УДК 539.216.2 *Краткое сообщение*

Моделирование распространения излучения в элементе фотонной интегральной схемы на основе нитрида кремния и селенида цинка и переключаемой пленки фазоизменяемого материала

А.А. Бурцев[1], В.В. Ионин[1], А.В. Киселев[1], А.А. Невзоров[1,2], В.А. Михалевский[1], Н.Н. Елисеев[1], А.А. Лотин[1]

[1]ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, 1
[2]ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, Россия, Москва, ул. Орджоникидзе, 8/9
murrkiss2009@yandex.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.354

Аннотация: В работе проведено сравнение двух технологических платформ для создания фотонных интегральных схем: на основе нитрида кремния и селенида цинка. На основе данных моделирования показано изменение пропускания волноводов из исследуемых материалов при переключении активного элемента – ячейки из фазоизменяемого материала $Ge_2Sb_2Te_5$. Сравнение двух волноводных платформ с интегрированным слоем фазоизменяемого материала выявляет принципиальные различия в физике модуляции, обусловленные выбором рабочей длины волны. Для волновода из нитрида кремния (ближний инфракрасный диапазон) характерна сильная локализация поля вблизи границы раздела сред и возбуждение нескольких гибридных мод, часть из которых имеет плазмон-поляритонную природу. Это приводит к сверхлинейной зависимости потерь от толщины активной плёнки фазоизменяемого материала и требует точной оптимизации её толщины (20 нм) для достижения максимального контраста (246%). В то же время для волновода из селенида цинка (средний и дальний инфракрасный диапазон) плазмонный вклад ослаблен, модовый состав обеднён (близок к одномодовому), а потери возрастают квазилинейно с увеличением толщины плёнки. Это обеспечивает более широкий диапазон допустимых толщин активных управляемых элементов (20-50 нм) и стабильные модуляционные характеристики (контраст до 112%).

Ключевые слова: фотонные интегральные схемы, оптические волноводы, фазоизменяемые материалы, тонкие пленки.

Бурцев Антон Андреевич – научный сотрудник ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
Ионин Виталий Вячеславович – научный сотрудник ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
Киселев Алексей Владимирович – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
Невзоров Алексей Алексеевич – к.ф.-м.н., научный сотрудник ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», научный сотрудник лаборатории фотонных газовых сенсоров ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
Михалевский Владимир Александрович – научный сотрудник ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
Елисеев Николай Николаевич – младший научный сотрудник ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
Лотин Андрей Анатольевич – д.т.н., заместитель руководителя отделения, ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

© А.А. Бурцев, В.В. Ионин, А.В. Киселев, А.А. Невзоров, В.А. Михалевский, Н.Н. Елисеев, А.А. Лотин, 2026

Short Communication

Modeling of light propagation in silicon nitride and zinc selenide photonic integrated circuit elements with a switchable phase-change material film

A.A. Burtsev[1], V.V. Ionin[1], A.V. Kiselev[1], A.A. Nevzorov[1,2], V.A. Mikhalevsky[1], N.N. Eliseev[1], A.A. Lotin[1]

[1]*National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

[2]*University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.354

Abstract: This work presents a comparative analysis of two technological platforms for photonic integrated circuits: silicon nitride (Si_3N_4) and zinc selenide ($ZnSe$). Using numerical modeling, we demonstrate transmission characteristics of waveguides made of these materials upon switching of an active $Ge_2Sb_2Te_5$ phase-change cell. Comparison of the two waveguide platforms with an integrated phase-change layer reveals fundamental differences in modulation physics, governed by the choice of operating wavelength. The silicon nitride waveguide (near-infrared range) exhibits strong field localization near the interface and supports several hybrid modes, some of plasmon-polariton nature. This results in a superlinear dependence of losses on the active film thickness, requiring precise optimization (20 nm) to achieve maximum contrast (246%). In contrast, the zinc selenide waveguide (mid- and far-infrared range) shows a reduced plasmonic contribution, a depleted modal composition (close to single-mode), and a quasi-linear increase in losses with film thickness. This provides a wider range of permissible active film thicknesses (20-50 nm) and stable modulation characteristics (contrast up to 112%).

Keywords: photonic integrated circuits, optical waveguides, phase-change materials, thin films.

Anton A. Burtsev – Researcher, National Research Centre «Kurchatov Institute», ORCID: 0000-0003-0280-7943

Vitaly V. Ionin – Researcher, National Research Centre «Kurchatov Institute», ORCID: 0000-0002-1253-2261

Alexey V. Kiselev – Ph. D., Senior Researcher, National Research Centre «Kurchatov Institute», ORCID: 0000-0003-0292-9553

Alexey A. Nevzorov – Ph. D., Researcher, National Research Centre «Kurchatov Institute», Researcher at Laboratory of Photonic Gas Sensors, University of Science and Technology MISIS, ORCID: 0000-0001-5602-6355

Vladimir A. Mikhalevsky – Researcher, National Research Centre «Kurchatov Institute», ORCID: 0000-0002-6234-1084

Nikolay N. Eliseev – Junior Researcher, National Research Centre «Kurchatov Institute», ORCID: 0000-0002-8864-3961

Andrey A. Lotin – Dr. Sc, Deputy Head of the branch, National Research Centre «Kurchatov Institute», ORCID: 0000-0001-9051-7158

Поступила в редакцию/received: 30.07.2026; после рецензирования/revised: 04.09.2026; принята/accepted: 10.09.2026.

1. Введение

В последние годы наблюдается усиление конкуренции между электроникой и фотоникой в решении широкого круга задач: от визуализации и телекоммуникаций до методов исследования и медицинской диагностики [1]. Несмотря на впечатляющий прогресс электроники в области обработки, хранения данных и выполнения логических операций, фотонные платформы сохраняют предпочтение в сфере передачи информации, главным образом благодаря более высокой скорости и пропускной способности [2, 3]. Для достижения высокой степени интеграции и возможности перепрограммирования фотоника должна развиваться в направлении миниатюрных систем нового

поколения, включающих реконфигурируемые платформы с регулируемыми свойствами, которые обеспечивают полный контроль над характеристиками фотонов в оптических устройствах.

Фотонные интегральные схемы, совместимые с КМОП-технологией (КМОП – комплементарная металл-оксид-полупроводниковая структура), за последнее десятилетие претерпели существенные изменения [4]. Особый интерес представляет платформа на основе нитрида кремния (Si_3N_4), которая благодаря ряду преимуществ перед традиционными кремниевыми ФИС привлекает всё большее внимание. К числу ключевых достоинств Si_3N_4 относятся широкое окно прозрачности (от видимого до среднего инфракрасного диапазона), низкие оптические потери (менее 0,1 дБ/см), требуемые механические свойства и значительно меньшие нелинейные потери, обусловленные двухфотонным поглощением [5]. Эти особенности делают нитрид кремния предпочтительной платформой для приложений, требующих высокой оптической мощности, широкополосной работы и интеграции с активными материалами [6].

Перспективным направлением развития ФИС является расширение рабочего диапазона в дальнюю инфракрасную область ($\lambda > 5$ мкм), что открывает возможности для молекулярной спектроскопии, термографии и астрономических наблюдений [7]. Однако стандартные материалы кремниевой и нитрид-кремниевой фотоники имеют существенные ограничения в этом диапазоне: высокое поглощение в материале обкладки (SiO_2) на длинах волн свыше 3,5 мкм и многофононное поглощение в самом Si_3N_4 [5]. В качестве альтернативы для дальнего ИК-диапазона активно исследуются волноводы на основе селенида цинка ($ZnSe$). Благодаря широкому окну прозрачности (до 20 мкм) и показателю и низким потерям (на уровне 10^{-4}–10^{-5} дБ/см), $ZnSe$ позволяет создавать волноводы с высокой эффективностью удержания моды [8, 9].

Среди существующих подходов наиболее перспективным для создания реконфигурируемых оптических устройств является интеграция фазоизменяемых материалов (ФИМ), в особенности халькогенидных сплавов, с нанофотонными платформами. Это обусловлено их уникальной способностью надежно и воспроизводимо переключать оптические и электрические характеристики в течение миллиардов циклов [10-14]. В работе [15] представлены схемы конфигурации устройства, в котором фазоизменяемый материал ($Ge_2Sb_2Te_5$ или GST) наносится поверх оптического волновода из нитрида кремния. В отличие от детектирования отражённых сигналов, применяемого в оптических дисках, в данной схеме запись информации осуществляется непосредственно через величину оптического пропускания волновода, управляемую

нераспространяющимися импульсами. Кристаллическая фаза *GST* характеризуется более сильным поглощением и ослаблением света по сравнению с аморфной, что приводит к снижению пропускания по волноводу [16, 17].

В работе проведено сравнительное моделирование двух волноводных платформ с интегрированной ячейкой *GST*, различающихся рабочим спектральным диапазоном: нитрид кремния (Si_3N_4) – ближний инфракрасный диапазон (λ = 1,55 мкм), селенид цинка ($ZnSe$) – дальний инфракрасный диапазон (λ = 10 мкм). Такой выбор обусловлен тем, что оптические свойства *GST*, включая его диэлектрическую проницаемость и коэффициент экстинкции, существенно зависят от длины волны: в ближнем ИК-диапазоне кристаллическая фаза *GST* характеризуется высоким поглощением ($k \approx 0{,}8$), тогда как в дальнем ИК-диапазоне поглощение значительно ниже. Это позволяет оценить эффективность *GST* как активного модулятора в различных спектральных окнах прозрачности атмосферы и телекоммуникационных стандартов.

2. Методы математического моделирования и теоретического анализа

С целью оценки возможности использования тонкой пленки ФИМ в качестве активного модулятора проходящего излучения для двух фотонных платформ было проведено моделирование в среде MATLAB. Моделирование позволяет проводить валидацию разрабатываемых оптических систем на основе экспериментальных данных и теоретических положений. Однако в случае протяженных оптических структур, характерные размеры которых значительно превышают длину волны электромагнитного излучения, применение традиционных методов моделирования сопряжено с высокой вычислительной сложностью и значительными временными затратами. Модель учитывает распространение излучения в планарных волноводах на основе нитрида кремния Si_3N_4 и селенида цинка $ZnSe$, поверх которых нанесена тонкая пленка *GST*. При моделировании принимается во внимание контраст оптических свойств пленки в различных спектральных диапазонах: для нитрида кремния – в ближнем инфракрасном ИК-диапазоне (λ = 1,55 мкм), для селенида цинка – в дальнем ИК-диапазоне (λ = 10 мкм).

Распространение электромагнитных волн в диэлектрическом волноводе описывается волновым уравнением [18]. Для гармонических во времени полей оно сводится к уравнению Гельмгольца для электрического поля E:

$$\nabla^2 E + k_0^2 n^2(r) E = 0, \qquad (1)$$

где: ∇^2 – оператор Лапласа, $k_0 = 2\pi/\lambda$ – волновое число в вакууме,

$n(r)$ – пространственно-зависимый комплексный показатель преломления среды, λ – длина волны в вакууме.

В используемой модели уравнение (1) преобразуется к виду:

$$HE = \beta^2 E, \tag{2}$$

где $H = -\nabla^2 + k_0^2 n^2(r)$, а β – постоянная распространения моды.

Для численного решения используется пятиточечная схема дискретизации двумерного оператора Лапласа на равномерной сетке с заданными шагами. Из дискретизированного уравнения Гельмгольца формируется матрица, решение которой на собственные значения описывает постоянные распространения для каждой моды, и соответствующие им собственные векторы (профили полей) [19]. Постоянная распространения β представляется в виде:

$$\beta = \beta_{real} + i\beta_{image} \tag{3}$$

Эффективный показатель преломления моды определяется как:

$$n_{eff} = \frac{\beta_{real}}{k_0} \tag{4}$$

Коэффициент затухания (и потерь) α (в дБ/м) связан с мнимой частью β соотношением:

$$\alpha = i\beta_{image} \frac{20}{\ln(10)} \tag{5}$$

Пропускание волновода длиной L описывается законом Бугера – Ламберта – Бера:

$$T = e^{-\alpha L}. \tag{6}$$

Контраст пропускания волновода при различном структурном (кристаллическим и аморфным) состоянии пленки ФИМ рассчитывается по формуле:

$$C = \frac{T_{am} - T_{cr}}{T_{cr}} \times 100\% \tag{7}$$

3. Результаты и обсуждение

Проведённое моделирование показывает, что для платформы Si_3N_4 с интегрированным слоем *GST* критически важным фактором, определяющим эффективность модуляции, является толщина слоя ФИМ (см. рис. 1). Её увеличение приводит к усилению вклада высших гибридных мод, локализованных вблизи границы раздела, что сопровождается резким возрастанием потерь, рассеяния и снижением контраста пропускания. Оптимальная толщина *GST* для обеспечения высокого контраста ($C > 200\%$) при приемлемых потерях ($\alpha < 25$ дБ/мм) составляет около 20 нм. Рекомендуется при дальнейшей экспериментальной реализации использовать одномодовый режим

возбуждения для минимизации влияния высших мод и обеспечения воспроизводимости результатов.

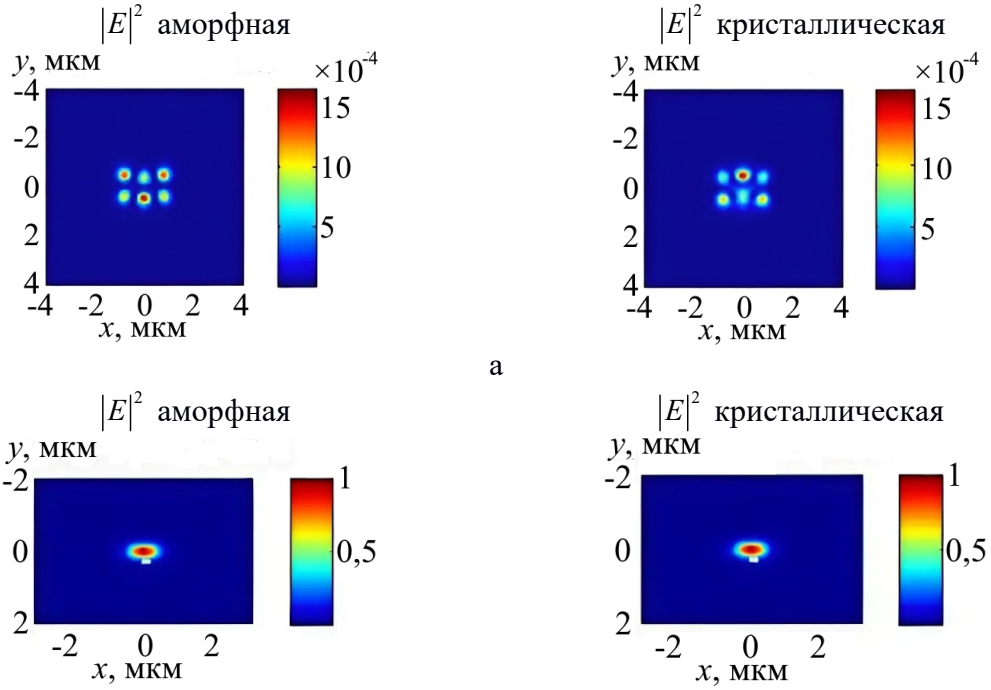

Рис. 1. Модовый состав излучения волновода Si_3N_4 при различных структурных состояниях пленки ФИМ для двух толщин пленки: 50 нм (а) и 20 нм (б).

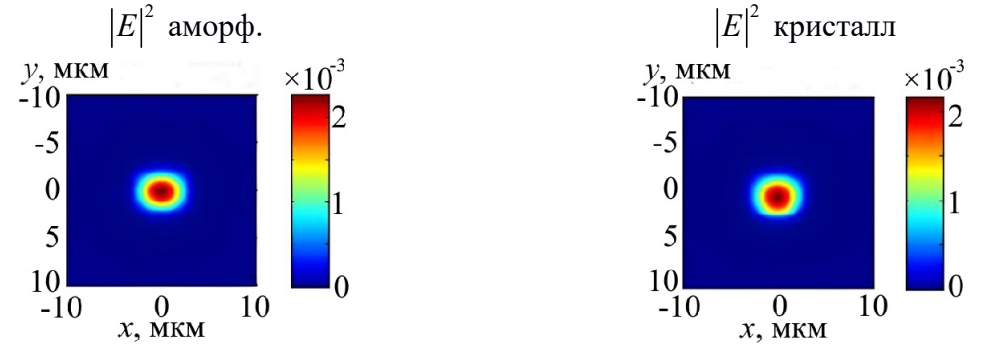

Рис. 2. Модовый состав излучения волновода $ZnSe$ при различных структурных состояниях пленки ФИМ толщиной 50 нм.

При увеличении толщины пленки ФИМ из-за вклада высших гибридных мод возрастают потери и уменьшается контраст пропускания волновода Si_3N_4: с 248% до 138%.

Для платформы $ZnSe$ при кристаллизации пленки GST аналогичные потери увеличиваются с 0,39 до 15,43 дБ/мм, пропускание снижается с 98,1% до 46,2%, а контраст C составляет 112%. Существенное различие в контрасте пропускания между двумя платформами объясняется различной длиной волны зондирующего излучения. На $\lambda = 1{,}55$ мкм кристаллический

GST демонстрирует ярко выраженное плазмоноподобное поведение с высокой мнимой частью постоянной распространения, что приводит к сильной локализации поля вблизи границы раздела и, как следствие, к экстремально высоким потерям [20, 21]. На $\lambda = 10$ мкм поглощение *GST* существенно ниже, поэтому локализация поля ослаблена, а потери определяются в основном объёмным поглощением в слое ФИМ и рассеянием на границах. При этом применение в качестве платформы волноводы из *ZnSe* позволяет использовать пленки большей толщины, обеспечивая стабильный одномодовый режим (см. рис. 2).

4. Заключение

На основе данных численного моделирования были проанализированы особенности модуляции оптического излучения волноводах из Si_3N_4 и *ZnSe* с управлением активной области на основе тонкой пленки фазоизменяемого материала *GST* .

Сравнение двух волноводных платформ с интегрированным слоем *GST* выявляет принципиальные различия в физике модуляции, обусловленные выбором рабочей длины волны. Для Si_3N_4 (λ = 1,55 мкм) характерна сильная локализация поля вблизи границы раздела и возбуждение нескольких гибридных мод, часть из которых имеет плазмон-поляритонную природу. Это приводит к сверхлинейной зависимости потерь от толщины *GST* и требует точной оптимизации толщины (20 нм) для достижения максимального контраста (246%). В то же время для *ZnSe* (λ = 10 мкм) плазмонный вклад ослаблен, модовый состав обеднён (близок к одномодовому), а потери возрастают квазилинейно с увеличением толщины пленки. Это обеспечивает более широкий диапазон допустимых толщин (20-50 нм) и стабильные модуляционные характеристики (контраст до 112%).

Полученные результаты показывают, что выбор платформы должен определяться требуемыми характеристиками модуляции и спектральным диапазоном: Si_3N_4 предпочтителен для высококонтрастных телекоммуникационных приложений, тогда как *ZnSe* открывает возможности для создания реконфигурируемых устройств в дальней ИК-области, где требования к точности толщины менее критичны.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт».

Библиографический список:

1. **Atabaki, A.H.** Integrating photonics with silicon nanoelectronics for the next generation of systems on a chip / A. H. Atabaki, S. Moazeni, F. Pavanello et al. // Nature. – 2018. – V. 556. – I. 7701. – P. 349-354. DOI: 10.1038/s41586-018-0028-z.

2. **Thomson, D.** Roadmap on silicon photonics / D. Thomson, A. Zilkie, J. E. Bowers et al. // Journal of Optics. – 2016. – V. 18. – I. 7. – Art. № 073003. – 20 p. DOI: 10.1088/2040-8978/18/7/073003.
3. **Shekhar, S.** Roadmapping the next generation of silicon photonics / S. Shekhar, W. Bogaerts, L. Chrostowski et. al. // Nature Communications. – 2024. – V. 15. – Art. № 751. – 15 p. DOI: 10.1038/s41467-024-44750-0.
4. **Liu, Q.** Progress in passive silicon photonic devices: a review / Q. Liu, Y. Bian, J. Xiong // Photonics. – 2025. – V. 12. – I. 9. – Art. № 928. – 27 p. DOI: 10.3390/photonics12090928.
5. **Blumenthal, D.J.** Silicon nitride in silicon photonics / D.J. Blumenthal, R. Heideman, D. Geuzebroek, et al.//Proceedings of the IEEE. – 2018. – V. 106. – I. 12. – P. 2209-2231. DOI: 10.1109/JPROC.2018.2861576.
6. **Sharma, T.** Review of recent progress on silicon nitride-based photonic integrated circuits / T. Sharma, J. Wang, B.K. Kaushik et. al. // IEEE Access. – 2020. – V. 8. – P. 195436-195446. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3032186.
7. **Urick , V.J.** Fundamentals of microwave photonics / V.J. Urick, J.D. Mckinney, K.J. Williams. – New York: John Wiley & Sons, 2015. – 496 p. DOI:10.1002/9781119029816.
8. **Rahman, T.** Synthesis of ZnSe thin films by solution-processed spin coating method for photonic integration applications / T. Rahman, M.A.H. Pappu, B.K. Mondal et.al. // Journal of Materials Science: Materials in Engineering. – 2025. – V. 20. – I. 1. – Art. № 71. – 12 p. DOI: 10.1186/s40712-025-00299-4.
9. **Ren, D.** Low-loss hybrid germanium-on-zinc selenide waveguides in the longwave infrared / D. Ren, C. Dong, J. Høvik, et. al. //Nanophotonics. – 2024. – V. 13. – I. 10. – P. 1815-1822. DOI: 10.1515/nanoph-2023-0698.
10. Phase change materials: science and applications / ed. by S. Raoux, M. Wutting. – New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2009. – 450 p. DOI: 10.1007/978-0-387-84874-7.
11. **Kolobov, A.V.** Chalcogenides: metastability and phase change phenomena / A.V. Kolobov, J. Tominaga. – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. – XVI, 284 p. DOI: 10.1007/978-3-642-28705-3.
12. **Abdollahramezani, S.** Tunable nanophotonics enabled by chalcogenide phase-change materials / S. Abdollahramezani, O. Hemmatyar, H. Taghinejad et al.// Nanophotonics. – 2020. – V. 9. – I. 5. – P. 1189-1241. DOI: 10.1515/nanoph-2020-0039.
13. **Guo, P.** A review of germanium-antimony-telluride phase change materials for non-volatile memories and optical modulators / P. Guo, A.M. Sarangan, I. Agha // Applied Sciences. – 2019. – V. 9. – I. 3. – Art. № 530. – 26 p. DOI: 10.3390/app9030530.
14. **Козюхин, С.А.** Материалы фазовой памяти и их применение / С.А. Козюхин, П.И. Лазаренко, А.И. Попов, И.Л. Еременко // Успехи химии. – 2022. – Т. 91. – Вып. 9. – Статья № RCR5033. – 39 с. DOI: 10.1070/RCR5033.
15. **Han, S.-T.** Photo-electroactive non-volatile memories for data storage and neuromorphic computing / S-T. Han, Y. Zhou. – Duxford: Woodhead Publishing, 2020. – 352 p. DOI: 10.1016/C2019-0-00530-4.
16. **Wuttig, M.** Phase-change materials for rewriteable data storage / M. Wuttig, N. Yamada // Nature materials. – 2010. – V. 6. – I. 11. – P. 824-832. DOI: 10.1038/nmat2009.
17. **Ionin, V.V.** An optical synapse based on a polymer waveguide with a GST_{225} active layer / V.V. Ionin, A.V. Kiselev, A.A. Burtsev et al //Applied Physics Letters. – 2021. – V. 119. – I. 8. – Art. № 081105. – 5 p. DOI: 10.1063/5.0063349.
18. **Kawano, K.** Introduction to optical waveguide analysis: solving Maxwell's equation and the Schrodinger equation / K Kawano, T Kitoh. – New York: John Wiley & Sons, 2001. – XIII+275 p. DOI: 10.1002/0471221600.
19**. Kalluri, D.K.** Electromagnetic waves, materials, and computation with MATLAB / D.K. Kalluri. – Boca Raton: CRC Press, 2012. – 886 p. DOI: 10.1201/b11793.
20. **Shalaev, V.M.** Optical negative-index metamaterials / V.M. Shalaev // Nature Photonics. – 2007. – V. 1. – P. 41-48. DOI: 10.1038/nphoton.2006.49.
21. **Maier, S.A.** Plasmonics: fundamentals and applications / S.A. Maier. – New York: Springer, 2007. – XXVI+224 p. DOI: 10.1007/0-387-37825-1.

References:

1. Atabaki A.H., Moazeni S., Pavanello F., et al. Integrating photonics with silicon nanoelectronics for the next generation of systems on a chip, *Nature*, 2018, vol. 556, issue. 7701, pp. 349-354. DOI: 10.1038/s41586-018-0028-z.
2. Thomson D., Zilkie A., Bowers J. E. et al. Roadmap on silicon photonics, *Journal of Optics*, 2016, vol. 18, issue 7, art. no. 073003, 20 p. DOI: 10.1088/2040-8978/18/7/073003.
3. Shekhar S, Bogaerts W., Chrostowski L. et. al. Roadmapping the next generation of silicon photonics, *Nature Communications*, 2024, vol. 15, art. no. 751, 15 p. DOI: 10.1038/s41467-024-44750-0.

4. Liu Q., Bian Y., Xiong J. Progress in passive silicon photonic devices: a review, *Photonics*, 2025, vol. 12, issue 9, art. no. 928, 27 p. DOI: 10.3390/photonics12090928.
5. Blumenthal D.J., Heideman R., Geuzebroek D. et al. Silicon nitride in silicon photonics, *Proceedings of the IEEE*, 2018, vol. 106, issue 12, pp. 2209-2231. DOI: 10.1109/JPROC.2018.2861576.
6. Sharma T., Wang J., Kaushik B.K. et. al. Review of recent progress on silicon nitride-based photonic integrated circuits, *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 195436-195446. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3032186.
7. Urick V.J., Mckinney J.D., Williams K.J. *Fundamentals of microwave photonics*. New York: John Wiley & Sons, 2015, 496 p. DOI:10.1002/9781119029816.
8. Rahman T., Pappu M.A.H., Mondal B.K. et.al. Synthesis of ZnSe thin films by solution-processed spin coating method for photonic integration applications, *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*, 2025, vol. 20, issue 1, art. no. 71, 12 p. DOI: 10.1186/s40712-025-00299-4.
9. Ren D., Dong C., Høvik J., et. al. Low-loss hybrid germanium-on-zinc selenide waveguides in the longwave infrared, *Nanophotonics*, 2024, vol. 13, issue 10, pp. 1815-1822. DOI: 10.1515/nanoph-2023-0698.
10. *Phase change materials: science and applications*, ed. by S. Raoux and M. Wutting. New York, Springer Science+Business Media, LLC, 2009, 450 p. DOI: 10.1007/978-0-387-84874-7.
11. Kolobov A.V., Tominaga J. *Chalcogenides: metastability and phase change phenomena*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2012, XVI, 284 p. DOI: 10.1007/978-3-642-28705-3.
12. Abdollahramezani S., Hemmatyar O., Taghinejad H. et al. Tunable nanophotonics enabled by chalcogenide phase-change materials, *Nanophotonics*, 2020, vol. 9, issue 5, pp. 1189-1241. DOI: 10.1515/nanoph-2020-0039.
13. Guo P., Sarangan A. M., Agha I. A review of germanium-antimony-telluride phase change materials for non-volatile memories and optical modulators, *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, issue 3, art. no. 530, 26 p. DOI: 10.3390/app9030530.
14. Kozyukhin S.A., Lazarenko P.I., Popov A.I., Eremenko I.L. Phase change memory materials and their applications, *Russian Chemical Reviews*, 2022, vol. 91, issue 9, art. no. RCR5033, 37 p. DOI: 10.1070/RCR5033.
15. Han S.-T., Zhou Y. *Photo-electroactive non-volatile memories for data storage and neuromorphic computing*. Duxford: Woodhead Publishing, 2020, 352 p. DOI: 10.1016/C2019-0-00530-4.
16. Wuttig M., Yamada N. Phase-change materials for rewriteable data storage, *Nature materials*, 2007, vol. 6, issue 11, pp. 824-832. DOI: 10.1038/nmat2009.
17. Ionin V.V., Kiselev A.V., Burtsev A.A. et al. An optical synapse based on a polymer waveguide with a GST_{225} active layer, *Applied Physics Letters*, 2021, vol. 119, issue 8, art. no. 081105, 5 p. DOI: 10.1063/5.0063349.
18. Kawano K, Kitoh T. *Introduction to optical waveguide analysis: solving Maxwell's equation and the Schrodinger equation*. New York: John Wiley & Sons, 2001, XIII+275 p. DOI: 10.1002/0471221600.
19. Kalluri D.K. *Electromagnetic waves, materials, and computation with MATLAB*. Boca Raton, CRC Press, 2012, 886 p. DOI: 10.1201/b11793.
20. Shalaev V.M. Optical negative-index metamaterials, *Nature Photonics*, 2007, vol. 1, pp. 41-48. DOI: 10.1038/nphoton.2006.49.
21. Maier S.A. *Plasmonics: fundamentals and applications*. New York, Springer, 2007, XXVI+224 p. DOI: 10.1007/0-387-37825-1.