

Оптический журнал

Оптическое приборостроение и метрология
Optical instrument making and metrology

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-12-111-117

УДК 53.097

Подавление паразитной амплитудной модуляции в титан-диффузных волноводах на кристалле ниобата лития путём модификации их топологии

Владимир Андреевич Шулепов¹✉, Алена Викторовна Смирнова²,
Вдовкин Максим Евгеньевич³, Игорь Владимирович Ильичёв⁴,
Владимир Евгеньевич Стригальев⁵

^{1, 2, 3, 4, 5}Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

⁴Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

¹shulepov_vladimir@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-2168-8046>

²279213040490@ya.ru <https://orcid.org/0000-0001-6898-3400>

³vdovkin_maksim@mail.ru <https://orcid.org/0009-0004-5596-4621>

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

⁵vstrglv@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-7151-9235>

Аннотация

Предмет исследования. Паразитная амплитудная модуляция в интегрально-оптических титан-диффузных волноводах на кристалле ниобата лития. **Цель работы.** Подавление паразитной амплитудной модуляции в волноводах на подложке ниобата лития при помощи модифицированной топологии. **Метод.** Модификация топологии волноводов заключается в формировании изгиба на входных и выходных участках, благодаря чему образуется угол между направлением излучения в области фазового модулятора и в области входного и выходного портов соответственно $3,47^\circ$ и $1,43^\circ$. Такие значения углов не превосходят угол расходности оптического излучения, определяемый числовой апертурой оптического волокна, однако, должна снизиться возможность прохождения оптического излучения из входного волокна в любое из выходных волокон через подложку интегрально-оптической схемы, минуя оптические волноводы.

Основные результаты. Получено, что увеличивается плотность значений паразитной амплитудной модуляции в коробчатой диаграмме при формировании изгиба волноводов на входных и выходных участках интегрально-оптической схемы. Таким образом межквартильное расстояние значений паразитной амплитудной модуляции уменьшилось почти в два раза с 0,077% до 0,043%, а также разница между максимальным и минимальным значениями уменьшилась почти в два раза с 0,161% до 0,095%. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть использованы для повышения характеристик волоконно-оптических гироскопов и других устройств, имеющих в оптической схеме многофункциональную интегрально-оптическую схему на основе Ti:LiNbO₃.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп, интегрально-оптическая схема, паразитная амплитудная модуляция, волоконно-оптическая сенсорная система, волоконно-оптический фазовый интерферометрический датчик

Благодарность: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Госзадание № 2019-0923.

Ссылка для цитирования: Шулепов В.А., Смирнова А.В., Вдовкин М.Е., Ильичёв И.В., Стригальев В.Е. Подавление паразитной амплитудной модуляции в титан-диффузных волноводах на кристалле ниобата лития путём модификации их топологии // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 12. С. 111–117. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-12-111-117>

Коды OCIS: 250.3140, 250.4110, 250.4390, 130.3730, 130.4110.

Suppression of residual amplitude modulation in Ti:LiNbO₃ integrated optical waveguides by changing its topology

**VLADIMIR SHULEPOV¹✉, ALENA SMIRNOVA², MAKSIM VDOVKIN³,
IGOR ILICHEV⁴, VLADIMIR STRIGALEV⁵**

^{1, 2, 3, 4, 5}ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

⁴Ioffe Institute, Saint-Petersburg, Russia

¹shulepov_vladimir@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-2168-8046>

²279213040490@ya.ru <https://orcid.org/0000-0001-6898-3400>

³vдовкин_максим@mail.ru <https://orcid.org/0009-0004-5596-4621>

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

⁵vstrglv@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-7151-9235>

Abstract

Subject of study. Residual amplitude modulation in Ti:LiNbO₃ integrated optical waveguides.

Aim of study. Suppression of residual amplitude modulation in Ti:LiNbO₃ integrated optical waveguides by modified topology. **Method.** The waveguides topology modification consists in formation of a bend in the input and output sections, due to which angles are formed between the direction of radiation in the region of the phase modulator and in the region of the input and output ports, 3.47° and 1.43° respectively. Such angles do not exceed the optical radiation divergence angle, determined by the optical fiber numerical aperture. However, the optical radiation transmission possibility from the input fiber to any of the output fibers through the integrated optical circuit substrate, bypassing the optical waveguides, should be reduced. **Main results.** It has been found that the density of the residual amplitude modulation values in the boxplot increases during the formation of the waveguide bending at the input and output sections of the integrated optical circuit. Thus, the interquartile range of the residual amplitude modulation values almost halved from 0.077% to 0.043%, and the difference between the maximum and the minimum values almost halved from 0.161% to 0.095%. **Practical significance.** The obtained results can be used to improve the characteristics of fiber-optic gyroscopes and other devices that have a multifunctional integrated optical circuit based on Ti:LiNbO₃ in the optical scheme.

Keywords: fiber optic gyroscope, integrated optical circuit, residual amplitude modulation, fiber optic sensor system, interferometric fiber optic sensor

Acknowledgment: the work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, State assignment No. 2019-0923.

For citation: Shulepov V.A., Smirnova A.V., Vdovkin M.E., Ilichev I.V., Strigalev V.E. Suppression of residual amplitude modulation in Ti:LiNbO₃ integrated optical waveguides by changing its topology [In Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 12. P. 111–117. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-12-111-117>

OCIS codes: 250.3140, 250.4110, 250.4390, 130.3730, 130.4110.

ВВЕДЕНИЕ

Волоконно-оптический гироскоп (ВОГ) является высокоточной навигационной сенсорной системой, используемой на различных космических, наземных и водных транспортных

платформах [1, 2]. Принцип работы ВОГ основан на эффекте Саньяка [3]. Одним из важнейших компонентов оптической схемы ВОГ является многофункциональная интегрально-оптическая схема (МИОС), которая выпол-

няет роль поляризационного фильтра, свето-делителя и фазового модулятора [4]. МИОС, как правило, используют на основе кристалла ниобата лития по причине его большого электрооптического коэффициента, стабильных физических и химических свойств, а также других благоприятных характеристик [5].

Несмотря на ряд преимуществ использования ниобата лития в качестве МИОС, он обладает рядом паразитных эффектов, часть из которых до сих пор не имеет однозначного решения. Один из таких эффектов — это амплитудные искажения оптического излучения в МИОС при подаче управляющего напряжения на электроды фазового модулятора. Также используют термины — «паразитная модуляция интенсивности» (ПМИ) [6], «паразитная

амплитудная модуляция» (ПАМ) и «остаточная амплитудная модуляция» (residual amplitude modulation, RAM) [7]. Следствием такого эффекта являются нежелательные явления, влияющие на характеристики ВОГ [8]. Например, в работе [4] авторы показали, что ПАМ может привести к увеличению ошибки масштабного коэффициента гироскопа на порядок (рис. 1).

ПАМ — известный паразитный эффект, заключающийся в интерференции между основным излучением, распространяющимся по волноводу, и паразитным излучением, распространяющимся в области подложки. В области стыковки на выходе МИОС возбуждается не только полезная волноводная мода, но и паразитная мода подложки из-за разницы модовых полей оптического волокна и канального волновода интегрально-оптической схемы. Фазовый модулятор при подаче управляющего напряжения по-разному воздействует на полезное и паразитное излучение, что приводит к различному сдвигу фазы этих волн. На выходе МИОС в оптическое волокно вводится как излучение волновода, так и часть излучения подложки, а из-за различающейся фазы этих волн в результате интерференции возникают паразитные амплитудные искажения сигнала (рис. 2). Известны работы, где авторы для подавления паразитного излучения формируют различные поглощающие конструкции на нижней грани МИОС [9] или на поверхности вдоль волновода [10–12].

В настоящей же работе предлагается для подавления ПАМ сформировать радиальный изгиб входного и выходных отрезков волноводов МИОС. Предполагается, что полезное

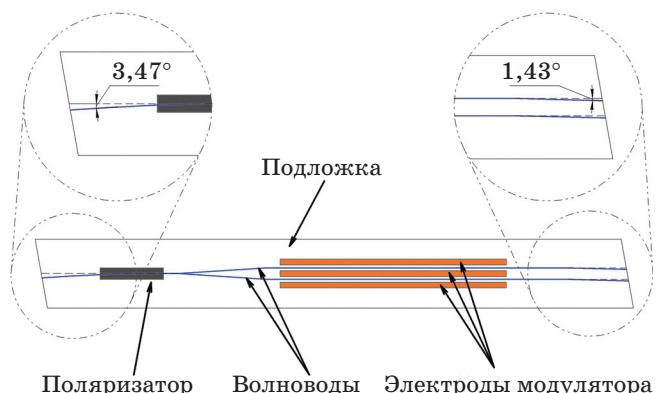


Рис. 1. Конфигурация МИОС с углом между входными и выходными волноводами

Fig. 1. Multifunctional integrated optical circuit (MIOC) configuration with angle between input and output waveguides

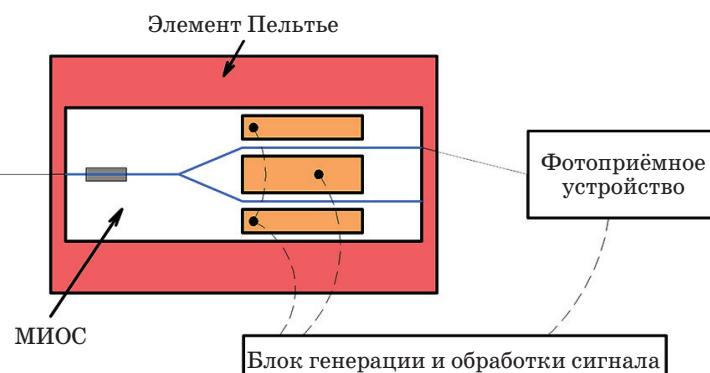


Рис. 2. Схема измерений ПАМ. Прямой линией изображены оптические соединения, штриховой — электрические

Fig. 2. Scheme of RAM measurements. The straight line — optical connections, the dashed line — electrical connections

излучение эффективно вводится в оптическое волокно, а паразитное — смеется относительно оптического волокна, тем самым уменьшатся паразитные амплитудные искажения излучения.

Целью настоящей работы является подавление паразитной амплитудной модуляции в волноводах на подложке ниобата лития при помощи модифицированной топологии волноводов многофункциональной интегрально-оптической схемы, ключевым моментом которой является формирование изгиба волноводов во входной и выходной областях.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изготовлены экспериментальные образцы МИОС двух топологий волноводов: с прямыми и с дугообразными канальными оптическими волноводами на входе и выходе. Канальные оптические волноводы изготавливались стандартным методом высокотемпературной термической диффузии титана при температуре 1021 °C [13]. Ширина использующихся для диффузии титановых полосок и время отжига подбирались таким образом, чтобы обеспечить одномодовый режим распространения в диапазоне 1530–1560 нм и минимальные сквозные оптические потери при стыковке со стандартным одномодовым оптическим волокном. В качестве подложки использовалась пластина конгруэнтного монокристаллического ниобата лития в ориентации x -среза с толщиной 1 мм. Ширина кристалла МИОС составляла 2 мм, а длина — около 50 мм. Входной и выходной торцы чипа МИОС были отполированы под углом 10° для обеспечения уровня обратных отражений при стыковке с оптическим волокном менее 40 дБ [14, 15]. Оптическая схема МИОС с дугообразными волноводами на входе и выходе условно может быть разбита на пять областей: 1) область входного пространственного фильтра, 2) область оптического поляризатора, 3) область делителя оптической мощности, 4) область двухканального фазового модулятора и 5) область выходного пространственного фильтра. Поскольку волноводы, изготовленные термической диффузией титана, поддерживают распространение обеих собственных линейно поляризованных волноводных мод для выделения рабочей Transverse Magnetic (TM)-поляризации использовался высокоэффек-

тивный плазмон-поляритонный поляризатор длиной порядка 7 мм с коэффициентом поляризационной экстинкции более 16 дБ/мм [16]. Делитель оптической мощности был выполнен в виде Y-разветвителя с углом ветвления менее 0,3° для минимизации потерь, связанных с утечкой в моды подложки [17]. Дифференциальный фазовый модулятор представлял собой параллельные волноводы, направленные вдоль кристаллографической оси Y, расположенные в зазорах трёх планарных золотых электродов с межэлектродным расстоянием 20 мкм. В данной геометрии поперечного электрооптического эффекта для модуляции используется компонента электрического поля, направленная вдоль кристаллографической оси Z и большой электрооптический коэффициент $r_{33} = 30$ пм/В.

Особенностью конфигурации экспериментальных образцов МИОС было то, что волноводы в областях пространственных фильтров были повёрнуты относительно направления распространения света в области фазового модулятора (кристаллографическая ось Y) на угол в 3,47° для входа и на 1,43° для выхода. Суммарный угол между входом и выходом составляет 4,90°. Данный угол не превосходит угол расходимости оптического излучения, определяемый числовой апертурой оптического волокна, но должен уменьшить возможность прохождения оптического излучения из входного волокна в любое из выходных волокон через подложку, минуя оптические волноводы.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Собрана оптическая схема для измерения ПАМ в волноводах МИОС, в которой использовался источник оптического излучения с центральной длиной волны 1550 нм и шириной спектра 30 нм. От источника излучение поступало по оптическому волокну через волоконный поляризатор в волновод. Выходной порт МИОС был согласован со вторым отрезком оптического волокна, который был подключён к фотоприёмному устройству, которое в свою очередь подключалось к блоку генерации и обработки сигнала (БГОС). На электроды МИОС подавалось управляющее напряжение с БГОС. На входе и выходе МИОСстыковались двулучепреломляющие волокна типа Panda, которые юстировались по максималь-

ному уровню оптической мощности и согласовывались по поляризации, а затем были приклеены к МИОС на УФ отверждаемый клей. Сам кристалл НЛ был расположен на элементе Пельтье для возможности измерения ПАМ в диапазоне температур 16–60 °C.

Методика определения ПАМ представляет собой прямое измерение интенсивности выходного оптического излучения МИОС при подаче на электроды исследуемого образца модуляции, которая перебирает диапазон напряжений от -10 В до +10 В (рис. 3).

Выходной сигнал содержит интерференционные искажения, вызванные ПАМ. Коэффициент ПАМ (K_{RAM}) можно представить, как отношение интенсивности оптического сигнала МИОС $I(U_{+/-})$ при приложении управляющего напряжения к интенсивности оптического сигнала МИОС $I(U_0)$ в отсутствие управляющего напряжения на электродах.

$$K_{RAM} = \frac{I(U_{+/-})}{I(U_0)}. \quad (1)$$

В настоящей работе проведено исследование ПАМ шести образцов МИОС с прямыми волноводами и шести образцов МИОС с дугообразными волноводами для проверки повторяемости результатов экспериментов.

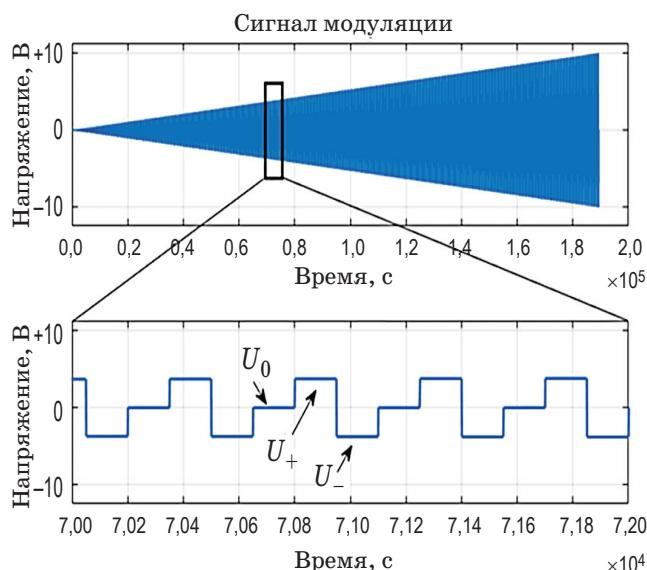


Рис. 3. Модулирующий сигнал, который подаётся на электроды МИОС

Fig. 3. The modulating signal that is applied to the MIOC electrodes

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве основного параметра анализировался коэффициент ПАМ (K_{RAM}). Для каждого образца проводилось измерение при комнатной температуре, затем происходило охлаждение до +16 °C, а затем нагрев до +60 °C с шагом в 10 °C, так как было установлено, что коэффициент ПАМ зависит от температуры МИОС.

Результаты измерения ПАМ в МИОС с различной формой волноводов представлены в виде коробчатой диаграммы (рис. 4). Из полученных результатов можно сделать вывод, что формирование изгиба волноводов на входе и выходе МИОС привело к снижению коэффициента ПАМ, а также увеличилась плотность значений. Значение медианы уменьшилось примерно на 20%, однако межквартильное расстояние уменьшилось почти в два раза с 0,077% до 0,043%, а также разница между максимальным и минимальным значениями уменьшилась почти в два раза с 0,161% до 0,095%. Такой результат можно напрямую связать с тем, что излучение, распространяющееся по подложке, менее эффективно вводится в оптическое волокно в случае с топологией волноводов, имеющих изгиб во входной и выходной областях МИОС. Использование в оптической схеме ВОГ МИОС с дугообразными волноводами позволяет повысить характеристики гироскопа.

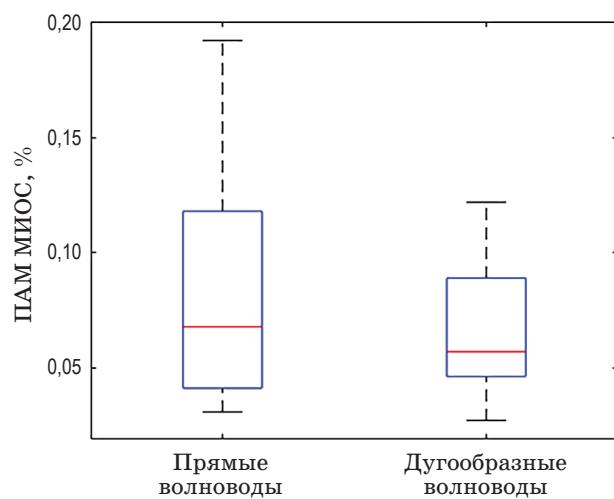


Рис. 4. Сравнение коэффициента паразитной амплитудной модуляции в многофункциональных интегрально-оптических схемах с прямыми и дугообразными волноводами

Fig. 4. Comparison of the coefficient of residual amplitude modulation in multifunctional integrated optical circuits with straight and arcuate waveguides

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках настоящей работы разработана модифицированная топология волноводов многофункциональной интегрально-оптической схемы, ключевым моментом которой является формирование изгиба волноводов во входной и выходной областях. Такая модификация положительным образом повлияла на улучшение значений паразитной амплитудной модуляции. В сравнении с интегрально-оптической схемой без изгиба волноводов межквартильное расстояние значений паразитной амплитудной модуляции и разница между максимальным и минимальным значениями на коробчатой диаграмме уменьшились почти в два раза с 0,077% до 0,043% и с 0,161% до 0,095%, соответственно.

В работе [18] отражено, что при подаче положительного напряжения на электроды модулятора образуется мода, отличная от основ-

ной, из-за чего возникает ПАМ. А при подаче отрицательного напряжения на электроды — вторичная мода не возникает, а ПАМ имеет меньшую величину и меньший период по приложенному напряжению в сравнении со случаем приложения положительного напряжения. Авторы объясняют это паразитным интерферометром Фабри–Перо. В нашем же случае величина ПАМ и период не зависят от знака прикладываемого напряжения. Также, нами методом призменного вывода было получено, что в волноводе МИОС существует только основная мода. Следовательно, можно сделать вывод, что в нашем случае возникновение ПАМ связано с неоптимальным вводом излучения в волновод и распространением части света по подложке, следовательно, формирование изгиба на волноводах должно было положительным образом повлиять на величину ПАМ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Sanders G., Sanders S., Strandjord L. Fiber optic gyro development at Honeywell // Proc. SPIE. 2016. V. 9852. № 5. <https://doi.org/10.1117/12.2228893>
2. Pavlath G.A. Fiber optic gyros past, present and future // International Conference on Optical Fiber Sensors. Beijing, China. 14–19 October 2012. V. 8421. <https://doi.org/10.1117/12.966855>
3. Lefevre H., Steib A., Claire A. The fiber optic gyro 'adventure' at Photonetics, iXsea and now iXblue // Proc. SPIE. 2020. V. 11405. № 5. <https://doi.org/10.1117/12.2560791>
4. 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. № 21. (ноябрь). P. 23903–23910. <https://doi.org/10.1109/jsen.2021.3117656>
5. Wooten E.L., Kissa K.M., Yi-Yan A., Murphy E.J., Lafaw D.A. 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/10.1109/10.1109/2944.826874>
6. Wang D., Sheng F. Residuary intensity modulation of the phase modulator in IFOG and its measurement // Opto-Electronic Engineering. 2007. V. 34 P. 26–29.
7. Ishibashi C., Ye J., Hall J.L. Analysis/reduction of residual amplitude modulation in phase/frequency modulation by an EOM // Quantum Electronics and Laser science Conference. Long Beach. California United States. 19–22 May 2002. P. 91–92. <https://doi.org/10.1109/QELS.2002.1031144>
8. Sanders S.J., Lewis J.E., Mosor S. et al. Systems and methods for environmentally insensitive High-Performance Fiber-Optic Gyroscopes // Patent US2013044328. Февраль 21. 2013.
9. Liu J., 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.

REFERENCES

1. Sanders G., Sanders S., Strandjord L. Fiber optic gyro development at Honeywell // Proc. SPIE. 2016. V. 9852. № 5. <https://doi.org/10.1117/12.2228893>
2. Pavlath G.A. Fiber optic gyros past, present and future // International Conference on Optical Fiber Sensors. Beijing, China. 14–19 October 2012. V. 8421. <https://doi.org/10.1117/12.966855>
3. Lefevre H., Steib A., Claire A. The fiber optic gyro 'adventure' at Photonetics, iXsea and now iXblue // Proc. SPIE. 2020. V. 11405. № 5. <https://doi.org/10.1117/12.2560791>
4. 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. № 21. (ноябрь). P. 23903–23910. <https://doi.org/10.1109/jsen.2021.3117656>
5. Wooten E.L., Kissa K.M., Yi-Yan A., Murphy E.J., Lafaw D.A. 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/10.1109/10.1109/2944.826874>
6. Wang D., Sheng F. Residuary intensity modulation of the phase modulator in IFOG and its measurement // Opto-Electronic Engineering. 2007. V. 34 P. 26–29.
7. Ishibashi C., Ye J., Hall J.L. Analysis/reduction of residual amplitude modulation in phase/frequency modulation by an EOM // Quantum Electronics and Laser science Conference. Long Beach. California United States. 19–22 May 2002. P. 91–92. <https://doi.org/10.1109/QELS.2002.1031144>
8. Sanders S.J., Lewis J.E., Mosor S. et al. Systems and methods for environmentally insensitive High-Performance Fiber-Optic Gyroscopes // Patent US2013044328. 21.02.2013.
9. Liu J., 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. 6. P. 1572–1579. <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.2968478>
10. Gampp L., Zimmerman G., Martinez A. et al. Integrated optics chip having reduced surface wave propagation // US Patent 6,438,280 B1, 2000.
 11. Zhang Z., Felipe D., Brinker W., Kleinert M., Maesen-Novo A. C/L-band colorless ONU based on polymer bidirectional optical subassembly // Journal of Lightwave Technology. 2015. V. 33. № 6. P. 1230–1234. <https://doi.org/10.1109/JLT.2014.2377092>
 12. Gao Z., Krombholz B., Dieckröger J. et al. Planar optical circuit // US Patent 7,373,030 B2. 2003.
 13. Караваев П.М., Ильичев И.В., Агрузов П.М., Тронев А.В., Шамрай А.В. Выделение поляризации в титан-диффузных волноводах на подложках ниобата лития // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. С. 33–39. <https://doi.org/10.1134/S1063785016050266>
 14. Kincaid B.E. Coupling of polarization-maintaining optical fibers to Ti:LiNbO₃ waveguides with angled interfaces // Optics Letters. 1988. V. 13. № 5. P. 425–427. <https://doi.org/10.1364/ol.13.000425>
 15. Lefevre H.C. The fiber-optic gyroscope. 3rd ed. London: Artech House Applied Photonics Series, 2022. 439 p.
 16. Ильичев И.В., Тогузов Н.В., Шамрай А.В. Плазмон-поляритонный поляризатор на поверхности канальных одномодовых волноводов в ниобате лития // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. С. 97–103.
 17. Парфенов М.В., Тронев А.В., Ильичев И.В., Агрузов П.М., Шамрай А.В. Перераспределение оптической мощности в плечах волноводного Y-разветвителя при локальной внешней засветке подложки ниобата лития // Письма в ЖТФ. 2020. Т. 46. С. 8–11. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.01.48855.18040>
 18. Электронный ресурс URL: <https://www.ixblue.com/wp-content/uploads/2022/01/tn-ram-effect-and-mitigation-technic.pdf> (iXblue Photonics & Space / Residual Amplitude Modulation of optical phase modulator).
 2020. V. 6. P. 1572–1579. <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.2968478>
 10. Gampp L., Zimmerman G., Martinez A. et al. Integrated optics chip having reduced surface wave propagation // US Patent 6,438,280 B1, 2000.
 11. Zhang Z., Felipe D., Brinker W., Kleinert M., Maesen-Novo A. C/L-band colorless ONU based on polymer bidirectional optical subassembly // Journal of Lightwave Technology. 2015. V. 33. № 6. P. 1230–1234. <https://doi.org/10.1109/JLT.2014.2377092>
 12. Gao Z., Krombholz B., Dieckröger J. et al. Planar optical circuit // US Patent 7,373,030 B2. 2003.
 13. Karavaev P., Ilichev I., Agruzov P., Tronev A., Schamrai A. Separation of polarization in titanium-diffuse waveguides on lithium niobate substrates // Letters to JTP. 2016. V. 42. P. 33–39. <https://doi.org/10.1134/S1063785016050266>
 14. Kincaid B.E. Coupling of polarization-maintaining optical fibers to Ti:LiNbO₃ waveguides with angled interfaces // Optics Letters. 1988. V. 13. № 5. P. 425–427. <https://doi.org/10.1364/ol.13.000425>
 15. Lefevre H.C. The fiber-optic gyroscope. 3rd ed. London: Artech House Applied Photonics Series, 2022. 439 p.
 16. Ilichev I., Toguzov N., Schamrai A. Plasmon-polariton polarizer on the surface of single-mode channel waveguides in lithium niobate // Letters to JTP. 2009. V. 35. P. 97–103.
 17. Parphenov M., Tronev A., Ilichev I., Agruzov P., Schamrai A. Redistribution of optical power in the arms of a waveguide Y-splitter under local external illumination of a lithium niobate substrate // Letters to JTP. 2020. V. 46. P. 8–11. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.01.48855.18040>
 18. Electronic resource URL: <https://www.ixblue.com/wp-content/uploads/2022/01/tn-ram-effect-and-mitigation-technic.pdf> (iXblue Photonics & Space / Residual Amplitude Modulation of optical phase modulator).

АВТОРЫ

Владимир Андреевич Шулепов — канд. техн. наук, начальник группы, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 57191411190, <https://orcid.org/0000-0003-2168-8046>, shulepov_vladimir@mail.ru

Алена Викторовна Смирнова — инженер, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 57226292609, <https://orcid.org/0000-0001-6898-3400>, 79213040490@ya.ru

Максим Евгеньевич Вдовкин — студент, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0009-0004-5596-4621>, vdovkin_maksim@mail.ru

Игорь Владимирович Ильин — канд. хим. наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, 194021, Санкт-Петербург, Россия; научный сотрудник, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 12793059400; 36962660100, <https://orcid.org/0000-0001-7809-0630>, iiv@mail.ioffe.ru

Владимир Евгеньевич Стригальев — канд. физ.-мат. наук, доцент, профессор, старший научный сотрудник НИЦ СФ, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 6603225596, <https://orcid.org/0000-0002-7151-9235>, vstrgvl@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28.07.2023

Одобрена после рецензирования 25.08.2023

Принята к печати 30.10.2023

AUTHORS

Vladimir A. Shulepov — PhD, Team Leader, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 57191411190, <https://orcid.org/0000-0003-2168-8046>, shulepov_vladimir@mail.ru

Alena V. Smirnova — Engineer, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 57226292609, <https://orcid.org/0000-0001-6898-3400>, 79213040490@ya.ru

Maksim E. Vdovkin — Student, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0009-0004-5596-4621>, vdovkin_maksim@mail.ru

Igor V. Ilichev — PhD in Chemistry, Senior Research Fellow, Ioffe Institute, 194021, Saint-Petersburg, Russia; Research Fellow, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 12793059400; 36962660100, <https://orcid.org/0000-0001-7809-0630>, iiv@mail.ioffe.ru

Vladimir E. Strigalev — PhD in Physics and Mathematics, Assistant Professor, Professor, Senior Researcher of RC LGP, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 6603225596, <https://orcid.org/0000-0002-7151-9235>, vstrgvl@mail.ru

The article was submitted to the editorial office 28.07.2023

Approved after review 25.08.2023

Accepted for publication 30.10.2023