



Получено: 21.09.2023 г. | Принято: 25.09.2023 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.7-8.456.461>

Научная статья

ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИЙ КОНВЕРТОР ПОЛЯРИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ SiN

Д.М.Моховиков¹, инженер, ORCID: 0009-0003-8402-1027 / exelenser@gmail.com

А.А.Гуляева^{1,2}, инженер, ORCID: 0000-0002-2434-0902

И.В.Кулинич¹, к.т.н., ст. науч. сотр., ORCID: 0009-0001-0768-3495

А.А.Таловская¹, инженер, ORCID: 0009-0001-6796-1135

А.С.Мырзахметов¹, инженер, ORCID: 0009-0007-8194-1169

Аннотация. В данной работе представлены результаты исследования влияния геометрических параметров конструкции интегрально-оптического (ИО) конвертора поляризации, реализованный на основе гребенчатой волноводной структуры на нитриде кремния на изоляторе (НКНИ), на эффективность поворота поляризации и выходную оптическую мощность устройства. В результате чего была разработана математическая модель ИО конвертора поляризации с эффективностью поворота поляризации >96 % и выходной мощностью >98 %. Также была предложена конструкция ИО конвертора поляризации, с зеркально отраженной секцией поворота поляризации, что позволяет уменьшить влияние технологической ошибки воспроизводимости геометрии устройства до ± 215 нм.

Ключевые слова: ИО конвертор поляризации, гребенчатый оптический волновод, нитрид кремния

Для цитирования: Д.М. Моховиков, А.А. Гуляева, И.В. Кулинич, А.А. Таловская, А.С. Мырзахметов. Интегрально-оптический конвертор поляризации на основе SiN. НАНОИНДУСТРИЯ. 2023. Т. 16, № 7-8. С. 456-461. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.7-8.456.461>

Received: 21.09.2023 | Accepted: 25.09.2023 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.7-8.456.461>

Original paper

THE INTEGRAL-OPTICAL POLARIZATION CONVERTER BASED ON SiN

D.M.Mohovikov¹, Engineer, ORCID: 0009-0003-8402-1027 / exelenser@gmail.com

A.A.Guliaeva^{1,2}, Engineer, ORCID: 0000-0002-2434-0902

I.V.Kulinich¹, Cand. of Sci. (Tech), Senior Researcher, ORCID: 0009-0001-0768-3495

A.A.Talovskaya¹, Engineer, ORCID: 0009-0001-6796-1135

A.S.Myrzakhmetov¹, Engineer, ORCID: 0009-0007-8194-1169

Abstract. This paper presents the results of the study of the influence of geometrical design parameters of an integrated-optical (IO) polarization converter, realized based on a comb waveguide structure on silicon nitride on insulator (SNOI), on the polarization rotation efficiency and output optical power of the device. As a result, a mathematical model of an IO polarization converter with polarization rotation efficiency >96 % and output power >98 % was developed. The design of the polarization converter IO with a mirror-reflected polarization rotation section was also proposed, which allows reducing the influence of technological error of the device geometry reproducibility to ± 215 nm.

¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия / Tomsk university of control systems and radioelectronics, Tomsk, Russia

² Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия / V.E.Zuev institute of atmospheric optics SB RAS, Tomsk, Russia



Keywords: IO polarization converter, rib optical waveguide, silicon nitride

For citation: D.M. Mohovikov, A.A. Guliaeva, I.V. Kulinich, A.A. Talovskaya, A.S. Myrzakhmetov. The integral-optical polarization converter based on SiN. NANOINDUSTRY. 2023. V. 16, no. 7-8. PP. 456-461. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.7-8.456.461>.

ВВЕДЕНИЕ

Потребность в более быстрых и энергоэффективных широкополосных сетях определяет направление мировой исследовательской политики в области оптической передачи данных [1]. Для создания сетей, способных обеспечить работу с растущим трафиком, в современных сетях телекоммуникаций повсеместно внедряются фотонные интегральные схемы (ФИС), в которых потребляемая мощность может быть снижена как минимум на 50 % в сравнении с традиционными интегральными схемами [2].

На сегодняшний день, в связи с увеличением степени интеграции элементов ФИС, возникает проблема высокой чувствительности к поляризации, которая решается при помощи схем разнесения или конвертации поляризации [3]. В следствие чего ведется активная разработка пассивных компонентов, позволяющих удовлетворить высокие требования к поляризационной чувствительности схем [4, 5].

Конвертацию поляризации осуществляют при помощи специальных пассивных устройств – конверторов, которые выполнены в виде ассиметричных гребенчатых волноводов с различной формой поперечного сечения [6–8], длиной от 20 до 150 мкм, обеспечивающих преобразование TE/TM с эффективностью >90 %, а также в виде конусных волноводов [9, 10] длиной от 200 до 1500 мкм, с аналогичной эффективностью преобразования.

Основной проблемой является воспроизведение геометрии ИО конверторов поляризации, так как требуется высокая точность литографии, большое количество технологических операций, а также низкая шероховатость как стенок волноводов, так и поверхности подложки [11]. При сравнении ИО конверторов, полученных на различных фотонных платформах, активно выделяются конвертеры поляризации на базе технологии НКНИ [12, 13], отличающиеся низкими вносимыми потерями менее 1 дБ, высокой эффективностью конвертации поляризации >95 % и широким спектром рабочих длин волн, а что самое главное – менее требовательными к литографическому процессу, при возможности интеграции с любыми фотонными платформами на базе тонкопленочного LiNbO₃, кремния на изоляторе (КНИ) и InP

INTRODUCTION

The need for faster and more energy-efficient broadband networks is driving global research policy in the field of optical transmission [1]. To create networks capable of handling the growing traffic, photonic integrated circuits (PICs), and power consumption can be reduced by at least 50 % compared to traditional integrated circuits, are widely deployed in modern telecommunication networks [2].

Nowadays, due to increasing degree of integration of PIC elements, the problem of high sensitivity to polarization arises, which is solved by means of polarization diversity or polarization conversion schemes [3]. Hence, there is an active development of passive components allowing to satisfy high requirements to polarization sensitivity of circuits [4, 5].

Polarization conversion is carried out with the help of special passive devices called converters, which are made in the form of asymmetric comb waveguides with different cross-sectional shape [6–8], and length from 20 to 150 μm, providing TE/TM conversion with efficiency >90 %, as well as in the form of cone waveguides [9, 10], length from 200 to 1500 μm, with similar conversion efficiency.

The main problem is to reproduce the geometry of IO polarization converters, since high lithography accuracy, a large number of technological operations, and low roughness of both the waveguide walls and the substrate surface are required [11]. When comparing IO converters obtained on different photonic platforms, polarization converters based on technology presented in [12, 13] stand out for their low insertion loss of less than 1 dB, high polarization conversion efficiency of >95 %, and a wide range of operating wavelengths, and, most importantly, less demanding to the lithographic process, with the possibility of integration with any photonic platforms based on thin-film LiNbO₃, silicon-on-insulator (SOI) and InP in comparison with SOI converters with similar characteristics, with insertion losses from ~1 to 5 dB [14, 15].

Thus, NSI converters domestic technology development will expand the possibilities of design and production of Russian DWDM-systems, on any photonic platform.

Therefore, the aim of the work was to develop an integrated-optical polarization converter based on NSI technology.

в сравнении с КНИ-конверторами, обладающими схожими характеристиками, с вносимыми потерями от -1 до 5 дБ [14, 15].

Таким образом, разработка отечественной технологии НКНИ-конверторов позволит расширить возможности проектирования и производства российских DWDM-систем на любой фотонной платформе.

Поэтому целью работы являлось разработать интегрально-оптический конвертор поляризации на основе НКНИ.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для разработки ИО конвертора была построена его математическая модель в специализированном ПО для расчета и проектирования FIS-ANSYS Lumerical.

Моделирование выполнялось при помощи метода конечных элементов (МКЭ), который используется при анализе различных фотонных устройств исходя из их геометрии и свойств материалов, входящих в их состав. Основной математический аппарат данного метода сосредоточен на профилях мод, частотах среза и эффективных показателях преломления, благодаря чему возможна оптимизация геометрии волновода в интегральной фотонной системе [16].

Модель ИО конвертора – это волноводная гребенчатая структура на основе НКНИ, состоящая из прямоугольного гребенчатого волновода на входе, ассиметричного гребенчатого волновода, выполняющего функцию поворота поляризации и прямоугольного гребенчатого волновода на выходе (рис.1).

В данной модели плоско поляризованный свет ($\lambda = 1,55$ мкм) распространяется в гребне волновода на основе SiN ($n = 2$), затем, проходя через секцию поворота (ассиметричный волновод), световая волна испытывает поворот поляризации на 90 градусов и выходит из прямоугольного гребенчатого волновода.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для осуществления поворота поляризации с максимальной эффективностью (100%) и с максимальной выходной мощностью (100%) необходимо разработать конструкцию входного гребенчатого волновода, в котором коэффициент удержания TE-моды Γ^{TE} будет составлять 100% , а коэффициент удержания TM-моды $\Gamma^{TM} = 0\%$. А также необходимо разработать конструкцию секции поворота поляризации (ассиметричного гребенчатого волновода), в котором Γ^{TE} и Γ^{TM} будет составлять 50% для каждой моды.

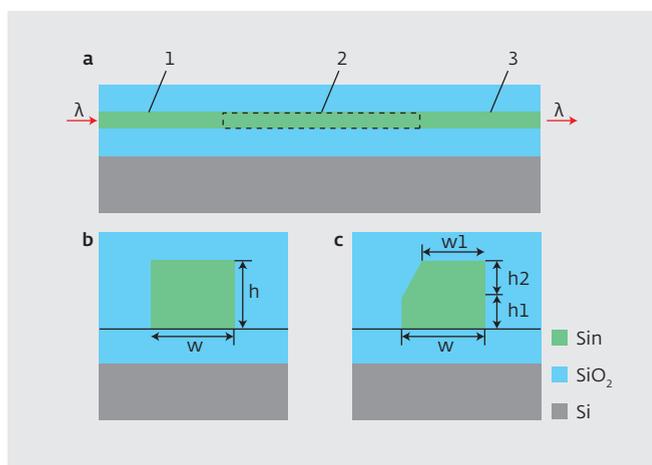


Рис.1. Схематичное пояснение исследуемой модели ИО конвертора. а – схема ИО конвертора: 1 – входной гребенчатый волновод; 2 – ассиметричный гребенчатый волновод; 3 – выходной гребенчатый волновод; б – поперечное сечение прямого гребенчатого волновода; в поперечное сечение ассиметричного гребенчатого волновода

Fig.1. Schematic explanation of the investigated model of the IO converter. а – scheme of the IO converter: 1 – input ridged waveguide; 2 – asymmetric ridged waveguide; 3 – output ridged waveguide; б – cross section of the direct ridge waveguide; в cross section of the asymmetric ridge waveguide

RESEARCH METHODS

To develop the IO converter, its mathematical model was developed in the specialized software for calculation and design of FIS – ANSYS Lumerical.

The modeling was performed using the finite element method (FEM), which is used in the analysis of various photonic devices based on their geometry and properties of the constituent materials. The main mathematical apparatus of this method focuses on mode profiles, cutoff frequencies, and effective refractive indices, due to which it is possible to optimize the waveguide geometry in an integrated photonic system [16].

The model of the IO converter is an NSI-based comb waveguide structure consisting of a rectangular comb waveguide at the input, an asymmetric comb waveguide performing the polarization rotation function and a rectangular comb waveguide at the output (Fig.1).

In this model, plane polarized light ($\lambda = 1.55 \mu\text{m}$) propagates in the crest of a SiN-based waveguide ($n = 2$), then, passing through a turning section (asymmetric waveguide), the light wave experiences a 90-degree polarization rotation and exits the rectangular comb waveguide.

RESULTS

To perform polarization rotation with maximum efficiency (100%) and maximum output power (100%), it is necessary to develop the design of the input comb



Прямоугольный волновод

В ходе работы был проведен модовый анализ одно-модового гребенчатого волновода для различных ширин гребня w , при этом $h = w$ (рис.2).

Результаты проведенного модового анализа показали, что сближение значений эффективных показателей преломления для TE_0 и TM_0 наблюдается при значениях ширины w и высоты h гребня волновода от 800 нм.

Однако, так как максимальная толщина пленки SiN ограничена технологическими возможностями научно-образовательного центра "Нанотехнологии" ТУСУР и составляет 800 нм, далее при $h=800$ нм было проведено исследование влияния ширины гребня волновода w на коэффициент удержания TE_0 - и TM_0 -мод. Результаты исследования показали, что $\Gamma^{TE} = 100\%$, а $\Gamma^{TM} = 0\%$ наблюдаются при ширине гребня волновода $w=850$ нм.

Секция поворота

Далее были проведены исследования влияния геометрических параметров ассиметричного гребенчатого волновода на эффективность поворота поляризации, который обеспечивается перетеканием оптической мощности из TE_0 - в TM_0 -моду. В результате исследований были определены геометрические параметры секции поворота с максимальной эффективностью поворота поляризации. На рис.3 представлены геометрические параметры поперечного сечения ассиметричного волновода, а результаты расчета представлены в табл.1.

Несмотря на высокую эффективность поворота поляризации (96,3%) и выходную мощность (98,32%) полученной конструкции ИО конвертора, при проведении технологической оценки воспроизводимости его геометрии, было обнаружено, что технологический допуск данной конструкции составляет ± 60 нм, при увеличении которого эффективность работы устройства значительно падает.

Расширение диапазона технологической ошибки достигается увеличением длины секции конвертации в 2 раза, при этом 25% длины ассиметричного волновода необходимо зеркально отразить (рис.4).

При использовании зеркально отраженной секции конвертации поляризации возможно увеличение допустимой технологической ошибки до 215 нм, при которой наблюдается эффективность конвертации поляризации 96,3%, а выходная мощность устройства достигает 98,32%. При этом длина секции конвертора поляризации L составляет 114 мкм.

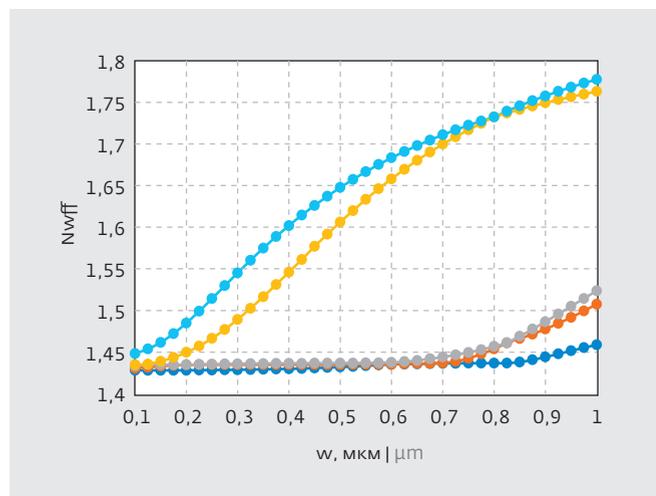


Рис.2. Зависимость эффективных показателей преломления n_{eff} различных мод от ширины стороны волновода w : 1 - TE_0 ; 2 - TM_0 ; 3 - TE_1 ; 4 - TM_1 ; 5 - TE_2

Fig.2. Dependence of the effective refractive indices n_{eff} of various modes on the waveguide side width w : 1 - TE_0 ; 2 - TM_0 ; 3 - TE_1 ; 4 - TM_1 ; 5 - TE_2

waveguide in which the TE -mode Γ^{TE} retention factor is 100% and the TM -mode Γ^{TM} retention factor is 0%. And it is also necessary to develop the design of polarization rotation section (asymmetric comb waveguide) in which Γ^{TE} and Γ^{TM} will be 50% for each mode.

Rectangular waveguide

In this work, a mode analysis of a single-mode comb waveguide was performed, for different comb widths w , with $h = w$ (Fig.2).

The results of the performed mode analysis showed that the convergence of the values of the effective refractive indices for TE_0 and TM_0 is observed at values of the width w and height h of the waveguide crest from 800 nm.

However, since the maximum thickness of the SiN film is limited by the technological capabilities of the research and educational center "Nanotechnology" and is 800 nm, further at $h=800$ nm, and influence of the waveguide crest width w on the retention coefficient TE_0 - and TM_0 -modes was investigated. The results of the study showed that $\Gamma^{TE} = 100\%$ and $\Gamma^{TM} = 0\%$ are observed at the waveguide crest width $w=850$ nm.

Turning section

Further, the geometric parameters influence on the asymmetric comb waveguide on efficiency of polarization rotation, which is provided by the flow of optical power from TE_0 to TM_0 mode, was investigated. As a result of the research, the geometrical parameters

Таблица 1. Параметры конвертера поляризации при использовании геометрии, обеспечивающей максимальную эффективность
 Table 1. Polarization converter parameters using geometry for maximum efficiency

Γ_{TE} , %	Γ_{TM} , %	Выходная мощность, % Output power	L, мкм μm	Коэффициент преобразования TE_0 в TM_0 моду, % Conversion factor TE_0 to TM_0 mode
50	50	98,32	57	96,3

ВЫВОДЫ

В результате проделанной работы была разработана модель интегрально-оптического конвертера поляризации на основе $\text{Si}_x\text{N}_y/\text{SiO}_2$, обеспечивающего высокую пиковую эффективность конвертации поляризации, достигающую 96,3 %, и выходной мощностью, достигающей 98,32 %, с допустимой технологической ошибкой ± 215 нм при длине секции конвертера 114 мкм. Создание прототипа, обеспечивающего схожие характеристики, позволит использовать перспективную технологию НКНИ в более широком спектре устройств фотонной промышленности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEWM-2022-0004 "Исследование и разработка способов изготовления интегральных оптических волноводов и элементов на их основе").

ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

Декларация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Co-packaged datacenter optics: Opportunities and challenges / Minkenberg C. *et al.* // IET Optoelectron. 2021. Vol. 15, no. 2. PP. 77–91.
2. Review of Silicon Photonics Technology and Platform Development / Siew S.Y. *et al.* // J. Light Technol. 2021. Vol. 39, no. 13. PP. 4374–4389.
3. Silicon On-Chip PDM and WDM Technologies Via Plasmonics and Subwavelength Grating /

of the rotation section with maximum polarization rotation efficiency were determined. Fig.3 shows the geometric parameters of the asymmetric waveguide cross section, and the calculation results are presented in Table 1.

Despite the high polarization rotation efficiency (96.3 %) and output power (98.32 %) of the obtained IO converter design, during reproducibility technological evaluation of its geometry, it was found that technological tolerance of this design is ± 60 nm, with increasing of device efficiency drops significantly.

Expansion of the process error range is achieved by increasing the length of the conversion section by a factor of 2, with 25 % of the asymmetric waveguide length to be mirrored (Fig.4).

By using a mirror-reflected polarization converter section, it is possible to increase the allowable process error up to 215 nm, at which polarization conversion efficiency of 96.3 % is observed and the output power of the device reaches 98.32 %. In this case, the polarization converter section length L is 114 μm .

CONCLUSIONS

As a result of this work, a model of an integrated-optical polarization converter based on $\text{Si}_x\text{N}_y/\text{SiO}_2$

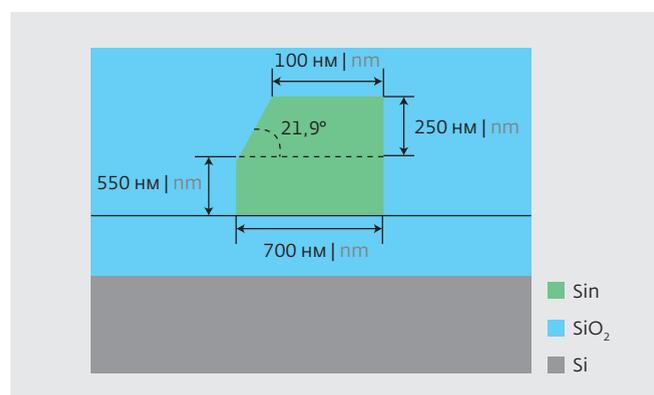


Рис.3. Геометрические параметры секции конвертации поляризации с максимальной эффективностью
 Fig.3. Geometric parameters of the polarization conversion section with maximum efficiency

- Zhou Z. *et al.* // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. IEEE, 2019. Vol. 25, no. 2. PP. 1-13.
4. Mode and Polarization-Division Multiplexing Based on Silicon Nitride Loaded Lithium Niobate on Insulator Platform / Han X. *et al.* // Laser Photon. Re. V. 2022. Vol. 16, no. 1. P. 2100529.
 5. GHz-Bandwidth InP-HBT AMUX/ADEMUX Circuits for Beyond-1-Tb/s/ch Digital Coherent Optical Transceivers / Nagatani M. *et al.* // 2022 IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC). IEEE, 2022. PP. 1-8.
 6. **Kumari B., Varshney R.K., Pal B.P.** Design of a promising silicon slot waveguide-based ultra-short low loss efficient polarization rotator for the mid-IR // Optik (Stuttg). 2019. Vol. 180. PP. 71-83.
 7. On-chip polarization rotator for type I second harmonic generation / Stanton E.J. *et al.* // APL Photonics. 2019. Vol. 4, no. 12. P. 126105.
 8. On-Chip Polarization Rotators / Hou Z. *et al.* // Adv. Opt. Mater. 2019. Vol. 7, no. 10. P. 1900129.
 9. Silicon nitride waveguide polarization rotator and polarization beam splitter for chip-scale atomic systems / Gallacher K. *et al.* // APL Photonics. 2022. Vol. 7, no. 4. P. 046101.
 10. Low-loss and fabrication tolerant silicon mode-order converters based on novel compact tapers / Chen D. *et al.* // Opt. Express. 2015. Vol. 23, no. 9. P. 11152.
 11. Broadband Polarization Rotator and Splitter Based on 70 nm-Etched Waveguides on SOI Platform / Tian Y. *et al.* // Photonics. 2022. Vol. 9, № 10. P. 758.
 12. Ultracompact polarization converter with a dual subwavelength trench built in a silicon-on-insulator waveguide / Velasco A.V. *et al.* // Opt. Lett. 2012. Vol. 37, no. 3. P. 365.
 13. **Socci L., Sorianello V., Romagnoli M.** 300 nm bandwidth adiabatic SOI polarization splitter-rotators exploiting continuous symmetry breaking // Opt. Express. 2015. Vol. 23, no. 15. P. 19261.
 14. Reconfigurable and low-power consumption polarization rotating beam splitter with EIT-like effect based on SOI ridge waveguide / Deng C. *et al.* // Opt. Commun. 2021. Vol. 495. P. 127054.
 15. **El-Aassar O., Rebeiz G.M.** A DC-to-108-GHz CMOS SOI Distributed Power Amplifier and Modulator Driver Leveraging Multi-Drive Complementary Stacked Cells // IEEE J. Solid-State Circuits. 2019. Vol. 54, no. 12. PP. 3437-3451.
 16. Heterogeneous Si/III-V integration and the optical vertical interconnect access/ Wang Q. *et al.* // Opt. Express. 2012. Vol. 20, no. 15. P. 16745.

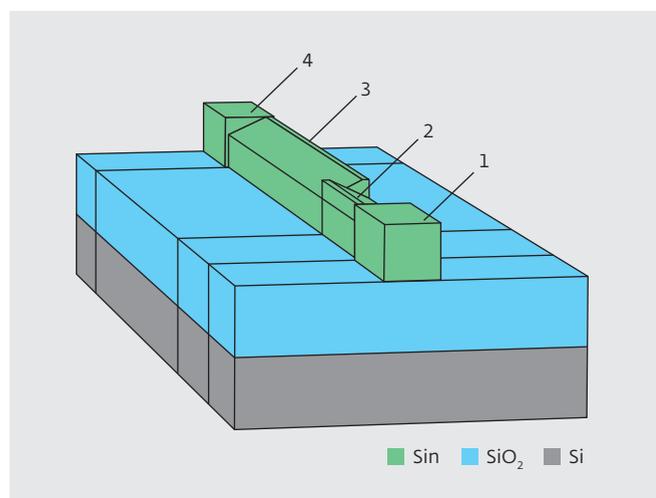


Рис.4. Схематичное представление модели ИО конвертера с зеркально отраженным асимметричным волноводом: 1 – входной гребенчатый прямоугольный волновод; 2 – зеркально отраженный асимметричный волновод; 3 – асимметричный волновод; 4 – выходной прямоугольный волновод
Fig.4. Scheme of a model of an IO converter with a mirror-reflected asymmetric waveguide: 1 – input comb rectangular waveguide; 2 – mirror-reflected asymmetric waveguide; 3 – asymmetric waveguide; 4 – output rectangular waveguide

was developed, which provides high peak polarization conversion efficiency reaching 96.3 % and output power reaching 98.32 %, with an allowable technological error of ± 215 nm at a converter section length of 114 μm . The development of a prototype providing similar characteristics will make it possible to use the promising NSI technology in a wider range of photonics devices.

ACKNOWLEDGMENTS

The work was performed within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project № FEWM-2022-0004 "Research and development of manufacturing methods for integrated optical waveguides and elements based on them").

PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is also grateful for their consent to publish papers on the journal's website and SEL eLibrary eLIBRARY.RU.

Declaration of Competing Interest. The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.