

doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-3-357-365

УДК 535.241.13

Исследование влияния управляющего напряжения фазового модулятора на основе ниобата лития на величину паразитной амплитудной модуляции и распределение интенсивности оптического излучения на торцах канальных волноводов

Алена Викторовна Шулепова¹✉, Владимир Андреевич Шулепов²,
Владимир Евгеньевич Стригалева³

^{1,2,3} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ 79213040490@ya.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-6898-3400>

² shulepov_vladimir@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2168-8046>

³ vstrglv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7151-9235>

Аннотация

Введение. Известно, что при прохождении оптического излучения через фазовый модулятор многофункциональной интегрально-оптической схемы (МИОС) наряду с модуляцией фазы световой волны происходит изменение мощности оптического излучения на выходе состыкованного волновода. Такая модуляция является паразитной, а ее величина зависит от управляющего напряжения на электродах модулятора. Наличие амплитудной модуляции приводит к возникновению ошибки в выходном сигнале высокочувствительных фазовых датчиков, в частности, в волоконно-оптическом гироскопе. В данной работе представлено экспериментальное исследование изменения пространственного распределения интенсивности (модового поля) на торце канальных волноводов МИОС под действием приложенного напряжения. **Метод.** Экспериментальная установка включала источник излучения в виде одночастотного лазера RIO ORION с центральной длиной волны излучения 1550 нм. В качестве оптического приемника применена инфракрасная камера SP503U-1550 с регистрацией излучения в диапазоне длин волн 1440–1605 нм, размерами пиксела $9,9 \times 9,9$ мкм и матрицы 640×480 пикселей. МИОС была выполнена по технологии диффузии титана в подложку кристалла ниобата лития (Ti:LiNbO_3) X-среза. На электроды фазового модулятора МИОС подавалось постоянное управляющее напряжение в диапазоне от -10 В до $+10$ В. Распределение интенсивности оптического излучения в волноводах МИОС и в одномодовом оптическом волокне с эллиптической напрягающей оболочкой ESC-4 анализировалось путем расчета интеграла перекрытия. **Основные результаты.** Экспериментально показано воздействие электрического поля на оптическое излучение в волноводах МИОС. Продemonстрировано, что при постоянном напряжении на управляющих электродах фазового модулятора наблюдается изменение распределения интенсивности излучения на выходе канальных волноводов. Наблюдаемые изменения коррелируют с паразитной амплитудной модуляцией, возникновение которой связано с распространением паразитного оптического излучения по волноводу. Это явление обусловлено выходом оксида лития с поверхностного слоя LiNbO_3 в газовую фазу в ходе технологического процесса диффузии титана. **Обсуждение.** Проведенные исследования позволяют лучше понять механизмы возникновения паразитной амплитудной модуляции в фазовом модуляторе МИОС и разработать практические рекомендации по их устранению. Полученные результаты могут быть полезны специалистам, занимающимся исследованиями в области создания высокочувствительных фазовых датчиков на основе МИОС.

Ключевые слова

паразитная амплитудная модуляция, канальный волновод, модовое поле, фазовый модулятор, МИОС, ниобат лития

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSER-2024-0006).

Ссылка для цитирования: Шулепова А.В., Шулепов В.А., Стригалева В.Е. Исследование влияния управляющего напряжения фазового модулятора на основе ниобата лития на величину паразитной амплитудной модуляции и распределение интенсивности оптического излучения на торцах канальных волноводов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 3. С. 357–365. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-3-357-365

© Шулепова А.В., Шулепов В.А., Стригалева В.Е., 2024

Investigation of the effect of the applied voltage to the control electrodes of a lithium niobate phase modulator on the intensity distribution at the ends of channel waveguides and on parasitic amplitude modulation

Alena V. Shulepova¹✉, Vladimir A. Shulepov², Vladimir E. Strigalev³

^{1,2,3} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ 79213040490@ya.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-6898-3400>

² shulepov_vladimir@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2168-8046>

³ vstrglv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7151-9235>

Abstract

It is known that when optical radiation passes through the phase modulator of a multifunctional integrated-optical chip (MIOC), along with the modulation of the phase of the light wave, there is a change in the power of optical radiation at the output of the coupled waveguide. This modulation is parasitic, and its magnitude depends on the control voltage at the modulator electrodes. Amplitude modulation leads to an error in the output signal of highly sensitive phase sensors, in particular, in a fiber optic gyroscope. This paper presents an experimental study of the change in the spatial intensity distribution (mode field) at the end of channel waveguides of a multifunctional integrated-optical chip under the action of an applied voltage. The experimental setup was assembled with a radiation source in the form of a single-frequency laser RIO ORION with a central emission wavelength of 1550 nm. The optical receiver was an infrared camera SP503U-1550 with radiation registration in the wavelength range 1440–1605 nm, pixel size $9.9 \times 9.9 \mu\text{m}$ and matrix size 640×480 pixels. The multifunctional integrated-optical chip was fabricated by titanium diffusion technology in Ti:LiNbO_3 X-cut lithium niobate crystal substrate. A constant control voltage in the range from -10 V to $+10 \text{ V}$ was applied to the electrodes of the MIOC phase modulator. The distribution of optical radiation intensity in MIOC waveguides and in a single-mode optical fiber with an elliptical ESC-4 straining sheath was analyzed by calculating the overlap integral. The effect of electric field on optical radiation in MIOC waveguides is experimentally demonstrated. It is demonstrated that at constant voltage at the control electrodes of the phase modulator change in the radiation intensity distribution at the output of channel waveguides is observed. The observed changes correlate with parasitic amplitude modulation. The occurrence of parasitic amplitude modulation is due to the propagation of parasitic optical radiation along the waveguide. This phenomenon is caused by the escape of lithium oxide from the surface layer of lithium niobate into the gas phase during the technological process of titanium diffusion. The studies have allowed us to better understand the mechanisms of parasitic amplitude modulation in the phase modulator of MIOC and to develop practical recommendations for their elimination. These results can be useful for specialists working on research in the field of highly sensitive phase sensors using integrated optic circuits.

Keywords

residual amplitude modulation, channel waveguide, mode field, phase modulator, MIOC, lithium niobate

Acknowledgments

The research was carried out within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSER-2024-0006).

For citation: Shulepova A.V., Shulepov V.A., Strigalev V.E. Investigation of the effect of the applied voltage to the control electrodes of a lithium niobate phase modulator on the intensity distribution at the ends of channel waveguides and on parasitic amplitude modulation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 3, pp. 357–365 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-3-357-365

Введение

Электрооптические фазовые модуляторы широко используются в сфере инерционной навигации, в частности, в волоконно-оптическом интерферометрическом гироскопе. Современные электрооптические модуляторы часто применяются в составе многофункциональной интегрально-оптической схемы (МИОС), которая выполняет функции поляризатора, делителя оптической мощности и электрооптического модулятора [1, 2]. Как правило, основой для создания МИОС служит кристалл ниобата лития (LiNbO_3), который обладает высокими электрооптическими характеристиками, благодаря чему широко применяется в области интегральной фотоники [3]. Несмотря на ряд преимуществ использования LiNbO_3 , исследования показывают, что данный кристалл имеет паразитные эффекты, которые приводят к снижению точностных характеристик фазовых датчиков [4–6]. Паразитные фазовые и амплитудные искажения оптического сигнала в МИОС могут быть вызваны

различными эффектами, такими как обратный пьезоэлектрический, электрооптический, пироэлектрический и др. Паразитная амплитудная модуляция (ПАМ) является модуляцией интенсивности оптического излучения в волноводах фазового модулятора. В настоящее время механизм возникновения и методы подавления ПАМ активно исследуются [7–12]. Искажение оптического сигнала в МИОС накладывает ограничение на точностные характеристики интерферометрических датчиков, в частности на волоконно-оптический гироскоп [8].

В настоящей работе рассмотрены причины возникновения ПАМ в МИОС, волноводы которой выполнены по технологии диффузии титана (Ti) в подложку LiNbO_3 . Продемонстрирована экспериментальная зависимость интеграла перекрытия модовых полей оптического двулучепреломляющего волокна с эллиптической напрягающей оболочкой и канальных волноводов МИОС при подаче постоянного напряжения на управляющие электроды фазового модулятора в диапазоне от -10 В до $+10 \text{ В}$ с шагом 1 В , где на каждом значении

напряжения фиксировалось распределение интенсивности оптического излучения на торцах канальных волноводов. Также показана корреляция между интегралом перекрытия и ПАМ в зависимости от приложенного напряжения.

Основные причины, влияющие на возникновение и величину паразитной амплитудной модуляции

Как было отмечено в разделе «Введение», ПАМ вносит искажения в полезный сигнал, при прохождении оптического излучения через фазовый модулятор МИОС. К основным причинам, влияющим на величину ПАМ относят: потери в местах стыковки оптического волокна и канального волновода; отражение оптического излучения от нижней грани подложки LiNbO₃; неравномерное распределение электрического поля в сечении канального волновода МИОС, что является причиной неравномерного изменения показателя преломления в оптическом волноводе фазового модулятора [5, 6] и т. д.

На рис. 1 представлена схема исследуемого МИОС X-среза, в которой волновод, расположенный между электродами, попадает под действие электрического поля, прикладываемого вдоль кристаллографической Z-оси LiNbO₃ для достижения максимальной эффективности модуляции. Перекрытие между полем оптической моды волновода и полем электродов приводит к фазовой модуляции световой волны. Изменение показателя преломления, индуцированное внешним электрическим полем, определяется соотношением [3]:

$$\Delta n_{o,e} = -1/2(n_{o,e}^3 r_{ik} E),$$

где r_{ik} — электрооптический коэффициент, с учетом выбранной кристаллографической оси; E — напряженность электрического поля; $n_{o,e}$ — показатель преломления обыкновенного и необыкновенного лучей. Для длины волны $\lambda = 1550$ нм электрооптические коэффициенты [12] МИОС X-среза составляют $r_{33} = 30,9$ пм/В и $r_{13} = 9,6$ пм/В.

На ПАМ во многом влияют параметры стыковки подводящих оптических волокон. Апертуры оптического волокна и волноводов МИОС различны, поэтому при согласовании на стыковке двух световодов, происходят

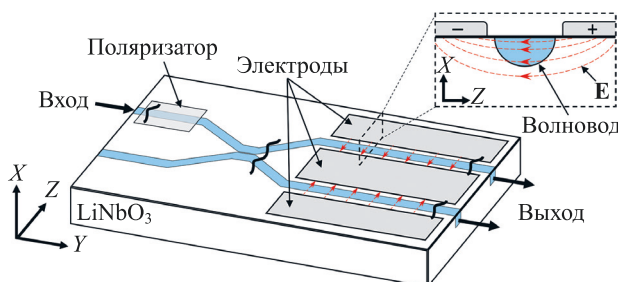


Рис. 1. Многофункциональная интегрально-оптическая схема. Красные стрелки определяют направление вектора напряженности электрического поля E

Fig. 1. Multifunctional integrated-optical chip. Red arrows show the direction of the vector electric field E

потери в виде попадания части излучения в подложку LiNbO₃. Также в местах соединения оптических волокон с канальными волноводами МИОС возникают обратные френелевские отражения из-за разных показателей преломления [1, 5, 10, 13]. Обратные отражения частично выводятся в подложку LiNbO₃, благодаря созданию сколов на торцах МИОС. Для дополнительного подавления ПАМ оптического излучения конструкция МИОС предусматривает разведение волноводов друг относительно друга на максимально возможное расстояние [1]. В научных работах по данной тематике основными методами борьбы с ПАМ является создание антиотражающих покрытий на нижней грани LiNbO₃ [14] и облучение ультрафиолетовым излучением приповерхностного слоя МИОС. Однако данные способы не показали эффективность в уменьшении величины ПАМ.

Эффект ПАМ является функцией мощности от последовательно прикладываемых напряжений к управляющим электродам фазового модулятора [3, 15]. Наличие периодичности в зависимостях ПАМ от приложенного напряжения указывает на интерференционный характер этого явления. Согласно имеющимся данным, можно сделать вывод, что имеет место интерференция основной моды канального волновода с волной, распространяющейся помимо основной моды. Это приводит к изменению модового поля на торце канального волновода и, соответственно, к изменению эффективности ввода света в волокно при изменении управляющего напряжения.

Для формирования на поверхности LiNbO₃ волноводов существуют два наиболее распространенных метода: диффузии Ti и протонного обмена. В данной работе рассмотрены образцы с волноводами, выполненными по технологии диффузии титана в подложку кристалла Ti:LiNbO₃. [1, 16, 17]. Существенным недостатком данного технологического процесса является наличие обратной диффузии, из-за чего происходит изменение профиля показателя преломления канальных волноводов за счет выхода атомов Li с поверхности кристалла LiNbO₃ в газовую фазу [17].

Таким образом, для выявления механизмов возникновения ПАМ и ее зависимости от управляющего напряжения был проведен ряд экспериментов: по регистрации распределений интенсивностей на торцах канальных волноводов МИОС при подаче постоянного напряжения на управляющие электроды фазового модулятора и одномодового оптического волокна с эллиптической напрягающей оболочкой ESC-4; регистрации значений ПАМ.

Описание экспериментальной установки

Для проведения исследования регистрации распределения интенсивности на торцах канальных волноводов МИОС была собрана схема, представленная на рис. 2. Излучение от источника проходит по волокну через волоконный поляризатор и вводится в «медленную» поляризационную ось волновода МИОС (порт А). Затем в разветвителе МИОС оптическое излучение делится в соотношении 50/50 и выводится из выход-

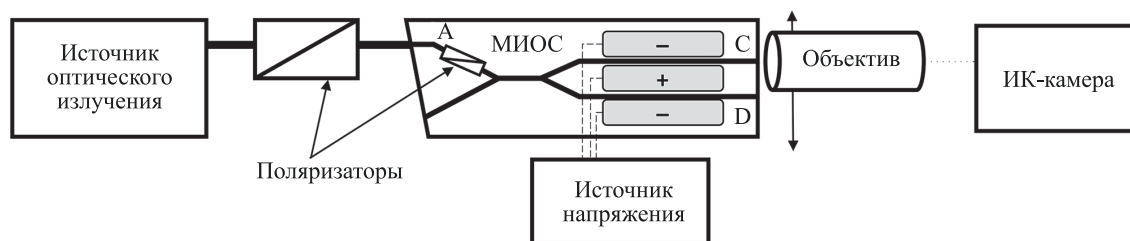


Рис. 2. Оптическая схема установки по регистрации распределения интенсивности на торцах канальных волноводов многофункциональной интегрально-оптической схемы (МИОС)

Fig. 2. Optical scheme for registering the intensity distribution at the end of the channel waveguides of the multifunctional integrated-optical chip (MIOC)

ных портов С и D. Поочередно к выходным портам МИОС подводится микрообъектив, фокусирующий излучение на матрицу камеры инфракрасного диапазона (ИК-камеры). При этом управляющие электроды фазового модулятора МИОС соединены с источником напряжения. Торце МИОС со стороны входного порта имеет скос 10° для снижения отражений Френеля, а со стороны выходных портов полировка торца произведена перпендикулярно волноводам.

В настоящей работе в качестве источника излучения использован одночастотный лазер RIO ORION с центральной длиной волны в спектре излучения 1550 нм. Регистрировалось оптическое излучение ИК-камерой Ophir Spiricon SP503U-1550 с рабочим спектральным диапазоном 1440–1605 нм, размерами пиксела $9,9 \times 9,9$ мкм и матрицы 640×480 пикселей. К торцу МИОС подводился микрообъектив МИ $90 \times 1,25$ для фокусирования выходящего светового пучка на матрицу ИК-камеры и увеличения размера модового поля. Приемник излучения подключался к персональному компьютеру, и с помощью программного обеспечения BeamGage производилась регистрация распределения интенсивности на торцах канального волновода МИОС в режиме реального времени. МИОС жестко закреплялась на оптическом столе для стабилизации картины интенсивности на матрице ИК-камеры. С источника напряжения на управляющие электроды фазового модулятора МИОС подавалось постоянное напряжение в диапазоне от -10 В до $+10$ В с шагом 1 В, и регистрировался каждый момент изменения распределения интенсивности в канальных волноводах МИОС.

Окружающие источники света могут засвечивать матрицу ИК-камеры и уменьшать ее чувствительность к исследуемому оптическому полю. По этой причине

приемник излучения был помещен в затемненный короб, который ограничивал поток излучения от сторонних источников. Поскольку ИК-камера Ophir Spiricon SP503U-1550 является квази-инфракрасной, в которой используются люминофоры и другие материалы для преобразования длины волны, то, чтобы скорректировать нелинейный отклик каждого пиксела, устанавливался коэффициент гамма-коррекции на уровне 1,87.

Как правило, в оптических схемах входные и выходные порты МИОС стыкуют с волокнами с сохранением поляризации. Для интерпретации полученных результатов необходимо получить распределение интенсивности излучения на выходе одномодового волокна с сохранением поляризации типа с эллиптической напрягающей оболочкой (ESC-4) [18]. На рис. 2 МИОС заменена на исследуемое волокно. При условии, что фазы оптического излучения на торцах канального волновода МИОС и оптического волокна считаются постоянными, получим формулу для расчета интеграла перекрытия:

$$\Gamma = \frac{|\iint \sqrt{I_{wg}}(x, y) \sqrt{I_f}(x, y) dx dy|^2}{\iint |I_{wg}(x, y)| dx dy \iint |I_f(x, y)| dx dy},$$

где I_f — распределение интенсивности волноводной моды оптического волокна; I_{wg} — исследуемое распределение интенсивности волноводной моды канального волновода.

Затем рассчитаем интеграл перекрытия [16] между пространственным распределением интенсивности на выходах оптического волокна и канального волновода МИОС при подаче постоянного напряжения на управляющие электроды фазового модулятора МИОС.

В эксперименте по измерению ПАМ (рис. 3) излучение от источника поступало по оптическому во-

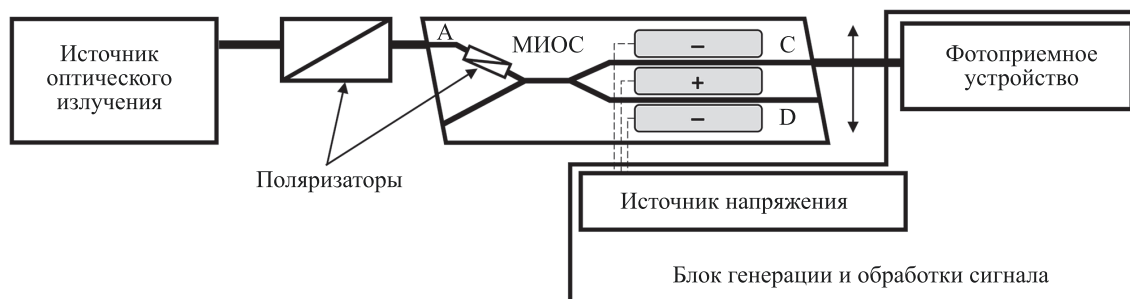


Рис. 3. Схема измерений паразитной амплитудной модуляции

Fig. 3. Scheme of parasitic amplitude modulation measurements

локну через волоконный поляризатор во входной порт волновода. Выходной порт МИОС был согласован со вторым отрезком оптического волокна, который, в свою очередь, был подключен к блоку генерации и обработки сигнала. На электроды МИОС подавался модулирующий сигнал также с данного блока (рис. 4). Входной А и выходной С порты, а затем порт D стыковались с одномодовым волокном. Юстировка проводилась по максимальному уровню оптической мощности и согласованию по поляризации, после чего волокна приклеивались к МИОС на клей ультрафиолетового отверждения. Далее были проведены измерения ПАМ.

Определение ПАМ заключается в измерении интенсивности оптического излучения на выходе МИОС при подаче на электроды исследуемого образца модуляции в диапазоне напряжений от -10 В до $+10$ В (рис. 4).

В результате измерения сигнал, полученный фотоприемным устройством, содержит интерференционные искажения, вызванные ПАМ. Коэффициент ПАМ ($K_{\text{ПАМ}}$) рассчитаем через отношение интенсивности оптического излучения на выходе волновода МИОС при приложении управляющего напряжения ($I(U_{+/-})$) к интенсивности МИОС в отсутствие управляющего напряжения ($I(U_0)$) [5, 6, 13, 14, 19]:

$$K_{\text{ПАМ}}(U) = \frac{I(U_{+/-})}{I(U_0)}.$$

Результаты и их обсуждение

В результате проведенной серии экспериментов были зарегистрированы картины пространственного распределения интенсивности на торцах канальных волноводов МИОС при подаче постоянного напряжения на управляющие электроды фазового модулятора (рис. 5). Рассчитана экспериментальная зависимость интеграла перекрытия для каждого из волноводов

МИОС. Продemonстрировано, что полученные экспериментальные данные коррелируют с измеренными значениями ПАМ.

Обнаружено, что при подаче как прямого, так и обратного напряжений на управляющие электроды МИОС происходит изменение формы модового поля, а наибольшее уширение наблюдается при ± 6 В и ± 5 В. На рис. 6, в качестве примера, показано, что при подаче постоянного напряжения к электродам фазового модулятора величиной $U = +5$ В в порту D МИОС регистрируется наибольшее увеличение интенсивности в центре модового поля. Однако в порту С МИОС, при подаче постоянного напряжения на центральный электрод величиной $U = +6$ В, регистрируется наибольшее уменьшение интенсивности в центре модового поля. Также было обнаружено, что расширение пучка преимущественно происходит в диагональном направлении. На рис. 7 показан характер расширения пучка при подаче напряжения на электроды МИОС. Изменение полярности прикладываемого напряжения смещает пучок в противоположные направления в соответствии с электрическим полем внутри кристалла. Уширение пучка сохраняется до тех пор, пока действует приложенное напряжение. При отключении подачи напряжения модовое пятно возвращается в исходное состояние.

На рис. 8, а, с показаны графики со значениями интеграла перекрытия. Видно, что изменение распределения модового поля в канальных волноводах МИОС также, как и ПАМ, зависит от величины приложенного напряжения на фазовом модуляторе. Из экспериментальных результатов следует, что рассчитанные интегралы перекрытия демонстрируют корреляцию с измеренными значениями ПАМ в каждом плече фазового модулятора МИОС.

Полученные результаты демонстрируют, что при подаче постоянного напряжения на управляющие электроды

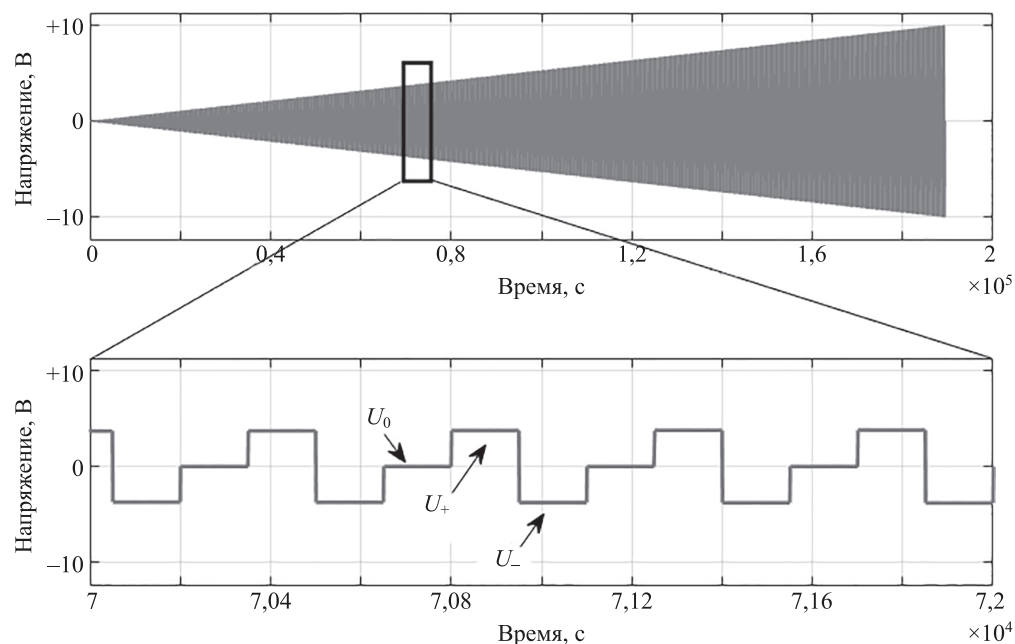


Рис. 4. Модулирующий сигнал, который подается на электроды многофункциональной интегрально-оптической схемы

Fig. 4. The modulating signal that is applied to the electrodes of a multifunctional integrated-optical chip

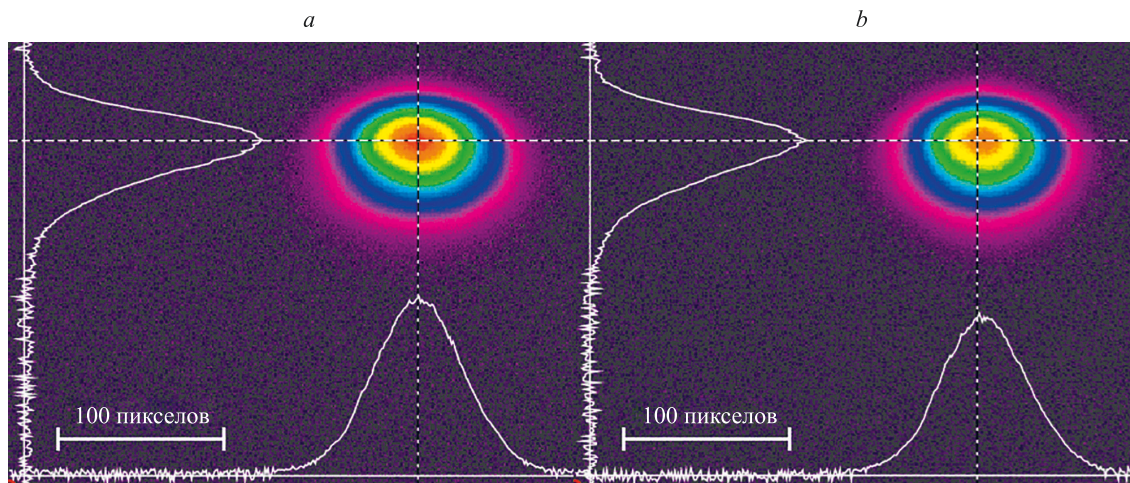


Рис. 5. Пространственное распределение интенсивности в профиле поперечного сечения волноводной моды без напряжения на электродах портов D (a) и C (b)

Fig. 5. Spatial intensity distribution in the cross-sectional profile of the waveguide mode without voltage at the electrodes: port D (a); port C (b)

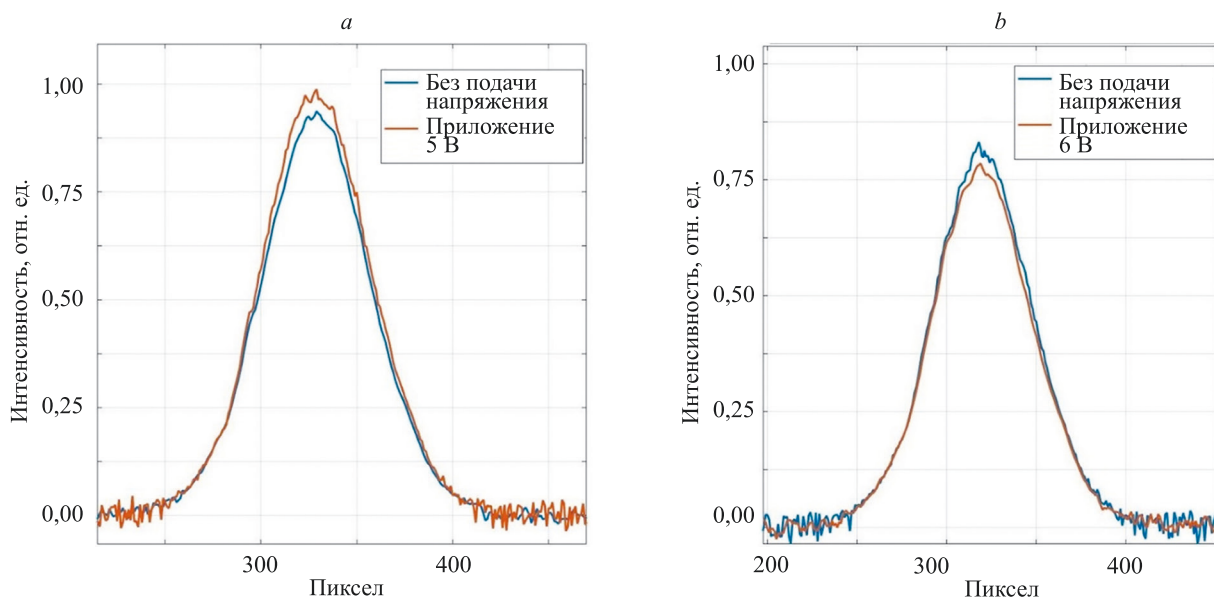


Рис. 6. Пространственное распределение интенсивности в профиле поперечного Z-сечения каналного волновода многофункциональной интегрально-оптической схемы при возбуждении волноводной моды в порту А и регистрации излучения, выходящего из портов D (a) и C (b)

Fig. 6. Spatial intensity distribution in the profile of the transverse Z-section of the channel waveguide of a multifunctional integrated-optical chip when a waveguide mode is excited and radiation coming out of ports D (a) and C (b) is registered

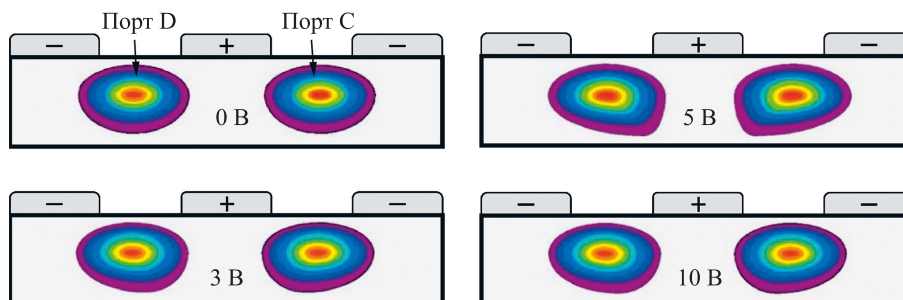


Рис. 7. Изменение формы модового поля волноводов многофункциональной интегрально-оптической схемы при различных номиналах напряжения на электродах

Fig. 7. The change in the shape of the mode field of the waveguides of a multifunctional integrated-optical chip at different voltage ratings on the electrodes

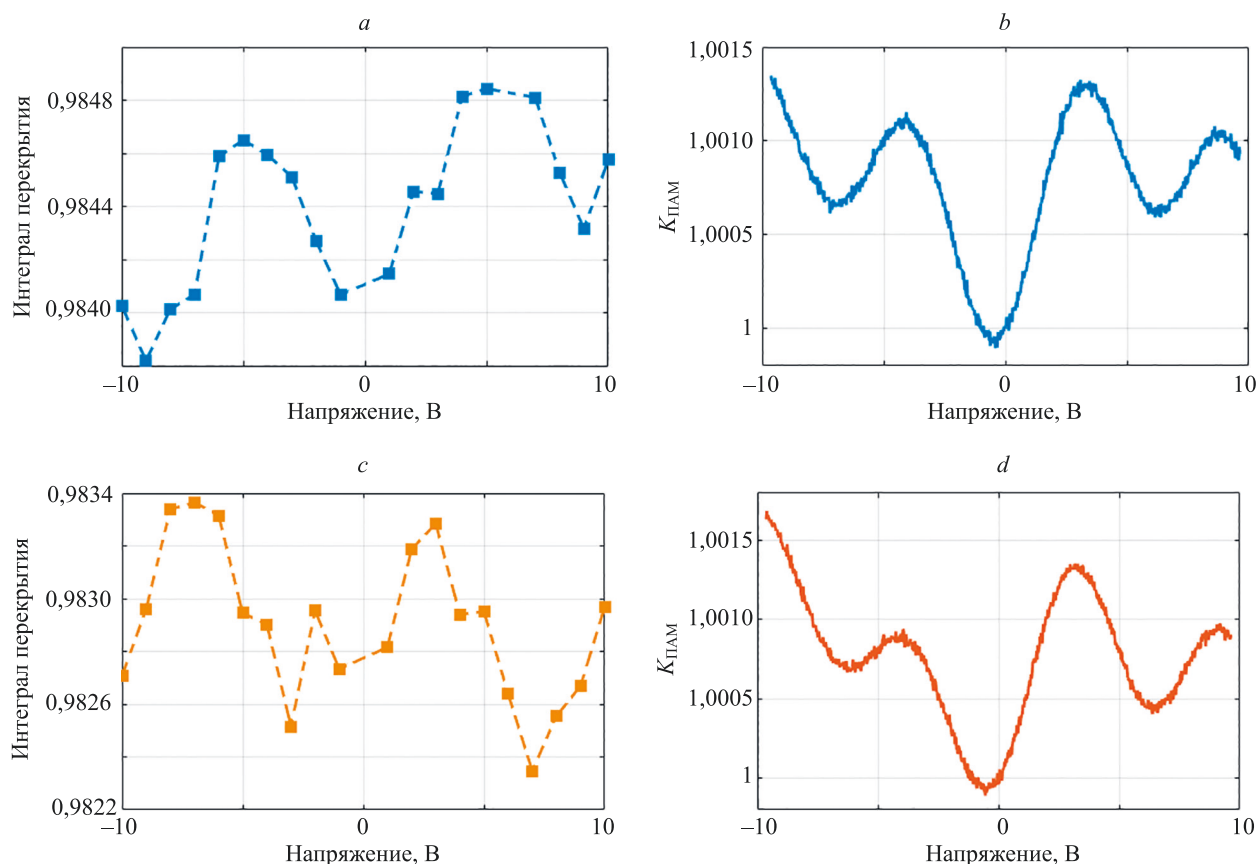


Рис. 8. Графики интеграла перекрытия (a, c) и паразитной амплитудной модуляции (b, d) для канального волновода многофункциональной интегрально-оптической схемы при возбуждении волноводной моды в порту А и регистрации излучения, выходящего из портов D (a, b) и C (c, d)

Fig. 8. Plots of the overlap integral (a, c) and parasitic amplitude modulation (b, d) for the MIOC channel waveguide at excitation of the waveguide mode in port A and registration of radiation coming out of ports D (a, b) and C (c, d) is detected

троды фазового модулятора МИОС изменяется эффективность связи канальный волновод — оптическое волокно. При этом наблюдается наличие периодичности при подаче напряжения обеих полярностей.

Обсуждение результатов

В работе получена экспериментальная зависимость интеграла перекрытия модовых полей оптического двулучепреломляющего волокна с эллиптической направляющей оболочкой и канальных волноводов МИОС при подаче постоянного напряжения на управляющие электроды фазового модулятора. Показано, что при изменении полярности приложенного напряжения происходит изменение распределения модового поля в обоих плечах фазового модулятора, что приводит к возникновению ПАМ. Полученные результаты отличаются от опубликованных данных, где амплитудные искажения наблюдались только при положительной полярности напряжения¹. Объясняется это тем, что при подаче положительного напряжения увеличивается коэффициент преломления в волноводном канале. При этом возбу-

ждается дополнительная мода канального волновода, имеющая отличный от основного эффективный показатель преломления. Это приводит к интерференции на торце канального и пристыкованного волоконного волноводов, что и наблюдается в работе², в виде зависимости ПАМ от величины приложенного напряжения. В то же время, при отрицательном напряжении величина ПАМ имеет существенно меньшую зависимость от приложенного напряжения с меньшим периодом по величине управляющего напряжения, который можно объяснить паразитным интерферометром Фабри–Перо.

В настоящей работе зависимости ПАМ от прикладываемого напряжения в двух полярностях одинаковые. Изучено предположение, что одним из дополнительных путей распространения оптического излучения по подложке является существующий планарный волновод, который возникает при использовании технологии диффузии титана за счет выхода оксида лития с поверхностного слоя LiNbO₃ в газовую фазу (обратная диффузия). Таким образом, уменьшение температуры во время диффузии Ti ведет к меньшему уходу оксида лития [17], что, в свою очередь, позволит снизить величину ПАМ.

¹ iXblue Photonics & Space / Residual Amplitude Modulation of optical phase modulator

² iXblue Photonics & Space / Residual Amplitude Modulation of optical phase modulator

Закключение

Проведенные исследования показали, что приложение постоянного напряжения к управляющим электродам фазового модулятора, входящего в состав многофункциональной интегрально-оптической схемы, вызывает уменьшение согласования между канальным волноводом и оптическим волокном. Наблюдаемый эффект обусловлен модуляцией интенсивности полезного и паразитного оптических излучений под воздействием электрического поля. Также было установлено, что зависимости паразитной амплитудной модуляции от прикладываемого напряжения одинаковы для обеих полярностей, а их вид говорит об интерференционном характере явления. Результаты исследования указывают на существование распространяющегося

излучения в планарном волноводе. Такой волновод образуется из-за обратной диффузии оксида лития при технологии изготовления канального волновода многофункциональной интегрально-оптической схемы. Для снижения величины амплитудных искажений необходимо внесение изменений в технологический процесс, а именно, уменьшение температуры диффузии титана до минимально возможной (около 1000 °C), для оптимального согласования оптических канального и волоконного волноводов и уменьшения паразитных оптических каналов. Проведенное исследование будет полезным для специалистов, занимающихся изучением эффекта паразитной амплитудной модуляции в высокочувствительных фазовых датчиках, использующих в своем составе многофункциональные интегрально-оптические схемы.

Литература

1. Lefèvre H.C. *The Fiber-Optic Gyroscope* / 2nd ed. London: Artech House, 2014. 416 p.
2. Noguchi K. Lithium niobate modulators // *Broadband Optical Modulators: Science, Technology, and Applications*. CRC Press, 2012. P. 151–172.
3. Mercante A. Design and fabrication of broadband thin-film lithium niobate phase modulators: dissertation Ph.D. University of Delaware, Newark, 2018. 120 p.
4. Аксарин С.М., Смирнова А.В., Шулёпов В.А., Парфенов П.С., Стригалева В.Е., Мешковский И.К. Исследование пьезоэлектрического спонтанного переключения доменов в межэлектродном зазоре фазового модулятора на основе титан-диффузионных волноводов в кристаллах ниобата лития // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2021. Т. 21. № 3. С. 361–373. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-3-361-373>
5. Погорелая Д.А. Исследование влияния фазовых и амплитудных искажений оптического сигнала в электрооптическом модуляторе на точностные характеристики волоконно-оптического гироскопа: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Университет ИТМО. СПб., 2019. 155 с.
6. Волковский С.А. Создание и исследование алгоритмических методов повышения точностных и эксплуатационных характеристик волоконно-оптического гироскопа: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Университет ИТМО. СПб., 2016. 147 с.
7. Sathian J., Jaatinen E. Polarization dependent photorefractive amplitude modulation production in MgO:LiNbO₃ phase modulators // *Proc. of the 2011 International Quantum Electronics Conference (IQEC) and Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) Pacific Rim incorporating the Australasian Conference on Optics, Lasers and Spectroscopy and the Australian Conference on Optical Fibre Technology*. 2011. P. 352–354. <https://doi.org/10.1109/iqec-cleo.2011.6193966>
8. Wang D., Sheng F. Residual intensity modulation of the phase modulator in IFOG and its measurement // *Guangdian Gongcheng/ Opto-Electronic Engineering*. 2007. V. 34. N 7. P. 26–29.
9. Liu J., Zhang C., Zhang Z., Gao F., Song J., Xu X. Modulation asymmetry suppression of multifunction integrated optic circuit by sinking electrode // *IEEE Access*. 2020. V. 8. P. 165529–165535. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3023057>
10. Sathian J., Jaatinen E. Intensity dependent residual amplitude modulation in electro-optic phase modulators // *Applied Optics*. 2012. V. 51. N 16. P. 3684–3691. <https://doi.org/10.1364/AO.51.003684>
11. Shi Y., Zhang B., Liu D., Jiao H., Wang X., Liu N., Feng L. Linewidth-related residual intensity modulation in lithium niobate phase modulators // *Applied Optics*. 2020. V. 59. N 15. P. 4739–4743. <https://doi.org/10.1364/AO.388681>
12. Pogorelaya D.A., Smolovik M.A., Strigalev V.E., Aleynik A.S., Deyneka I.G. An investigation of the influence of residual amplitude modulation in phase electro-optic modulator on the signal of fiber-

References

1. Lefèvre H.C. *The Fiber-Optic Gyroscope*. 2nd ed. London, Artech House, 2014, 416 p.
2. Noguchi K. Lithium niobate modulators. *Broadband Optical Modulators: Science, Technology, and Applications*, CRC Press, 2012, pp. 151–172.
3. Mercante A. *Design and fabrication of broadband thin-film lithium niobate phase modulators*. Dissertation Ph.D. University of Delaware, Newark, 2018, 120 p.
4. Aksarin S.M., Smirnova A.V., Shulepov V.A., Parfenov P.S., Strigalev V.E., Meshkovskiy I.K. The study of spontaneous domain nucleation in the interelectrode gap of phase modulator based on titanium indiffused waveguides in lithium niobate crystals. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 361–373. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-3-361-373>
5. Pogorelaia D.A. *Investigation of the influence of phase and amplitude distortions of the optical signal in an electro-optical modulator on the accuracy characteristics of a fiber-optic gyroscope*. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. St. Petersburg, ITMO University, 2019, 155 p. (in Russian)
6. Volkovskii S.A. *Creation and research of algorithmic methods for improving the accuracy and performance characteristics of a fiber-optic gyroscope*. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. St. Petersburg, ITMO University, 2016, 147 p. (in Russian)
7. Sathian J., Jaatinen E. Polarization dependent photorefractive amplitude modulation production in MgO:LiNbO₃ phase modulators. *Proc. of the 2011 International Quantum Electronics Conference (IQEC) and Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) Pacific Rim incorporating the Australasian Conference on Optics, Lasers and Spectroscopy and the Australian Conference on Optical Fibre Technology*, 2011, pp. 352–354. <https://doi.org/10.1109/iqec-cleo.2011.6193966>
8. Wang D., Sheng F. Residual intensity modulation of the phase modulator in IFOG and its measurement. *Guangdian Gongcheng/ Opto-Electronic Engineering*, 2007, vol. 34, no. 7, pp. 26–29.
9. Liu J., Zhang C., Zhang Z., Gao F., Song J., Xu X. Modulation asymmetry suppression of multifunction integrated optic circuit by sinking electrode. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 165529–165535. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3023057>
10. Sathian J., Jaatinen E. Intensity dependent residual amplitude modulation in electro-optic phase modulators. *Applied Optics*, 2012, vol. 51, no. 16, pp. 3684–3691. <https://doi.org/10.1364/AO.51.003684>
11. Shi Y., Zhang B., Liu D., Jiao H., Wang X., Liu N., Feng L. Linewidth-related residual intensity modulation in lithium niobate phase modulators. *Applied Optics*, 2020, vol. 59, no. 15, pp. 4739–4743. <https://doi.org/10.1364/AO.388681>
12. Pogorelaya D.A., Smolovik M.A., Strigalev V.E., Aleynik A.S., Deyneka I.G. An investigation of the influence of residual amplitude modulation in phase electro-optic modulator on the signal of fiber-optic gyroscope. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016,

- optic gyroscope // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. V. 735. P. 012040. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/735/1/012040>
13. Zhang C., Liu J., Zhang Z., Zheng Y., Xu X., Song J. Analysis of the influence of residual intensity modulation in the multifunction integrated optic circuit on fiber-optic gyroscopes performance // *IEEE Sensors Journal*. 2021. V. 21. N 21. P. 23903–23910. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3117656>
 14. Liu J., C. Zhang C., Zheng Y., Song J., Gao F., Yang D. Suppression of nonlinear residual intensity modulation in multifunction integrated optic circuit for fiber-optic gyroscopes // *Journal of Lightwave Technology*. 2020. V. 38. N 6. P. 1572–1579. <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.2968478>
 15. Karavaev P.M., Il'ichev I.V., Agruzov P.M., Tronev A.V., Shamray A.V. Polarization separation in titanium-diffused waveguides on lithium niobate substrates // *Technical Physics Letters*. 2016. V. 42. N 5. P. 513–516. <https://doi.org/10.1134/S1063785016050266>
 16. Петров В.М., Шамрай А.В. СВЧ интегрально-оптические модуляторы. Теория и практика: учебное пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2021. 225 с.
 17. Chen B.-U., Pastor A.C. Elimination of Li₂O out-diffusion waveguide in LiNbO₃ and LiTaO₃ // *Applied Physics Letters*. 1977. V. 30. N 11. P. 570–571. <https://doi.org/10.1063/1.89263>
 18. Аксарин С.М., Лавров В.С., Герасимова М.М. Температурная зависимость поляризационных преобразований при соединении анизотропных волоконных световодов // *Фундаментальные и прикладные научные исследования: сборник статей Международной научно-практической конференции [заочная конференция]*. Т. 2. 2015. С. 30–34.
 19. Zongfu H. Effects of Residual intensity modulation of Y-waveguide modulator on interferometric fiber optic gyroscope and elimination method // *Chinese Journal of Lasers*. 2008. V. 35. N 12. P. 1924–1929. (in Chinese). <https://doi.org/10.3788/cjl20083512.1924>
 - vol. 735, pp. 012040. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/735/1/012040>
 13. Zhang C., Liu J., Zhang Z., Zheng Y., Xu X., Song J. Analysis of the influence of residual intensity modulation in the multifunction integrated optic circuit on fiber-optic gyroscopes performance. *IEEE Sensors Journal*, 2021, vol. 21, no. 21, pp. 23903–23910. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3117656>
 14. Liu J., C. Zhang C., Zheng Y., Song J., Gao F., Yang D. Suppression of nonlinear residual intensity modulation in multifunction integrated optic circuit for fiber-optic gyroscopes. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, vol. 38, no. 6, pp. 1572–1579. <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.2968478>
 15. Karavaev P.M., Il'ichev I.V., Agruzov P.M., Tronev A.V., Shamray A.V. Polarization separation in titanium-diffused waveguides on lithium niobate substrates. *Technical Physics Letters*, 2016, vol. 42, no. 5, pp. 513–516. <https://doi.org/10.1134/S1063785016050266>
 16. Petrov V.M., Shamrai A.V. *Microwave integrated optical modulators*. St. Petersburg, 2021, 225 p. (in Russian)
 17. Chen B.-U., Pastor A.C. Elimination of Li₂O out-diffusion waveguide in LiNbO₃ and LiTaO₃. *Applied Physics Letters*, 1977, vol. 30, no. 11, pp. 570–571. <https://doi.org/10.1063/1.89263>
 18. Aksarin S.M., Lavrov V.S., Gerasimova M.M. Temperature dependence of polarization transformations when connecting anisotropic fiber light guides. *Fundamental and applied scientific research: collection of articles of the International Scientific and Practical Conference [virtual conference]*. V. 2, 2015, pp. 30–34. (in Russian)
 19. Zongfu H. Effects of Residual intensity modulation of Y-waveguide modulator on interferometric fiber optic gyroscope and elimination method. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, vol. 35, no. 12, pp. 1924–1929. (in Chinese). <https://doi.org/10.3788/cjl20083512.1924>

Авторы

Шулепова Алена Викторовна — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57226292609](https://orcid.org/0000-0001-6898-3400), <https://orcid.org/0000-0001-6898-3400>, 79213040490@ya.ru

Шулепов Владимир Андреевич — кандидат технических наук, начальник группы, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57191411190](https://orcid.org/0000-0003-2168-8046), <https://orcid.org/0000-0003-2168-8046>, shulepov_vladimir@mail.ru

Стригалева Владимир Евгеньевич — кандидат физико-математических наук, доцент, профессор, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 6603225596](https://orcid.org/0000-0002-7151-9235), <https://orcid.org/0000-0002-7151-9235>, vstrglv@mail.ru

Authors

Alena V. Shulepova — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57226292609](https://orcid.org/0000-0001-6898-3400), <https://orcid.org/0000-0001-6898-3400>, 79213040490@ya.ru

Vladimir A. Shulepov — PhD, Team Leader, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57191411190](https://orcid.org/0000-0003-2168-8046), <https://orcid.org/0000-0003-2168-8046>, shulepov_vladimir@mail.ru

Vladimir E. Strigalev — PhD (Physics & Mathematics), Assistant Professor, Professor, Senior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 6603225596](https://orcid.org/0000-0002-7151-9235), <https://orcid.org/0000-0002-7151-9235>, vstrglv@mail.ru

Статья поступила в редакцию 02.02.2024
Одобрена после рецензирования 22.04.2024
Принята к печати 27.05.2024

Received 02.02.2024
Approved after reviewing 22.04.2024
Accepted 27.05.2024



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»