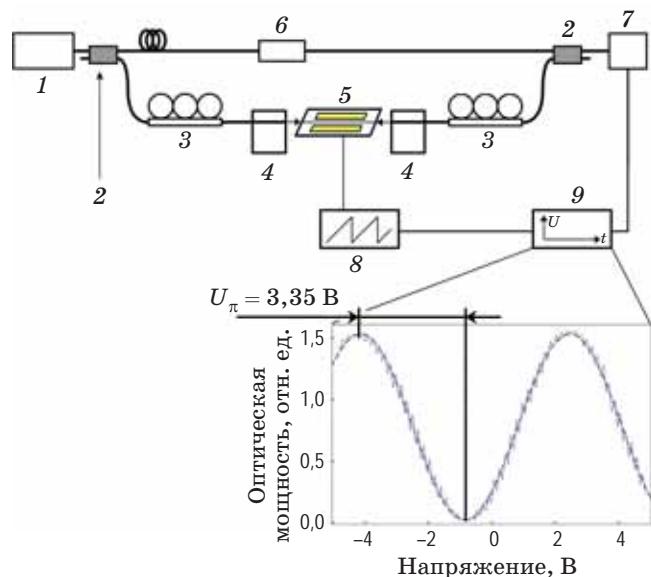


Рис. 6. Схема установки для измерения полуволнового напряжения на основе фазового демодулятора в виде волоконно-оптического интерферометра Маха–Цендера (1 — лазер, 2 — направленный ответвитель, 3 — контроллер поляризации, 4 — пьезоподвижки, 5 — фазовый модулятор, 6 — аттенюатор, 7 — фотодетектор, 8 — генератор сигналов, 9 — осциллограф). На вставке приведен пример передаточной характеристики экспериментального образца модулятора с длиной планарных электродов 12 мм

Fig. 6. Experimental setup for measuring half-voltage based on fiber-optic PM interferometer used as phase demodulator (1 is laser, 2 is directional coupler, 3 is polarization controller, 4 are piezostages, 5 is phase modulator, 6 is attenuator, 7 is photodetector, 8 is signal generator, 9 is oscilloscope). The inset shows an example of transmission curve for an experimental modulator sample with length of planar electrodes 12 mm

для воздействия на оптические моды волновода модулятора. Поэтому образцы для тестирования и экспериментальной проверки были изготовлены с электродами, предназначенные лишь для низкочастотной модуляции.

В сверхвысокочастотных (СВЧ) модуляторах используются электроды, представляющие собой копланарный волновод для СВЧ сигналов. При выборе ширины межэлектродного зазора для экспериментальных образцов модуляторов помимо прочего учитывалось, что она должна быть близка к ширине зазора

копланарных электродов СВЧ модуляторов, известных из литературных источников. Зазор в 5 мкм, выбранный в данной работе для экспериментального исследования, широко используется в СВЧ модуляторах на основе тонкопленочного ниобата лития [23].

Также важно отметить, что толщина электродов СВЧ модулятора больше, чем в рассматриваемом случае [16, 23]. Однако, как было выяснено в рамках отдельного проведенного расчета, толщина более 100 нм, необходимая для обеспечения низких оптических потерь, не влияет на подавление высших мод, поскольку существенно превышает глубину проникновения света в металл.

В свою очередь, характеристики СВЧ модулятора определяются не только шириной межэлектродного зазора, но и другими параметрами компланарного СВЧ волновода (толщиной металла электродов, шириной центрального электрода), не влияющими на подавление мод оптического волновода [23, 24].

В целом, при разработке СВЧ модуляторов важно обеспечить согласование СВЧ волновода модулятора с входным трактом по волновому сопротивлению, согласование скоростей распространения СВЧ волны и оптической волны в области их взаимодействия, минимизировать управляющее напряжение и потери СВЧ волновода модулятора. Эти вопросы сложно решить одновременно, так как улучшение одного параметра зачастую приводит к ухудшению других [23, 24], и выбор топологии является компромиссным решением по отношению к параметрам СВЧ модулятора. Детально вопросы разработки СВЧ модулятора в работе не рассматривались, поскольку выходят за рамки исследования.

Важно также добавить, что в работе рассмотрен и показан принцип воздействия на волноводные моды модулятора в общем, но при проектировании и изготовлении СВЧ модулятора в какой-то конкретной конфигурации или применении подхода в отношении других волноводных устройств, например кольцевых волноводных резонаторов, у которых распределение поля мод смешено в сторону от центра волновода [25], может требоваться дополнительная оптимизация волноводной топологии.

Также заслуживает внимания побочный эффект рассмотренного в работе метода, свя-

занный с повышением погонных потерь fundamentalной оптической моды. Он может считаться несущественным фактором и не будет ограничивать применимость метода лишь при условии высоких потерь настыковку волноводов с оптическим волокном. Их можно потенциально уменьшить при торцевом вводе оптического излучения через преобразователь мод, выполненный на чипе, или вводя излучение в волновод через дифракционную решетку. Однако изготовление дифракционной решетки требует высокой точности изготовления, которую стандартная фотолитография с низким разрешением, рассматриваемая в работе, не способна обеспечить. Изготовление же эффективного преобразователя мод на чипе с модулятором на основе тонкопленочного ниобата лития длястыковки образцов со стандартными одномодовыми волокнами представляет сложную задачу, так как зачастую требует многослойную топологию [1]. Даже успешные решения в этой области ориентированы настыковку не с обычным, а с линзованным оптическим волокном [1], которое больше подходит для тестирования чипов, но мало пригодно длястыковки в реальном оптоволоконном устройстве, так как в нем линза на конце волокна висит в воздухе и подвержена вибрациям, в отличие от случая обычнойстыковки, когда волокно приклено к торцу волновода и полностью зафиксировано.

Таким образом, при использовании стандартной фотолитографиистыковочные потери волноводов на основе тонкопленочного ниобата лития сложно существенно уменьшить, и при не слишком малых значениях межэлектродного зазора вносимые электродами оптические потери не ограничивают применимость метода подавления высших мод, рассмотренного в работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод обеспечения квази-одномодового режима распространения оптического излучения в интегрально-оптическом фазовом модуляторе на основе многомодового волновода и тонкопленочного ниобата лития за счет выбора ширины межэлектродного зазора. Экспериментально продемонстрировано подавление высших мод, а также работа

такого модулятора в составе волоконно-оптического интерферометра.

Полученные результаты показали возможность использования контактной фотолитографии, имеющей значительные ограничения

разрешающей способности и точности совмещения, для изготовления интегрально-оптических модуляторов на основе тонкопленочного ниобата лития.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Chen G., Li N., Ng J.D., et al. Advances in lithium niobate photonics: Development status and perspectives // Advanced Photonics. 2022. V. 4. № 3. P. 034003. <https://doi.org/10.1117/1.AP.4.3.034003>
- Wooten E.L., Kissa K.M., Yi-Yan A., et al. A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems // IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron. 2000. V. 6. № 1. P. 69–82. <https://doi.org/10.1109/2944.826874>
- Петров В.М., Агрузов П.М., Лебедев В.В., Ильиничев И.В., Шамрай А.В. Широкополосные интегрально-оптические модуляторы: достижения и перспективы развития // УФН. 2021. Т. 191. № 7. С. 760–780. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.11.038871>
Petrov V.M., Agruzov P.M., Lebedev V.V., Il'ichev I.V., Shamray A.V. Broadband integrated optical modulators: Achievements and prospects // Phys. Usp. 2021. V. 64. № 7. P. 722–739. <https://doi.org/10.3367/UFNe.2020.11.038871>
- Bazzan M., Sada C. Optical waveguides in lithium niobate: Recent developments and applications // Appl. Phys. Rev. 2015. V. 2. № 4. P. 040603. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4931601>
- Luke K., Kharel P., Reimer C., He L., Lončar M., Zhang M. Wafer-scale low-loss lithium niobate photonic integrated circuits // Opt. Exp. 2020. V. 28. P. 24452. <https://doi.org/10.1109/IPC47351.2020.9252499>
- Xu M., Cai X. Advances in integrated ultra-wideband electro-optic modulators [Invited] // Opt. Exp. 2022. V. 30. № 5. P. 7253. <https://doi.org/10.1364/OE.449022>
- Zhang M., Wang C., Kharel P., Zhu D., Lončar M. Integrated lithium niobate electro-optic modulators: When performance meets scalability // Optica. 2021. V. 8. № 5. P. 652. <http://dx.doi.org/10.1364/OPTICA.415762>
- Guarino A., Poberaj G., Rezzonico D., Degl'Innocenti R., Günter P. Electro-optically tunable micro-ring resonators in lithium niobate // Nat. Photonics. 2007. V. 1. № 7. P. 407. <http://dx.doi.org/10.1038/nphoton.2007.93>
- Krasnokutska I., Tambasco J.L., Peruzzo A. Tunable large free spectral range microring resonators in lithium niobate on insulator // Sci. Rep. 2019. V. 9. P. 11086. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47231-3>
- Escalé M.R., Pohl D., Sergeyev A., Grange R. Extreme electro-optic tuning of Bragg mirrors integrated in lithium niobate nanowaveguides // Opt. Lett. 2018. V. 43. № 7. P. 1515. <https://doi.org/10.1364/OL.43.001515>
- Lu J., Al Sayem A., Gong Zh., et al. Ultralow-threshold thin-film lithium niobate optical parametric oscillator // Optica. 2021. V. 8. P. 539. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.418984>
- Li T., Wu K., Cai M., et al. A single-frequency single-resonator laser on erbium-doped lithium niobate on insulator // APL Photonics. 2021. V. 6. P. 101301. <https://doi.org/10.1063/5.0061815>
- Luo R., He Y., Liang H., Li M., Lin Q. Highly tunable efficient second-harmonic generation in a lithium niobate nanophotonic waveguide // Optica. 2018. V. 5. P. 1006. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.5.001006>
- Zhao J., Ma C., Rüsing M., Mookherjea S. High quality entangled photon pair generation in periodically poled thin-film lithium niobate waveguides // Phys. Rev. Lett. 2020. V. 124. № 16. P. 163603. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.163603>
- Li Y., Lan T., Yang D., Wang Z. Re-analysis of single-mode conditions for thin-film lithium niobate rib waveguides // Results in Phys. 2021. V. 30. P. 104824. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rinp.2021.104824>
- Mercante A.J., Shi S., Yao P., Xie L., Weikle R.M., Prather D.W. Thin film lithium niobate electro-optic modulator with terahertz operating bandwidth // Opt. Exp. 2018. V. 26. P. 14810–14816. <http://dx.doi.org/10.1364/OE.26.014810>
- Kim C.M., Ramaswamy R.V. Overlap integral factors in integrated optic modulators and switches // J. Lightwave Technol. 1989. V. 7. № 7. P. 1063. <https://doi.org/10.1109/50.29633>
- Parfenov M., Tronev A., Ilichev I., Agruzov P., Shamrai A. Precise correction of integrated optical power splitters based on lithium niobate substrates by photorefractive effect local excitation // Appl. Phys. B. 2020. V. 126. № 5. P. 93. <https://doi.org/10.1007/s00340-020-07440-5>
- Parfenov M., Agruzov P., Ilichev I., Bozhko S., Shamrai A. Design of hybrid waveguide structures for high-efficiency integrated optical superconducting single photon detectors on Ti:LiNbO₃ waveguides // IEEE Photonics J. 2021. V. 13. № 6. P. 6600107. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2021.3120930>
- Johnson P.B., Christy R.W. Optical constants of the noble metals // Phys. Rev. B. 1972. V. 6. P. 4370. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.6.4370>
- Кузнецов И.В., Перин А.С. Математическое моделирование характеристик электрооптического модулятора в конфигурации интерферометра Маха–Цендера на основе тонких пленок ниобата лития // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 2. С. 68–77. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-02-68-77>
Kuznetsov I.V., Perin A.S. Mathematical modeling of the parameters of an electro-optic modulator in the Mach–Zehnder interferometer configuration based on thin lithium niobate films // Journal of Optical Technology. 2023. V. 90. № 2. P. 93–97. <https://doi.org/10.1364/JOT.90.000093>
- Salvestrini J.-P., Guilbert L., Fontana M., Abarkan M., Gille S. Analysis and control of DC drift in LiNbO₃-based Mach–Zehnder modulators // J. Lightwave Technol. 2011. V. 29. № 10. P. 1522. <https://doi.org/10.1109/JLT.2011.2136322>
- Zhu D., Shao L., Yu M., et al. Integrated photonics on thin-film lithium niobate // Adv. Opt. Photon. 2021. V. 13. P. 242–352. <https://doi.org/10.1364/AOP.411024>
- Li Y., Lan T., Yang D., Bao J., Xiang M., Yang F., Wang Z. High-performance Mach–Zehnder modu-

lator based on thin-film lithium niobate with low voltage-length product // ACS Omega. 2023. V. 8. № 10. P. 9644–9651. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00310>

25. Melloni A., Monguzzi P., Costa R., Martinelli M. Design of curved waveguides: The matched bend // JOSA A. 2003. V. 20. № 1. P. 130137. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.20.000130>

АВТОРЫ

Михаил Владимирович Парфенов — младший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, 194021, Россия; Scopus ID: 57191199632; <https://orcid.org/0000-0003-3867-9007>; mvparfenov@mail.ioffe.ru

Александр Викторович Тронев — кандидат технических наук, научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, 194021, Россия; Scopus ID: 56663299200; <https://orcid.org/0000-0001-5417-6712>; a.tronev@mail.ioffe.ru

Петр Михайлович Агрудов — научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, 194021, Россия; Scopus ID: 25925649400; <https://orcid.org/0000-0002-1248-7069>; piotrag@mail.ioffe.ru

Игорь Владимирович Ильичев — кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, 194021, Россия; Scopus ID: 12793059400; <https://orcid.org/0000-0001-7809-0630>; iiv@mail.ioffe.ru

Андрей Владимирович Варламов — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, 194021, Россия; Scopus ID: 57191197523; <https://orcid.org/0000-0003-4083-8919>; wwa@mail.ioffe.ru

Анна Александровна Усикова — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, 194021, Россия; Scopus ID: 8226796400; <https://orcid.org/0000-0003-2235-2229>; usikova@mail.ioffe.ru

Юрий Михайлович Задиранов — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, 194021, Россия; Scopus ID: 7801692016; <https://orcid.org/0000-0002-7394-9749>; zadiranov@mail.ioffe.ru

Александр Валерьевич Шамрай — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией квантовой электроники, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, 194021, Россия; Scopus ID: 6506395623; <https://orcid.org/0000-0003-0292-8673>; achamrai@mail.ioffe.ru

Статья поступила в редакцию 13.08.2023
Одобрена после рецензирования 27.10.2023
Принята к печати 24.11.2023

AUTHORS

Mikhail V. Parfenov — Junior Researcher, Ioffe Institute, St. Petersburg, 194021, Russia; Scopus ID: 57191199632; <https://orcid.org/0000-0003-3867-9007>; mvparfenov@mail.ioffe.ru

Aleksandr V. Tronev — PhD (Engineering), Researcher, Ioffe Institute, St. Petersburg, 194021, Russia; Scopus ID: 56663299200; <https://orcid.org/0000-0001-5417-6712>; a.tronev@mail.ioffe.ru

Petr M. Agruzov — Researcher, Ioffe Institute, St. Petersburg, 194021, Russia; Scopus ID: 25925649400; <https://orcid.org/0000-0002-1248-7069>; piotrag@mail.ioffe.ru

Igor V. Ilichev — PhD (Chemistry), Senior Researcher, Ioffe Institute, St. Petersburg, 194021, Russia; Scopus ID: 12793059400; <https://orcid.org/0000-0001-7809-0630>; iiv@mail.ioffe.ru

Andrei V. Varlamov — PhD (Physics and Mathematics), Researcher, Ioffe Institute, St. Petersburg, 194021, Russia; Scopus ID: 57191197523; <https://orcid.org/0000-0003-4083-8919>; wwa@mail.ioffe.ru

Anna A. Usikova — PhD (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Ioffe Institute, St. Petersburg, 194021, Russia; Scopus ID: 8226796400; <https://orcid.org/0000-0003-2235-2229>; usikova@mail.ioffe.ru

Yuri M. Zadiranov — PhD (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Ioffe Institute, St. Petersburg, 194021, Russia; Scopus ID: 7801692016; <https://orcid.org/0000-0002-7394-9749>; zadiranov@mail.ioffe.ru

Aleksandr V. Shamrai — Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Principal Researcher — Head of Laboratory of Quantum Electronics, Ioffe Institute, St. Petersburg, 194021, Russia; Scopus ID: 6506395623; <https://orcid.org/0000-0003-0292-8673>; achamrai@mail.ioffe.ru

*The article was submitted to the editorial office 13.08.2023
Approved after review 27.10.2023
Accepted for publication 24.11.2023*