



Исследование интегрально-оптического ключа для создания логического элемента, управляемого термическим воздействием на слой $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST)

А. С. Кадочкин, В. В. Амеличев, С. С. Генералов, Д. В. Горелов
НПК «Технологический центр», г. Зеленоград, г. Москва, Россия

Представлены результаты модельной экспериментальной оценки возможности управления с помощью внешнего термического воздействия интегрально-оптическим ключом, выполненным в виде кольцевого микрорезонатора с наложенным фазопеременным слоем $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST). Быстрый и обратимый фазовый переход между двумя состояниями – аморфным (a-GST) и кристаллическим (c-GST) – сопровождается большой разностью показателей преломления, что может быть использовано в оптических схемах для реализации логических функций.

Ключевые слова: интегрально-оптический ключ, микрорезонатор, слой GST, логический элемент, оптический резонанс

Статья поступила: 04.10.2023

Статья принята: 31.10.2023

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных путей развития информационных технологий является применение оптических методов обработки информационных сигналов. Оптические методы обладают многочисленными преимуществами по сравнению с электронными: скорость распространения

Study of Integrated Optical Switch for Development of Logical Element Controlled by the Thermal Influence on $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ Layer (GST)

A. S. Kadochkin, V. V. Amelichev, S. S. Generalov, D. V. Gorelov
Research and Production Complex "Technological Center",
Zelenograd, Moscow, Russia

The alternating phase layer $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST) demonstrates a significant refractive index difference between the amorphous (a-GST) and crystalline (c-GST) states. The fast and reversible phase transition between the two states allows for high speed and thermal stability of integrated optical devices. The paper presents a study of an integrated optical switch based on an annular microresonator with a superimposed GST layer controlled by the thermal influence. Such switches may be used in the optical circuits to implement logic functions.

Key words: integrated optical switch, microresonator, GST layer, logical element, optical resonance

Article received: 04.10.2023

Article accepted: 31.10.2023

INTRODUCTION

One of the promising ways of information technology development is the use of optical methods for information signal processing. The optical methods have numerous advantages over the electronic ones, such as signal propagation velocity, possible multiplexing and parallel data processing. To implement the optoelectronic devices designed for optical data processing, it is required to develop both the passive elements of integrated optical cir-

сигнала, возможность мультиплексирования и параллельной обработки информации. Для реализации оптоэлектронных устройств, предназначенных для обработки оптической информации, необходима разработка как пассивных элементов интегрально-оптических схем – волноводов, разветвителей, поляризационных фильтров, пассивных логических элементов, так и активных логических элементов, управляемых внешним воздействием – оптических ключей, являющихся оптическим аналогом транзисторов, работающих в режиме переключения сигналов.

В работе [1] предложены реализации таких устройств, использующих механизм инжекции носителей для переключения состояний в кольцевом резонаторе при помощи внешнего воздействия. Такое воздействие так или иначе основано на изменении эффективного показателя преломления моды, распространяющейся в резонаторе, и может быть осуществлено при помощи инжекции носителей заряда [2], электрооптического [3] или магнитооптического эффекта [4]. Имеется ряд работ [5], в которых предлагается использование так называемых «фазопеременных» (phase-changing) материалов. В работе [6] для изменения эффективного показателя преломления моды кремниевого микрорезонатора предложено использование материала $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST), наложенного на участок кольцевого микрорезонатора, применяемый в виде тонких пленок GST в технологии оптической записи информации. Такое применение GST обусловлено возможностью протекания в данном материале сверхбыстрых обратимых фазовых превращений (<50 нс), которые происходят между аморфным (a-GST) и кристаллическим (c-GST) состояниями и сопровождаются существенным изменением оптических свойств и удельного электрического сопротивления [1]. Показатель преломления (n) и коэффициент экстинкции (k) являются одними из основных оптических характеристик любого материала. В тонких пленках GST значения этих коэффициентов для a-GST и c-GST сильно различаются (рис. 1).

cuits, such as the waveguides, splitters, polarizing filters, passive logical elements, and the active logical elements controlled by the external influences, including the optical switches being an optical analogue of transistors operating in the signal switching mode.

The paper [1] proposed the implementations of such devices using the carrier injection mechanism to change the states in an annular resonator using an external influence. In some way or another, such an influence is based on a change in the efficient refractive index of the mode propagating in the resonator, and can be performed using the charge carrier injection [2], electro-optical [3] or magneto-optical effects [4]. There are a number of papers [5] that propose an application of so-called phase-changing materials. In [6], to change the efficient mode refractive index of a silicon microresonator, it is proposed to use $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST) material applied to a section of an annular microresonator, used in the form of GST thin films in the optical data recording technology. This GST application is due to the possible ultrafast reversible phase transformations (<50 ns) in this mate-

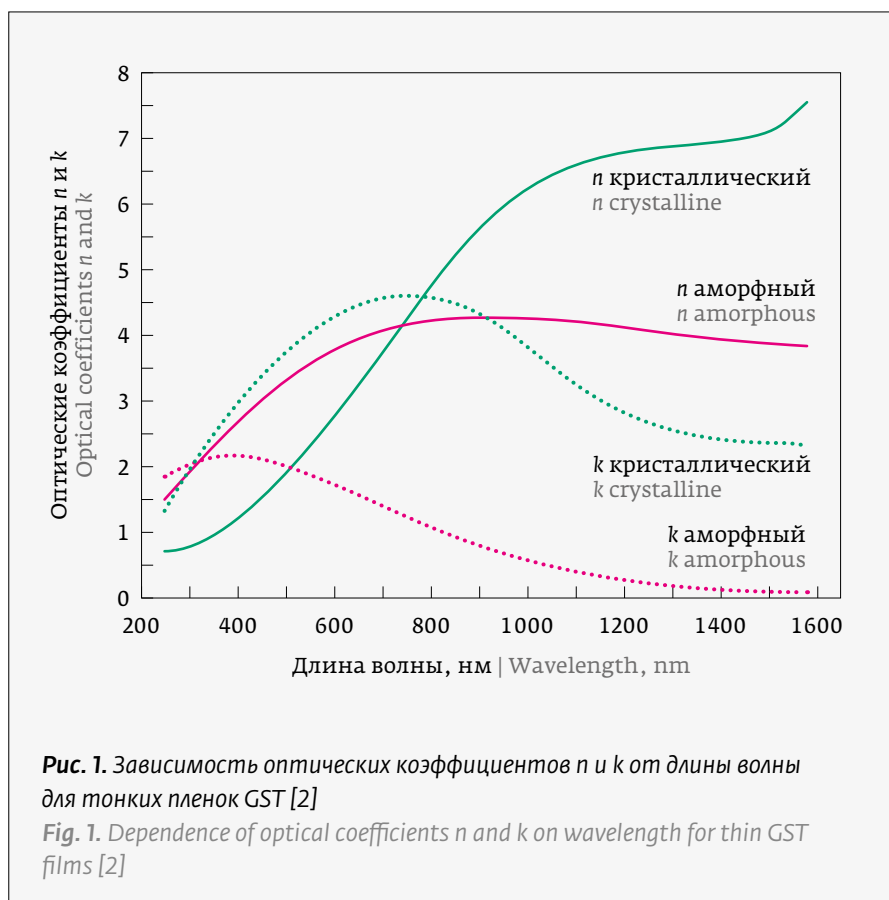


Рис. 1. Зависимость оптических коэффициентов n и k от длины волны для тонких пленок GST [2]

Fig. 1. Dependence of optical coefficients n and k on wavelength for thin GST films [2]

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ С GST ПОКРЫТИЕМ

На рис. 2 показан общий вид исследованного элемента интегрально-оптической схемы типа «ключ» на основе кольцевого микрорезонатора с сформированным слоем GST. Вставка на рисунке показывает распределение TE_0 моды в сечении волновода с наложенным слоем из c-GST и a-GST. В работе [6] сообщается об экспериментальной реализации управляемых кольцевых микрорезонаторов на основе кремния (Si). В отличие от работы [6] в работе [7] в качестве материала резонатора был выбран нитрид кремния (Si_3N_4).

На сегодняшний день существуют разные материалы для создания элементов интегральной фотоники, каждая из которых имеет свои плюсы и минусы, связанные с наличием или отсутствием необходимых характеристик, требуемых для решения конкретных задач. Выбор Si_3N_4 обусловлен широким рабочим спектральным диапазоном длин волн, хорошими механическими свойствами, низкими собственными потерями (менее 0,3 дБ/см), отсутствием двухфотонного поглощения в телекоммуникационном диапазоне длин волн, что позволяет достигать высокой плотности оптической мощности внутри волновода. На рис. 3 показана схема исследованного кольцевого микрорезонатора с наложенным сегментом GST 90 градусов. Элемент представляет собой кольцевой микрорезонатор из Si_3N_4 , сформированный на подложке из оксида кремния (SiO_2). Поверх кольцевого микрорезонатора наложен 90-градусный сегмент из слоя GST (красный цвет), который может быть в a-GST или c-GST состоянии. При этом нагрев может осуществляться в зависимости от конструктивных требований, как при помощи внешнего оптического источника (импульсного лазера), так и при помощи расположенного сверху электрического нагревателя.

Возможность управления свойствами мод микрорезонатора основана на том, что при используемой толщине резонатора ($d_1=300$ нм) и длине волны (1,55 мкм) распространяющаяся мода не может быть полностью локализована в сечении резонатора, значительная часть ее энергии локализована вне его сечения в виде эванесцентных (экспоненциально

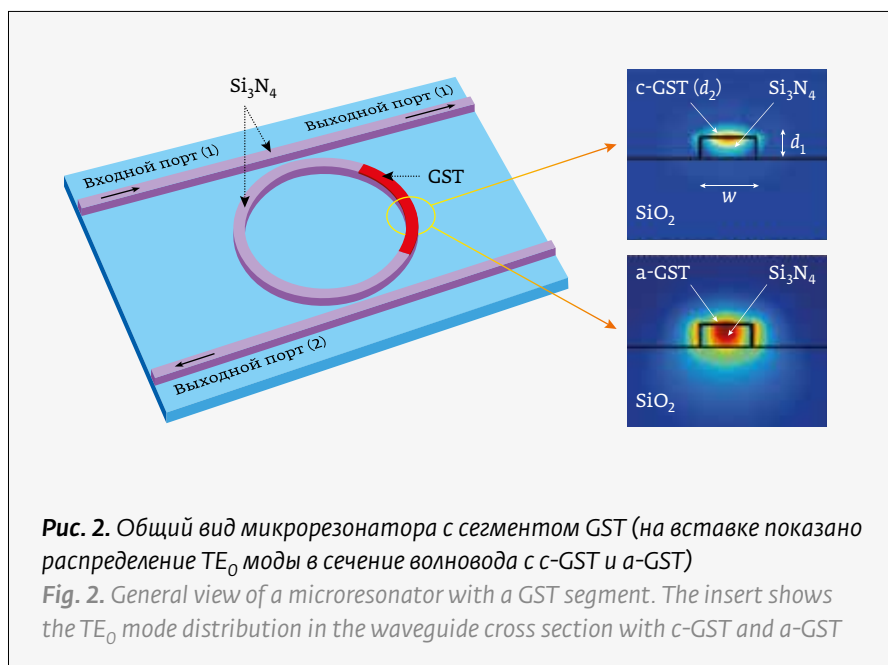


Рис. 2. Общий вид микрорезонатора с сегментом GST (на вставке показано распределение TE_0 моды в сечении волновода с c-GST и a-GST)

Fig. 2. General view of a microresonator with a GST segment. The insert shows the TE_0 mode distribution in the waveguide cross section with c-GST and a-GST

material that occur between the amorphous (a-GST) and crystalline (c-GST) states and are accompanied by a significant change in the optical properties and electrical resistivity [1]. The refractive index (n) and extinction coefficient (k) represent the main optical specifications of any material. In thin GST films, these coefficient values for a-GST and c-GST are widely different (Figure 1).

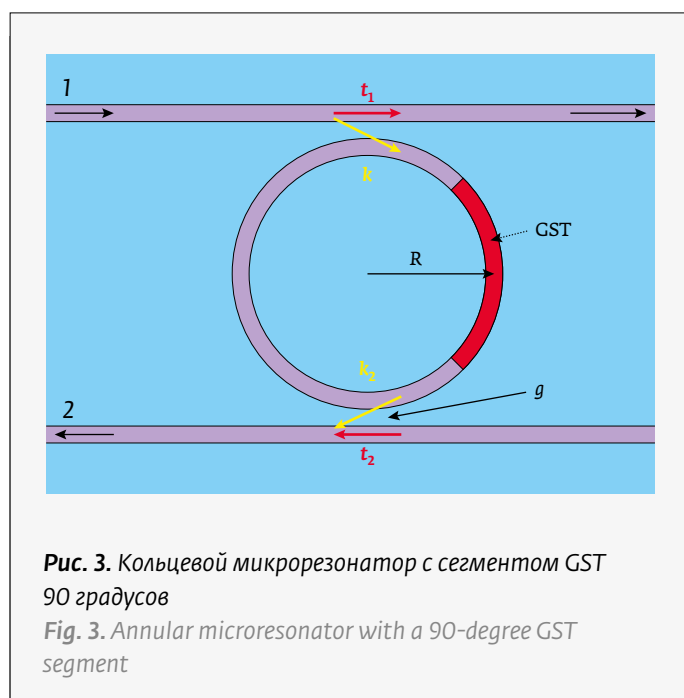


Рис. 3. Кольцевой микрорезонатор с сегментом GST 90 градусов

Fig. 3. Annular microresonator with a 90-degree GST segment

Таблица. Геометрические параметры модели микрорезонатора
Table. Geometric parameters of the microresonator model

| Радиус R, мкм Radius R, μm | Зазор g, мкм Clearance g, μm | Ширина w, мкм Width w, μm | Толщина d_1 , мкм Thickness d_1 , μm | Толщина GST d_2 , мкм GST thickness d_2 , μm |
|-------------------------------|---------------------------------|------------------------------|---|---|
| 3,1 | 0,3 | 0,6 | 0,3 | 0,02 |

затухающих) «хвостов». Поэтому помещение в эту область слоя GST с оптическими свойствами, сильно отличающимися от оптических свойств волновода и окружающей его среды, приводит к изменению эффективного показателя преломления мод волновода. Следует также отметить, что с-GST обладает значительным поглощением, тогда как у а-GST поглощение на телекоммуникационной длине волны около 1,55 мкм близко к нулю (рис. 1). Таким образом, микрорезонатор с наложенным сегментом из а-GST (рис. 2) может поддерживать резонанс с высокой добротностью, а после переключения в с-GST эффективный показатель преломления моды приобретает значительную мнимую часть и резонанс подавляется. При этом существенно меняется сигнал на выходах микрорезонатора, что делает возможным использование такого устройства в качестве переключателя.

ANALYSIS OF OPTICAL SWITCH WITH THE GST COATING

Figure 2 shows a general view of the studied element of a switch-type integrated optical circuit based on an annular microresonator with a generate GST layer. The figure insert demonstrates distribution of the TE_0 mode in the waveguide cross section with a superimposed layer of c-GST and a-GST. The paper [6] reports on the experimental implementation of controlled annular microresonators based on silicon (Si). In contrast to the paper [6] in paper [7] silicon nitride (Si_3N_4) has been selected as the resonator material.

At present, there are various materials for development of the integrated photonics elements, each of which has its own benefits and considerations related to the presence or absence of the necessary specifications required to solve specific problems.

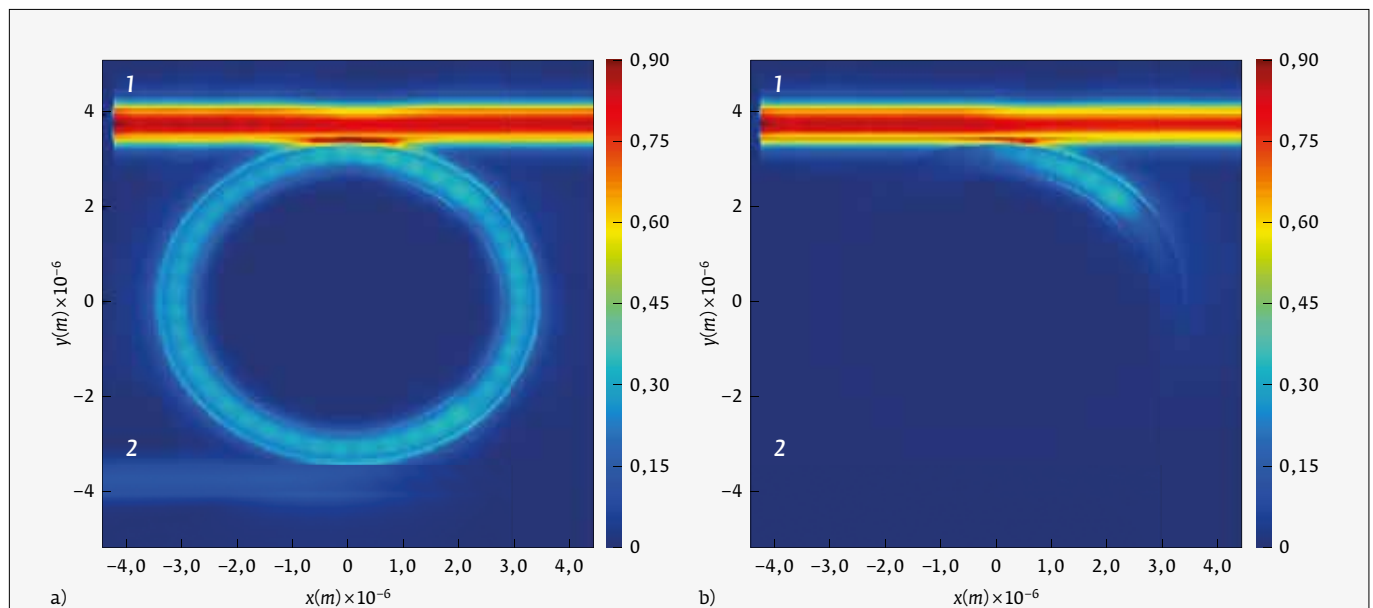


Рис. 4. Распределение напряженности электрического поля $|E|$ для TE_0 моды в кольцевом микрорезонаторе с сегментом GST 90 градусов: а – управляющий элемент из а-GST; б – управляющий элемент из с-GST

Fig. 4. Distribution of electric field strength $|E|$ for TE_0 mode in the annular microresonator with a 90-degree GST segment: a – control element made of a-GST; b – control element made of c-GST

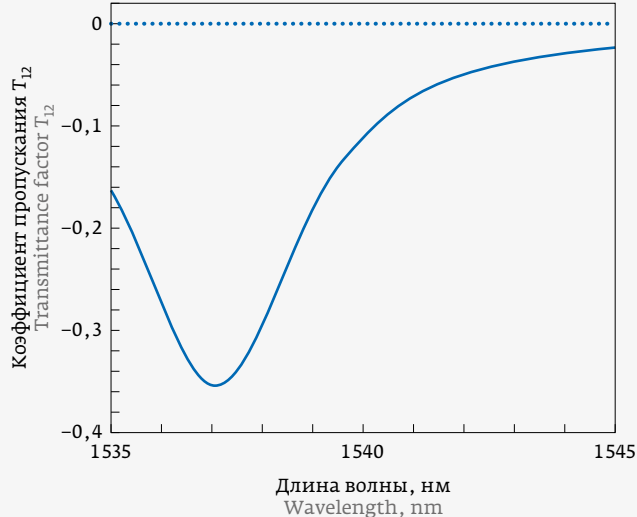


Рис. 5. Коэффициент отражения сигнала от кольцевого микрорезонатора с сегментом GST 90 градусов (сплошная линия – управляющий элемент из a-GST, пунктирная линия – управляющий элемент из c-GST)
Fig. 5. Signal reflection coefficient from the annular microresonator with a 90-degree GST segment (solid line – control element made of a-GST, dotted line – control element made of c-GST)

Геометрические параметры модели микрорезонатора представлены в таблице.

Проведено моделирование методом конечных временных разностей (FDTD) микрорезонатора из Si_3N_4 с управляющим элементом из GST. Параметры моделируемой структуры представлены в таблице. На рис. 4 и 5 приведены результаты моделирования. На рис. 4 показаны распределения напряженностей электрических полей $|E|$ для TE_0 моды в кольцевом микрорезонаторе. На рис. 5 приведена зависимость коэффициента отражения сигнала от кольцевого микрорезонатора (коэффициент пропускания T_{12}) от длины волны.

Из рисунка 5 видно, что наибольшее значение коэффициента отражения от кольцевого микрорезонатора T_{12} в случае a-GST составляет 35%, тогда как отражение от кольцевого резонатора в случае c-GST стремится к нулю.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРА НАЛОЖЕННОГО СЕГМЕНТА GST

Аналогичные расчеты были проведены для сегментов GST 180 и 360 градусов (рис. 6-8 и 9-11).

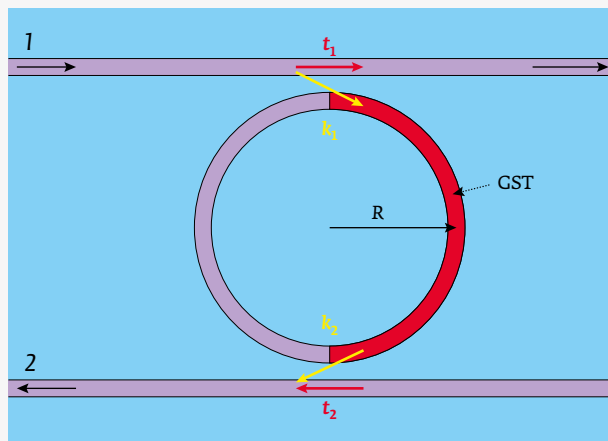
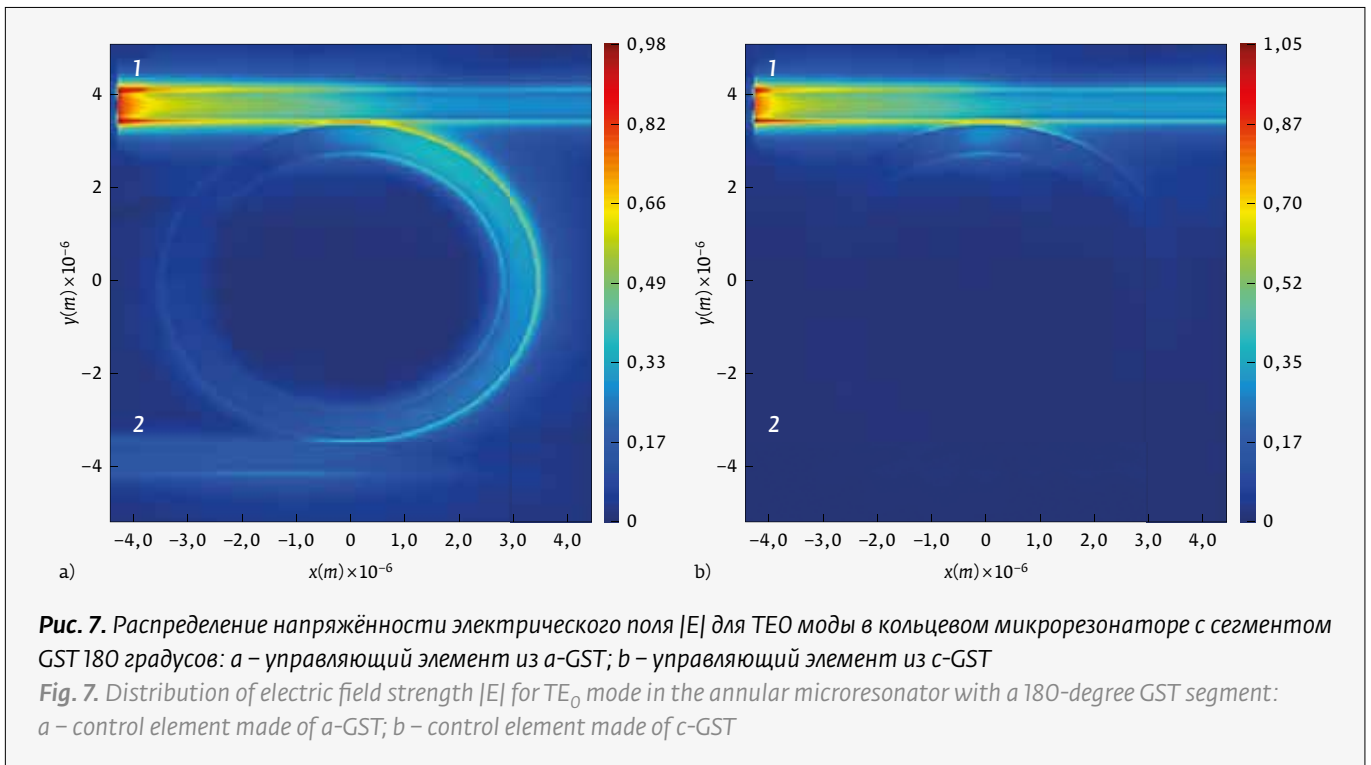


Рис. 6. Микрорезонатор с сегментом GST 180 градусов
Fig. 6. Micro-annular resonator with a 180-degree GST segment

The selection of Si_3N_4 is due to the wide operating spectral range of wavelengths, good mechanical properties, low intrinsic losses (less than 0.3 dB/cm), absence of two-photon absorption in the telecommunications wavelength range that makes it possible to achieve the high optical power density inside the waveguide. Figure 3 shows the schematic view of the studied annular microresonator with a superimposed 90° GST segment. The element is an annular microresonator made of Si_3N_4 generated on a silicon oxide (SiO_2) substrate. A 90° GST layer segment (red) is placed on top of the annular microresonator and can be in the a-GST or c-GST state. In this case, the heating process can be performed depending on the design requirements, either using an external optical source (impulse laser) or an electric heater located on top.

The ability to control the microresonator mode properties is based on the fact that with the used resonator thickness ($d_1 = 300$ nm) and wavelength ($1.55 \mu\text{m}$), the propagating mode cannot be completely localized in the resonator's cross section; a significant part of its energy is localized outside its cross section in the form of evanescent (exponentially decaying) "tails". Therefore, a GST layer placement in this region with the optical properties that are widely different from the optical properties of the waveguide and its surrounding environment leads to a change in the efficient refractive index of the waveguide modes. It



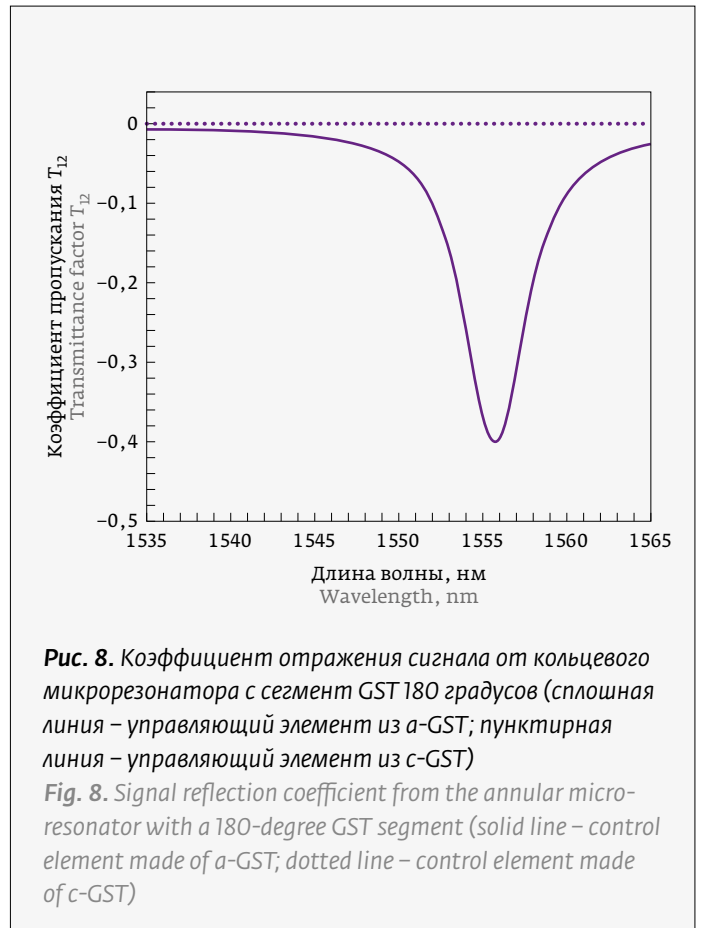
РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Полученные зависимости на рис. 4, 7 и 10 позволяют сделать следующее заключение: в случае c-GST (рис. 4а, 7а, 10а) пропускание выходного порта 2 близко к нулю, в случае a-GST (рис. 4б, 7б, 10б) пропускание выходного порта 2 имеет резонансный характер (так же как и в отсутствие слоя GST) и достигает значения нескольких десятков процентов. Это, по-видимому, связано с сильным поглощением в материале c-GST (см. рис. 4) и малым поглощением в a-GST.

Кроме того, получена зависимость от величины сегмента GST (рис. 5, 8, 11) – большая величина сегмента (угловая мера в градусах) обеспечивает лучшее пропускание (до 100% в случае полного сегмента в 360 градусов) для a-GST. По-видимому, это связано с рассеянием моды кольцевого микрорезонатора на сегменте из GST, наложенном сверху на резонатор, это рассеяние уменьшается в случае увеличения сегмента и полностью отсутствует в случае полного кольца, что обеспечивает полное пропускание (см. рис. 11). Таким образом, полное кольцо (сегмент 360 градусов) обеспечивает лучший контраст логического «0» и «1» на выходном порте 2.

ВЫВОДЫ

Новизной данной работы является выбор в качестве материала резонатора пленки Si_3N_4 в комбинации



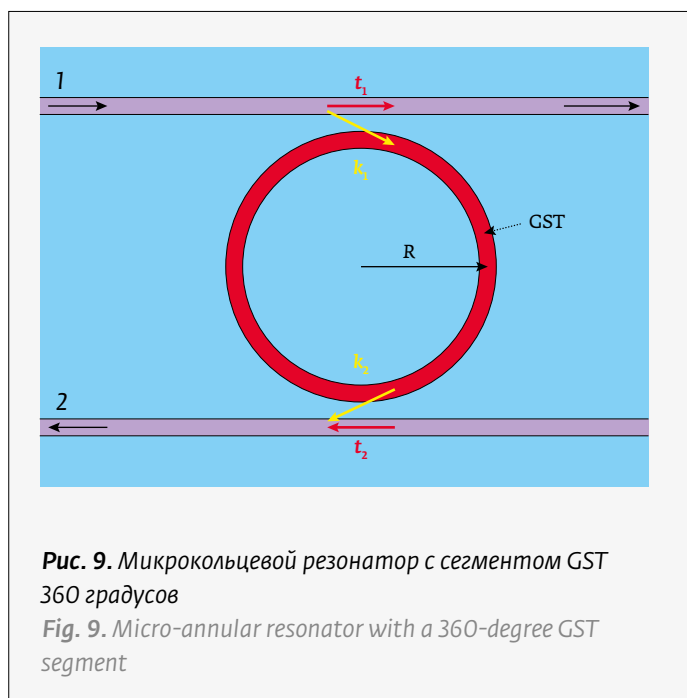


Рис. 9. Микрокольцевой резонатор с сегментом GST 360 градусов
Fig. 9. Micro-annular resonator with a 360-degree GST segment

should also be noted that c-GST has the significant absorption properties, whereas a-GST has close to zero absorption at the telecommunications wavelength around $1.55 \mu\text{m}$ (Figure 1). Thus, the microresonator with a superimposed a-GST segment (Figure 2) can maintain a high-Q resonance, and after switching to c-GST, the efficient mode refractive index obtains a significant imaginary part and the resonance is suppressed. In this case, the signal at the microresonator outputs is changed significantly that makes it possible to use such a device as a switch. The geometric parameters of the microresonator model are given in Table.

A finite difference time domain (FDTD) method is used to simulate the Si_3N_4 microresonator with a GST control element. The simulated structure parameters are given in Table 1. Figures 4 and 5 demonstrate the simulation results. Figure 4 shows distribution of the electric field strengths $|E|$ for TE_0 mode in the annular microresonator. Figure 5 demonstrates dependence of the signal reflection factor from the annular microresonator (transmittance factor T_{12}) on the wavelength.

с пленкой из GST. Данный выбор обусловлен широким рабочим спектральным диапазоном длин волн, хорошими механическими свойствами Si_3N_4 , низкими собственными потерями (менее 0,3 дБ/см)

It can be seen on Figure 5 that the highest reflection coefficient value from the annular microresonator T_{12} in the case of a-GST is 35%, while the

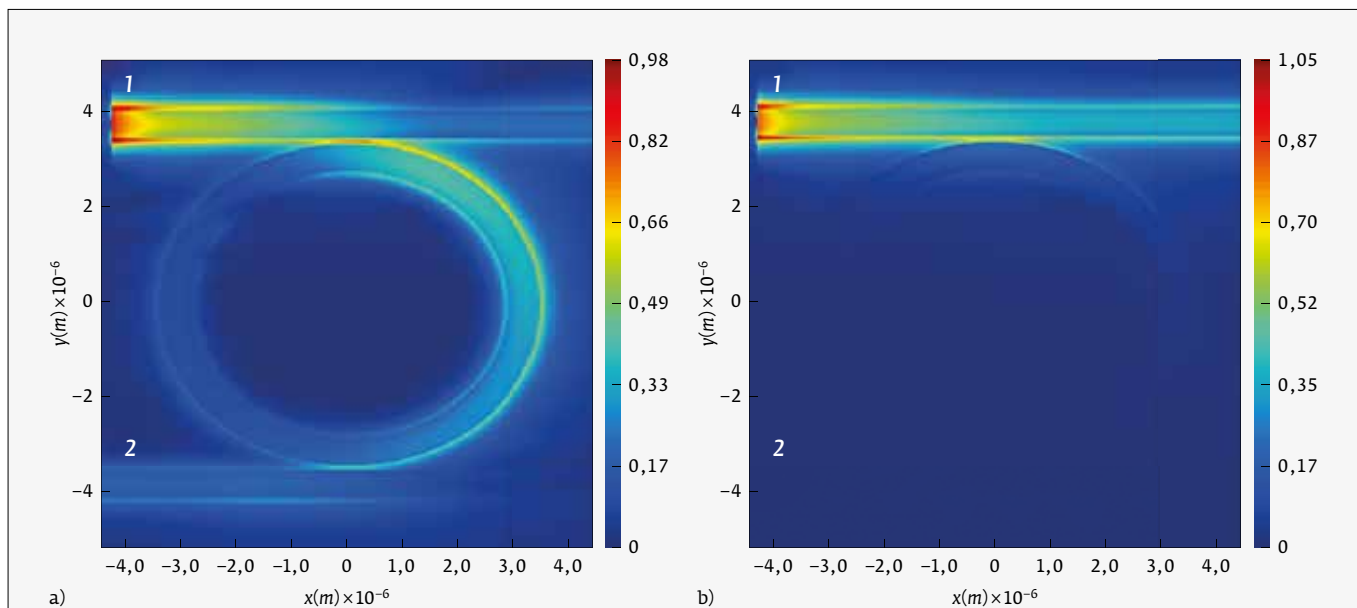
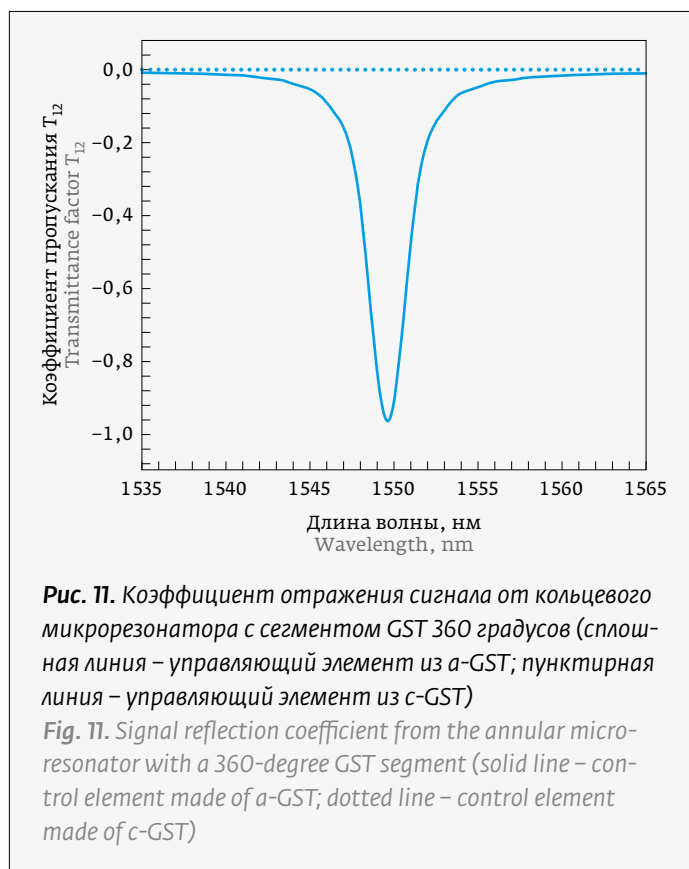


Рис. 10. Распределение напряженность электрического поля $|E|$ для TE_0 моды в кольцевом микрорезонаторе с сегментом GST 360 градусов: а – управляющий элемент из a-GST; б – управляющий элемент из c-GST
Fig. 10. Distribution of electric field strength $|E|$ for TE_0 mode in the annular microresonator with a 360-degree GST segment: a – control element made of a-GST; b – control element made of c-GST



и отсутствием двухфотонного поглощения в телекоммуникационном диапазоне длин волн. Изменяя фазовое состояние пленки из GST, можно переключать сигнал выходного порта 2 (т.е. есть явно различимые логический «0» и логическая «1»). Увеличение пропускания выходного порта 2 при увеличении размера сегмента GST улучшает различимость логического «0» и логической «1».

Положительным свойством материала GST для использования в устройстве типа «ключ» является существенное поглощение для c-GST и практически полное отсутствие поглощения в a-GST. Это обеспечивает подавление резонанса в кольцевом микрорезонаторе в первом случае и присутствие резонансного режима во втором (практически, как и в микрорезонаторе без покрытия из GST). В первом случае это обеспечивает отсутствие пропускания, а во втором обеспечивает высокое пропускание. Переключение между состоянием GST осуществляется нагревом (лазер, электрический нагрев), является обратимым и стабильным во времени.

Таким образом, в результате моделирования установлено, что применение пленки GST над областью микрорезонатора из пленки Si₃N₄

reflection from the annular resonator in the case of c-GST tends towards zero.

IMPACT ASSESSMENT OF THE GST OVERLAY SEGMENT SIZE

Similar calculations have been performed for the GST 180 and 360 degree segments (Figures 6–8 and 9–11).

RESULTS AND DISCUSSION

The obtained dependencies shown in Figures 4, 7 and 10 allow to draw the following conclusion: in the case of c-GST (Figures 4a, 7a, 10a) the transmission of the output port No.2 is close to zero; in the case of a-GST (Figures 4b, 7b, 10b) the transmission of the output port No. 2 has a resonant nature (the same as in the absence of GST layer) and reaches a value of several tens of percent. This appears to be due to the strong absorption in the c-GST material (see Figure 4) and low absorption in a-GST.

In addition, a dependence on the GST segment size has been obtained (Figures 5, 8, 11) – a larger segment size (angular measure in degrees) provides better transmission (up to 100% in the case of a full 360-degree segment) for a-GST. This appears to be due to the mode dissipation of annular microresonator on the GST segment placed on top of the resonator. This dissipation is decreased as the segment increases and is completely absent in the case of a full ring, allowing complete transmission (see Figure 11). Thus, a full ring (a 360-degree segment) provides better contrast between logical “0” and “1” at the output port No.2.

CONCLUSION

The novelty of this paper is selection of the Si₃N₄ film in combination with a GST film as the resonator material. This selection is due to the wide operating spectral wavelength range, good mechanical properties of Si₃N₄, low intrinsic losses (less than 0.3 dB/cm) and absence of two-photon absorption in the telecommunications wavelength range. By changing the phase state of the GST film, it is possible to switch the output port No. 2 signal (i. e., there is a clearly distinguishable logical “0” and logical “1”). The enhanced throughput of the output port No.2 as the GST segment size is increased improves the discrimination between logical “0” and logical “1”.

A positive property of GST material for application in the switch-type device is significant absorption for c-GST and nearly total absence of absorption for



позволяет реализовывать функции логических элементов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Настоящая статья подготовлена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках выполнения НИР FNRМ-2022-0007.

REFERENCES

1. **Kizhakkakath F., Ravindran S.** Microring resonator based optical logic gates. *ISSS Journal of Micro and Smart Systems*. 2022;11(1): 295–316. <https://doi.org/10.1007/s41683-022-00107-7>.
2. **Sakib M. et al.** A high-speed micro-ring modulator for next generation energy-efficient optical networks beyond 100 Gbaud. *CLEO: Science and Innovations. Optica Publishing Group*. 2021. C. SFIC. 3. https://doi.org/10.1364/CLEO_SI.2021.SFIC.3.
3. **Chen L. et al.** Hybrid silicon and lithium niobate electro-optical ring modulator. *Optica*. 2014; 1(2): 112–118. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.1.000112>.
4. **Carvalho W. O. F., Mejia-Salazar J. R.** Magneto-optical micro-ring resonators for dynamic tuning of add/drop channels in dense wavelength division multiplexing applications. *Optics Letters*. 2021; 46(10): 2396–2399. <https://doi.org/10.1364/OL.425595>.
5. **Parra J. et al.** Impact of GST thickness on GST-loaded silicon waveguides for optimal optical switching. *Scientific Reports*. 2022; 12 (1): 9774. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13848-0>.
6. **Zheng J. et al.** GST-on-silicon hybrid nanophotonic integrated circuits: a non-volatile quasi-continuously reprogrammable platform. *Optical Materials Express*. 2018; 8(6): 1551–1561. <https://doi.org/10.1364/OME.8.001551>.
7. **X. Wang, M. Kuwahara, K. Awazu, P. Fons, J. Tominaga, Y. Ohki.** Proposal of a grating-based optical reflection switch using phase change materials. *Optics express*. 2009; 17(19): 16947–16956. <https://doi.org/10.1364/oe.17.016947>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

- A. С. Кадочкин – к. ф.-м. н., старший научный сотрудник отдела МСТ ФГБун «НПК «Технологический центр», Москва, Зеленоград, Россия.
ORCID: 0000-0002-7960-1583
- B. В. Амеличев – к. т. н., начальник отдела МСТ ФГБун «НПК «Технологический центр», Москва, Зеленоград, Россия.
ORCID: 0000-0002-4204-2626
- C. С. Генералов – начальник НИЛ НМЭМС отдела МСТ ФГБун «НПК «Технологический центр», Москва, Зеленоград, Россия.
ORCID: 0000-0002-7455-7800
- D. В. Горелов – начальник НИЛ ИОМС отдела МСТ ФГБун «НПК «Технологический центр», Москва, Зеленоград, Россия.
ORCID: 0000-0002-0887-9406

ВКЛАД АВТОРОВ

Статья подготовлена на основе работы всех членов авторского коллектива: А. С. Кадочкин – проведение расчетов, анализ собранных данных, обработка и обсуждение результатов; В. В. Амеличев – организация работы, обсуждение результатов; С. С. Генералов – организация работы, обсуждение результатов; Д. В. Горелов – поиск и перевод иностранных источников, обсуждение результатов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Все авторы приняли участие в написании рукописи в части вклада каждого из них в работу и согласны с полным текстом рукописи.

a-GST. This fact ensures the resonance quenching in the annular microresonator in the first case and availability of a resonance condition in the second case (practically the same as in the microresonator without a GST coating). In the first case, this provides the lack of transmission, and in the second case, it provides high transmission. Switching between the GST status is performed by heating (laser, electrical heating), is reversible and stable over time.

Thus, as a result of simulation, it has been established that the application of a GST film over the microresonator region of a Si₃N₄ film makes it possible to implement the functions of logical elements.

ACKNOWLEDGMENT

This article has been prepared with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as a part of the research work FNRМ-2022-0007.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

- A. S. Kadochkin, Cand. of Sciences (Phyth.&Math.), senior researcher of the microsystems engineering department of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Scientific and Production Complex "Technological Center", Moscow, Zelenograd, Russia.
ORCID: 0000-0002-7960-1583
- V. V. Amelichev, Cand. of Sciences (Eng.), head of the microsystems engineering department of the "Scientific and Production Complex "Technological Center", Moscow, Zelenograd, Russia.
ORCID: 0000-0002-4204-2626
- S. S. Generalov, head of the research laboratory for nano- and micromechanical systems, microsystems engineering department of the "Scientific and Production Complex "Technological Center", Moscow, Zelenograd, Russia.
ORCID: 0000-0002-7455-7800
- D. V. Gorelov, head of the research laboratory for integrated microcircuits, microsystems engineering department of the "Scientific and Production Complex "Technological Center" Moscow, Zelenograd, Russia.
ORCID: 0000-0002-0887-9406

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The article has been prepared based on the work of all authoring team members: A. S. Kadochkin – provision of calculations, collected data analysis, processing and discussion; V. V. Amelichev – work arrangement, discussion; S. S. Generalov – work arrangement, discussion; D. V. Gorelov – search and translation of foreign references, discussion.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest. All authors have participated in the manuscript preparation in terms of their contribution to the work and agree with the full text of the manuscript.

19–20 марта 2024 г. | Омск

XXV СИБИРСКИЙ ПРОМЫШЛЕННО-ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ

ПРОМТЕХЭКСПО • 2024

В объединённой экспозиции:

- Машиностроение. Металлообработка. Сварка. Инструмент.
- Автоматизация. Радиоэлектроника. Приборостроение.
- Метрология. Измерения. Диагностика.
- Омскгазнефтехим. Экология.
- Энергосиб. СибмашТЭК.
- Индустрия безопасности. Связь. ИТ-решения. Цифровизация.
- Промышленная робототехника. Аддитивные технологии. Композитные материалы.
- Наука. Образование. Кадры.
- Финансовые услуги.
- Рекламные услуги. Продвижение. Маркетинг.