

УДК539.216.2

Оригинальная статья

Моделирование распространения излучения в фотонной интегральной схеме на основе полимерного волновода и наночастиц фазоизменяемого материала

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

ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, 1
murrkiss2009@yandex.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.351

Аннотация: В работе представлены результаты численного моделирования распространения оптического излучения в волноводе из полимера *SU-8* и модуляции сигнала при разном фазовом состоянии массива наночастиц фазоизменяемого материала *Ge₂Sb₂Te₅* (*GST*). Показано, как модулируется проходящее излучение для разного количества наночастиц при расположении сверху и на торце волновода. Результаты моделирования показывают, что помимо влияния фазовых состояний (кристаллического и амфорного) на свойства проходящего излучения, в случае наночастиц заметную роль играют не только отражение и поглощение, но и рассеяние материала. При увеличении расстояния между наночастицами наблюдается сильное увеличение потерь в волноводе, вызванное ростом рассеяния (потери высокие для обоих фазовых состояний). Продемонстрирована принципиальная возможность управления проходящим через интерфейс оптическим сигналом телекоммуникационного диапазона через переключение оптически-активного элемента на основе наночастиц фазоизменяемого материала. Предложенная в работе концепция создания фотонных интегральных схем является самой дешевой из всех известных планарных технологий создания волноводных устройств и позволяет реализовать вычислительные элементы и архитектуры на их основе с высокой степенью гетерогенной интеграции.

Ключевые слова: фотонные интегральные схемы, оптические волноводы, полимеры, фазоизменяемые материалы, халькогениды, наночастицы.

1. Введение

Бурное развитие фотоники в последние десятилетия связано с разработкой оптической памяти и оптических вычислительных устройств нового поколения, функционал которых основан на принципах работы биологических нейронов. Наиболее заметные успехи в реализации этой идеи были достигнуты при использовании фазоизменяемых материалов (ФИМ), таких как сплав *Ge₂Sb₂Te₅* (*GST*) [1]. Значительный контраст оптических свойств, характерных для аморфной и кристаллической фаз, а также высокие скорости изменения таких свойств делают этот материал наиболее перспективным на сегодняшний день для многих фотонных и оптоэлектронных приложений [2, 3]. Возможность переключать как между конечными (аморфным и кристаллическим), так и промежуточными (представляющими собой смесь двух фаз) фазовыми состояниями при воздействии короткими оптическими или электрическими импульсами

обеспечивает многоуровневую функциональность и возможность предпорогового накопления энергии в устройстве [4].

Параллельно с развитием технологий изготовления оптических планарных волноводов шел поиск методов и архитектур, способных обеспечить платформу для создания модулей хранения данных и полностью оптических вычислений. Передача информации оптическими средствами весьма желательна из-за практически неограниченной полосы пропускания, высокой помехоустойчивости и возможности мультиплексирования [5]. Для обеспечения высокой скорости обработки параллельных потоков данных нежелательно преобразовывать данные в электрические сигналы [6]. Материалы, используемые в настоящее время в интегральной оптике, не идеальны для активного управления. С другой стороны, оптические свойства халькогенидных ФИМ можно настраивать и в сочетании с фотонными интегральными схемами (ФИС) можно использовать для изготовления оптических фильтров и модулей памяти.

В книге [7] приводятся схемы конфигурации устройства, в которой ФИМ наносится поверх оптического волновода из нитрида кремния. Вместо обнаружения сигналов отражения, как на оптическом диске, информация записывается непосредственно через величину оптического пропускания по волноводам, управляемую не распространяющимися импульсами. Кристаллический *GST* сильнее поглощает и ослабляет свет по сравнению с аморфным состоянием, что приводит к низкому светопропусканию по волноводу. Несколько лет назад были представлены прототипы полностью оптических нейронных сетей на основе тонких пленок ФИМ и ФИС [8, 9].

Несмотря на достигнутые успехи в экспериментальной реализации прототипов оптических синапсов, создание таких устройств на основе твердотельных оптических волноводов несет в себе ряд технологических трудностей, что обуславливает сложность и дороговизну при производственном внедрении. Интегральная фотоника на основе полимеров предлагает ряд преимуществ по сравнению с кремнием [10]. В интегральной оптике полимеры широко используются, например, для улучшения электрооптических и оптических нелинейных эффектов. Если можно избежать высоких температур при эксплуатации, полимеры представляют собой более дешевую производственную платформу [11]. Замена стандартных полупроводниковых технологий полимерами может дать дополнительные преимущества, такие как гибкость изготовления, надежность, низкое энергопотребление и возможность массового производства, сопровождаемое сокращением производственных затрат.

С другой стороны, известно, что механизм переключения и считывания текущего состояния в ячейке ФИМ определяется

особенностями взаимодействия материала с воздействующим излучением. Хотя полностью фотонная память значительно уменьшает размер ячейки, занимаемая площадь все еще остается большой по сравнению с электронными схемами, что требует дальнейших исследований и улучшений [6]. Указанные проблемы вызывают необходимость анализа новых архитектур и материалов, способных преодолеть текущие ограничения. В частности, использование массивов наночастиц вместо традиционных тонкопленочных элементов открывает новые перспективы за счёт возможности улучшения динамики переключения из-за неоднородной температурной динамики в окрестности каждой наночастицы и материала матрицы [12]. Кроме того, такой подход позволяет обеспечить быстрое остывание частиц ФИМ, что критически важно при переключениях между стабильными состояниями [13, 14].

Ранее авторами был представлен разработанный оптический синапс на основе интерфейса между полимерным волноводом и оптически управляемой тонкой пленкой (50 нм) *GST* [15]. В данной работе проводится моделирование и анализ структуры ФИС, в которой в качестве активного элемента используются наночастицы [16]. Численное моделирование необходимо для предварительного анализа свойств наночастиц различных ФИМ в зависимости от их размера и материалов, внутри (на поверхности) которых они расположены.

2. Методы математического моделирования и теоретического анализа

С целью определения возможности работы наночастиц ФИМ как модуляторов излучения для приложений фотоники было проведено моделирование в среде Comsol MultiPhysics [15, 17]. Моделирование позволяет проводить валидацию разработок оптических систем, опираясь на экспериментальные данные и теорию. Однако в случае больших оптических структур (имеющих размеры, значительно превышающие длину электромагнитных волн) традиционные методы моделирования подразумевают высокую вычислительную сложность и затраты машинного времени.

Первая модель рассматривает прохождение волны внутри планарного волновода, где наночастицы *GST* были высажены на поверхность волновода. Такое расположение наночастиц позволяет решить две задачи: первая – рассматривает возможность использования наночастиц как датчиков для контроля прохождения излучения за счёт рассеивания проходящего света на ней, вторая – модулирование проходящего сигнала в зависимости от состояния частицы, что может соответствовать записи «веса» в синапсе. Расчёт учитывает, как поглощение в наночастице, так и рассеивание электромагнитной волны.

Была использована 2D модель, где параметры волновода – высота и показатель преломления соответствуют изготовленным из полимера $SU-8$ [15]. В волноводе распространяется излучение телекоммуникационного диапазона ($\lambda = 1550$ нм). В модели был использован массив из наночастиц диаметром 200 нм с разным расстоянием между ними. Переключение фазы наночастиц предполагается из свободного пространства.

Вторая модель рассматривает прохождение волны оптического волокна, где наночастицы *GST* были высажены на торец сколотого полимерного волокна. Такое расположение наночастиц решает задачу модуляции излучения что может соответствовать записи «веса» в синапсе. Переключение фазы наночастиц предполагает излучением, проходящим внутри волокна, что соответствует формированию обратной связи в синапсе. Для облегчения расчёта выход излучения произведён в свободное пространство (воздух).

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 и 2 приведены результат расчётов первой модели. На рис. 1 представлено распределение электромагнитного поля в зависимости от расстояния между наночастицами и их фазы. На рис. 2 представлена модуляция сигнала в виде распределения модуля вектора Пойнтинга по расчётной длине волновода.

В модели рассматривается массив из 20 наночастиц диаметром 200 нм. В качестве управляющего параметра анализируется расстояние между ними (400 нм, 800 нм и 1200 нм) и их фазовое состояние (аморфное и кристаллическое). Как видно верхнее расположение наночастиц на волноводе может работать как модулятор, степень модуляции которого будет зависеть как от расположения наночастиц, так и от их фазового состояния.

Видно, что частица выступает как рассеивающий элемент, а также модулятор сигнала. При увеличении расстояния между наночастицами наблюдается сильное увеличение потерь в волноводе, вызванное ростом рассеяния (потери высокие для обоих фазовых состояний). Так же часть излучения фокусируется частицей и может быть зафиксировано, что может быть использовано для получения информации и в зависимости от расположения уровень снимаемой информации может быть разный, что можно использовать как ранее записанный вес для нейроморфных вычислений [6-8].

На рис. 3 и 4 представлены результаты по второй модели. На рис. 3 представлено распределение электромагнитного поля в зависимости от расстояния между наночастицами, их фазы и количества на торце полимерного волновода (справа, показано черной линией).

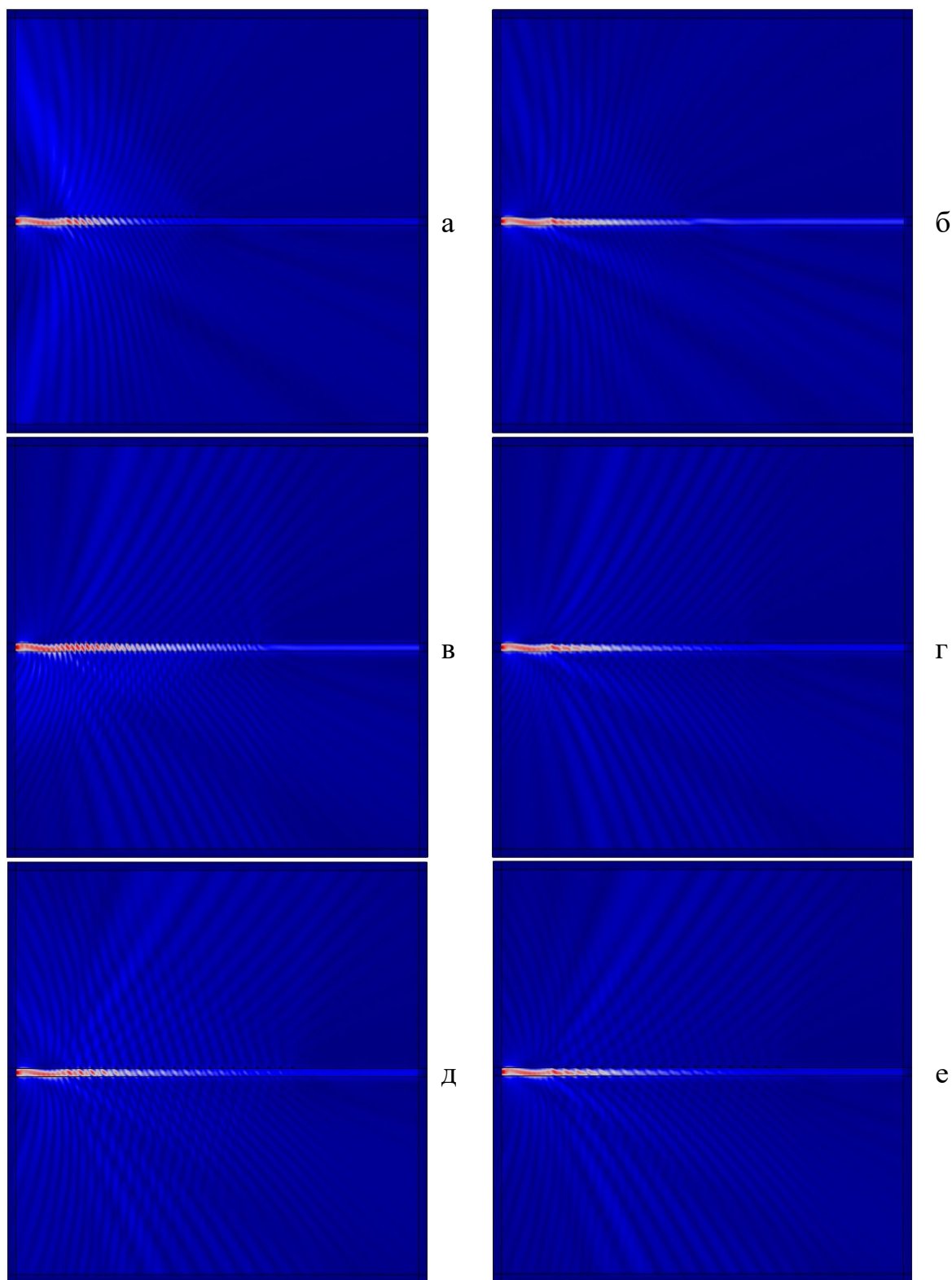


Рис. 1. Распределение электромагнитного поля в зависимости от расстояния между наночастицами и их фазы. а) аморфные наночастицы, расстояние 400 нм, б) кристаллические наночастицы, расстояние 400 нм, в) аморфные наночастицы, расстояние 800 нм, г) кристаллические наночастицы, расстояние 800 нм, д) аморфные наночастицы, расстояние 1200 нм, е) кристаллические наночастицы, расстояние 1200 нм.

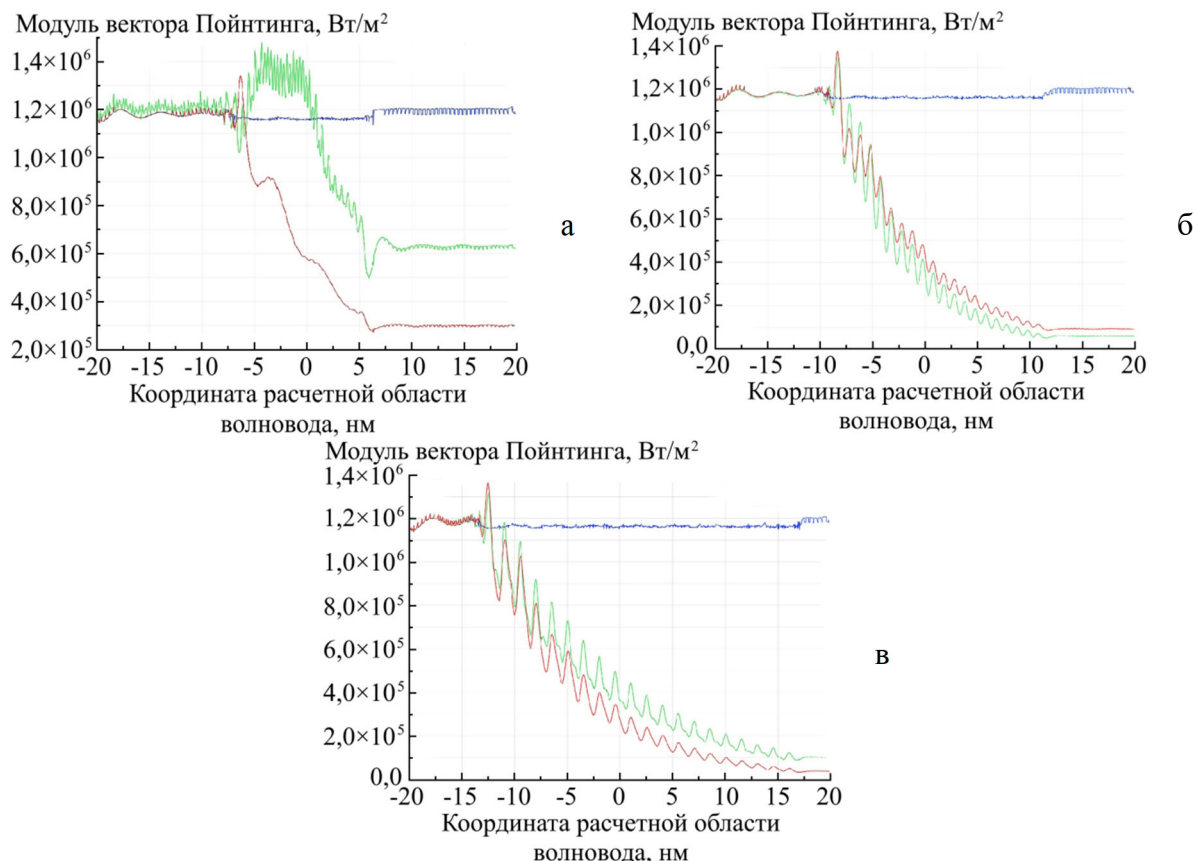


Рис. 2. Распределение модуля вектора Пойнтинга по длине расчётного участка волновода. Синим цветом показано распространение излучения при отсутствии наночастиц, зеленым – при наночастицах в аморфном состоянии, красным – в кристаллическом. а – расстояние между наночастицами 400 нм, б – 800 нм, в – 1200 нм.

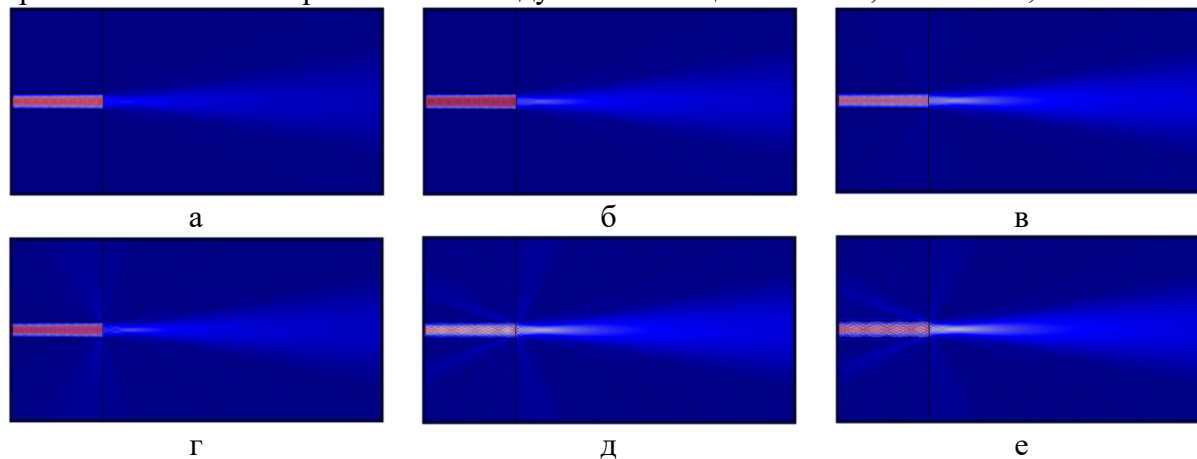


Рис. 3. Распределение электромагнитного поля в зависимости от расстояния между наночастицами (черная линия), их количества и фазы. а) аморфные наночастицы, расстояние 400 нм, б) кристаллические наночастицы, расстояние 400 нм, в) аморфные наночастицы, расстояние 800 нм, г) кристаллические наночастицы, расстояние 800 нм, д) аморфные наночастицы, расстояние 1200 нм, е) кристаллические наночастицы, расстояние 1200 нм,

На рис. 4 представлена модуляция сигнала в виде распределения модуля вектора Пойнтинга. При увеличении расстояния вырастает

модуляция и аналогично пропадает контраст между фазами. Это объясняется увеличением потерь из-за рассеяния на отдельных наночастицах. Установлено, что наночастицы *GST* могут быть использованы как модуляторы проходящего телекоммуникационного сигнала, что позволит использовать их в нейроморфных вычислениях, так и датчиками проходящего излучения, с которых можно снимать проходящую информацию. Эффективную модуляцию проходящего излучения можно обеспечить при относительно близком расположении частиц друг к другу. Управление каждой отдельной частицей обеспечивает более высокую стабильность и точную настройку всей системы [16].

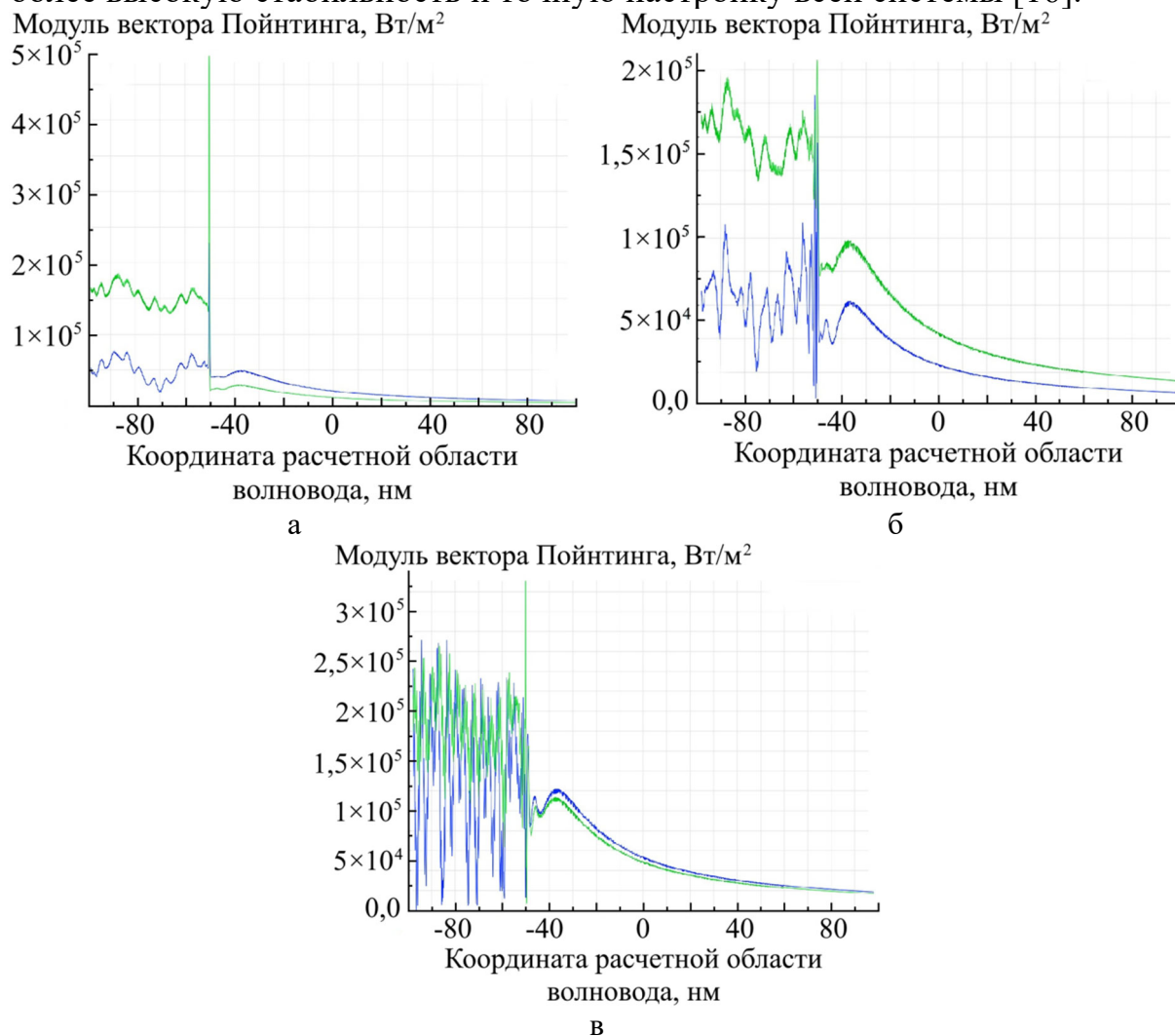


Рис. 4. Распределение модуля вектора Пойнтинга по длине расчётного участка волновода. Синим цветом показано распространение излучения при наночастицах в аморфном состоянии, зеленом — в кристаллическом. а — расстояние между наночастицами 400 нм, б — 800 нм, в — 1200 нм.

4. Заключение

На основе данных численного моделирования были

проанализированы особенности модуляции оптического излучения телекоммуникационного диапазона в полимерном волноводе с управлением активной области на основе массива наночастиц фазоизменяемого материала *GST*. Приведены две схемы расположения массива наночастиц: сверху и на торце волновода. Показано, что при увеличении расстояния между наночастицами растут потери волновода, что вызвано сильным влиянием рассеяния отдельных наночастиц (практически не зависят от фазового состояния).

Использование наночастиц позволяет перейти на более энергоэффективные устройства фотоники для модуляции, обработки и хранения информации, а также получать стабильные перестраиваемые фотонные схемы. Конечно, существует ряд ограничений, которые снижают работоспособность и надёжность устройств на базе ФИМ, но их решение лежит в области совершенствования и оптимизации технологического процесса создания и эффективной интеграции элементов ФИМ. Данные моделирования с последующей верификацией экспериментальными данными, откроют возможность исследовать наноструктуры ФИМ в прикладных задачах фотоники и быстро разрабатывать и тестировать интегральные фотонные схемы на их основе для целей прототипирования и интеграции в промышленное производство.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» и в рамках договора № 075-15-2023-324.

Библиографический список:

1. **Zhang, W.** Designing crystallization in phase-change materials for universal memory and neuro-inspired computing/ W. Zhang, R. Mazzarello, M. Wuttig, E. Ma // *Nature Reviews Materials*. – 2019. – V. 4. – I. 3. – P. 150-168. DOI: 10.1038/s41578-018-0076-x.
2. Phase change materials: science and applications / ed. by S. Raoux, M. Wuttig. – New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2009. – 450 p. DOI: 10.1007/978-0-387-84874-7.
3. **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.
4. **Ovshinsky, S.R.** Optical cognitive information processing—a new field / S.R. Ovshinsky // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2004. – V. 43. – I. 7B. – P. 4695-4699. DOI: 10.1143/JJAP.43.4695.
5. **Lian, C.** Photonic (computational) memories: tunable nanophotonics for data storage and computing / C. Lian, C. Vagionas, T. Alexoudi et. al. // *Nanophotonics*. – 2022. – V. 11. – I. 17. – P. 3823-3854. DOI: 10.1515/nanoph-2022-0089.
6. **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.
7. **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
8. **Feldmann, J.** All-optical spiking neurosynaptic networks with self-learning capabilities / J. Feldmann, N. Youngblood, C.D. Wright et al. // *Nature*. – 2019. – V. 569. – P. 208-214. DOI: 10.1038/s41586-019-1157-8
9. **Yu, T.** All-chalcogenide programmable all-optical deep neural networks / T. Yu, X. Ma, E. Pastor et al. // *arXiv:2102.10398*. – 2021. – 18 p. DOI: 10.48550/arXiv.2102.10398.

10. Sokolov, V.I. Routes to polymer-based photonics / V.I. Sokolov, G.V. Mishakov, V.Y. Panchenko, M.Y. Tsvetkov // *Optical Memory and Neural Networks*. – 2007. – V. 16. – I. 2. – P. 67-74. DOI: 10.3103/S1060992X07020026.
11. Ramirez, J.C. Low-loss modified SU-8 waveguides by direct laser writing at 405 nm / J.C. Ramirez, J.N. Schianti, M.G. Almeida et al. // *Optical Materials Express*. – 2017. – V. 7. – I. 7. – P. 2651-2659. DOI: 10.1364/OME.7.002651.
12. Суздалев, И.П. Нанотехнология: Физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов / И.П. Суздалев. – М.: URSS, 2017. – 592 с.
13. Casarin, B. Ultralow-fluence single-shot optical crystalline-to-amorphous phase transition in Ge–Sb–Te nanoparticles / B. Casarin, A. Caretta, B. Chen, et al. // *Nanoscale*. – 2018. – V. 10. – I. 35. – P. 16574-16580. DOI: 10.1039/c8nr04350g.
14. Caretta, A. Ultrafast response of Ge₂Sb₂Te₅ nanoparticles: The benefits of low energy amorphization switching with the same read/write speed of bulk memories / A. Caretta, B. Casarin, B. Chen et al. // *APL Materials*. – 2023. – V. 11. – Art. № 071117. – P. 071117-1-071117-5. DOI: 10.1063/5.0156207.
15. Ionin, V.V. An optical synapse based on a polymer waveguide with a GST₂₂₅ 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
16. Пат. 2788438 Российская Федерация, МПК G02F 1/29 (2006.01). Оптический синапс / Бурцев А.А., Ионин В.В., Китселев А.В., Лотин А.А., Минаев Н.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное учреждение «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» РАН. – № 2021133121; заявл. 15.11.21; опубл. 19.01.23, Бюл. № 2. – 12 с.
17. Abdelghfar, A. Electrostatically tuned optical filters based on hybrid plasmonic-dielectric thin films for hyperspectral imaging / A. Abdelghfar, M.A. Mousa B.M. Fouad, et al. // *Micromachines*. – 2021. – V. 12. – I. 7. – Art. № 767. – 14 p. DOI: 10.3390/mi12070767.

References:

1. Zhang W., Mazzarello R., Wuttig M., Ma E. Designing crystallization in phase-change materials for universal memory and neuro-inspired computing, *Nature Reviews Materials*, 2019, vol. 4, issue 3, pp. 150-168. DOI: 10.1038/s41578-018-0076-x.
2. *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.
3. 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.
4. Ovshinsky S.R. Optical cognitive information processing—a new field, *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004, vol. 43, issue 7B, pp. 4695-4699. DOI: 10.1143/JJAP.43.4695.
5. Lian C., Vagionas C., Alexoudi T. et al. Photonic (computational) memories: tunable nanophotonics for data storage and computing, *Nanophotonics*, 2022, vol. 11, issue 17, pp. 3823-3854. DOI: 10.1515/nanoph-2022-0089.
6. 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.
7. 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.
8. Feldmann J., Youngblood N., Wright C.D. et al. All-optical spiking neurosynaptic networks with self-learning capabilities, *Nature*, 2019, vol. 569, pp. 208-214. DOI: 10.1038/s41586-019-1157-8.
9. Yu T., Ma X., Pastor E., et al. All-chalcogenide programmable all-optical deep neural networks, *arXiv:2102.10398*, 2021, 18 p. DOI: 10.48550/arXiv.2102.10398.
10. Sokolov V.I., Mishakov G.V., Panchenko V.Y., Tsvetkov M.Y. Routes to polymer-based photonics, *Optical Memory and Neural Networks*, 2007, vol. 16, issue 2, pp. 67-74. DOI: 10.3103/S1060992X07020026
11. Ramirez J.C., Schianti J.N., Almeida M.G. et al. Low-loss modified SU-8 waveguides by direct laser writing at 405 nm, *Optical Materials Express*, 2017, vol. 7, issue 7, pp. 2651-2659. DOI: 10.1364/OME.7.002651.
12. Suzdalev I.P. *Nanotekhnologiya: Fiziko-khimiya nanoklastero, nanostruktur i nanomaterialov* [Nanotechnology: Physical chemistry of nanoclusters, nanostructures and nanomaterials], Moscow, URSS, 2017, 592 p. (In Russian).
13. Casarin B., Caretta A., Chen B. et al. Ultralow-fluence single-shot optical crystalline-to-amorphous phase transition in Ge–Sb–Te nanoparticles, *Nanoscale*, 2018, vol. 10, issue 35, pp. 16574-16580. DOI: 10.1039/c8nr04350g.

14. Caretta A., Casarin B., Chen B., et al. Ultrafast response of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ nanoparticles: The benefits of low energy amorphization switching with the same read/write speed of bulk memories, *APL Materials*, 2023, vol. 11, art. no. 071117, pp. 071117-1-071117-5. DOI: 10.1063/5.0156207.
15. 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.
16. Burtsev A.A., Ionin V.V., Kiselev A.V., Lotin A.A., Minaev N.V. *Opticheskii sinaps* [Optical synapse]. Patent RF, no. 2788438, 2023. (In Russian).
17. Abdelghfar A., Mousa M.A., Fouad B.M. et al. Electrostatically tuned optical filters based on hybrid plasmonic-dielectric thin films for hyperspectral imaging, *Micromachines*, 2021, vol. 12, issue 7, art. № 767, 14 p. DOI: 10.3390/mi12070767.

Original paper

**Modelling of radiation propagation in a photonic integrated circuit based on a polymer
waveguide and phase-change material nanoparticles**

V.V. Ionin, V.A. Mikhalevsky, A.A. Burtsev, A.V. Kiselev, A.A. Nevzorov, N.N. Eliseev, A.A. Lotin
National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.351

Abstract: This paper presents the results of numerical modelling of optical radiation propagation in a *SU-8* polymer waveguide and signal modulation at different phase states of an array of nanoparticles of the phase-change material $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (*GST*). It is shown how the transmitted radiation is modulated for different numbers of nanoparticles when placed on the top and at the edge of the waveguide. The simulation results show that in addition to the influence of the phase states (crystalline or amorphous) on the properties of the transmitted signal, in the case of nanoparticles not only reflection and absorption but also scattering of the material play a prominent role. The basic possibility of controlling the optical signal of telecommunication range passing through the interface by switching the optical active element based on nanoparticles of phase-change material is demonstrated. The concept of developing photonic integrated circuits proposed in this work is the cheapest of all known planar technologies of developing waveguide devices and allows realizing computing elements and architectures on its basis with a high degree of heterogeneous integration.

Keywords: *photonic integrated circuits, optical waveguides, polymers, phase-change materials, chalcogenides, nanoparticles.*

Ионин Виталий Вячеславович – научный сотрудник ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Михалевский Владимир Александрович – научный сотрудник ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Бурцев Антон Андреевич – научный сотрудник ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Киселев Алексей Владимирович – к.ф.-м.н., научный сотрудник ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Невзоров Алексей Алексеевич – к.ф.-м.н., научный сотрудник ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Елисеев Николай Николаевич – младший научный сотрудник ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Лотин Андрей Анатольевич – к.ф.-м.н., заместитель руководителя отделения, ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Vitaly V. Ionin – Researcher, National Research Centre «Kurchatov Institute»

Vladimir A. Mikhalevsky – Researcher, National Research Centre «Kurchatov Institute»

Anton A. Burtsev – Researcher, National Research Centre «Kurchatov Institute»

Alexey V. Kiselev – Ph. D., Researcher, National Research Centre «Kurchatov Institute»

Alexey A. Nevzorov – Ph. D., Researcher, National Research Centre «Kurchatov Institute»

Nikolay N. Eliseev – Junior Researcher, National Research Centre «Kurchatov Institute»

Andrey A. Lotin – Ph. D., Deputy Head of the branch, National Research Centre «Kurchatov Institute»

Поступила в редакцию/received: 26.08.2024; после рецензирования/revised: 09.10.2024; принята/accepted 12.10.2024.