Письма в ЖЭТФ, том 122, вып. 12, с. 855 – 859

Активные элементы устройств оптических фазовращателей на основе тонких пленок материалов $Ge_2Sb_2Se_4Te_1$, Sb_2Se_3 и Bi_2Se_3

А. А. Бурцев[+1)], *В. В. Ионин*[+], *А. В. Киселев*[+], *В. А. Михалевский*[+], *Н. Н. Елисеев*[+], *А. А. Невзоров*[+*], *Е. В. Хайдуков*[×], *А. А. Лотин*[+×]

[+]*Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", 123182 Москва, Россия*

[*]*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский технологический университет "МИСИС", 119049 Москва, Россия*

[×]*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева", 125047 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 27 октября 2025 г.
После переработки 1 ноября 2025 г.
Принята к публикации 2 ноября 2025 г.

Представлены экспериментальные результаты исследования фазового сдвига оптического пучка в свободном пространстве, обусловленного формированием кристаллической структуры в элементарных управляемых ячейках на основе тонких пленок фазоизменяемых материалов $Ge_2Sb_2Se_4Te_1$, Sb_2Se_3 и Bi_2Se_3, подвергнутых управляющему воздействию импульсного лазерного излучения. Продемонстрировано изменение фазы исследуемого оптического пучка, проходящего через управляемую ячейку из фазоизменяемого материала, относительно контрольного пучка в интерферометре Жамена. Приведены оценки фазового сдвига на основе аналитических выражений.

DOI: 10.7868/S3034576625120239

Фазоизменяемые материалы (ФИМ) представляют собой ключевой элемент современных переключаемых устройств, благодаря их способности к управляемому изменению физических свойств при переходе между кристаллическим и аморфным состояниями [1–3]. Среди халькогенидных соединений, таких как теллуриды, селениды и сульфиды, выделяются материалы, демонстрирующие высокую эффективность в устройствах записи и хранения данных [4–6]. В последние годы научное сообщество активно исследует возможности оптимизации свойств ФИМ, уделяя особое внимание поиску соединений, обеспечивающих как стабильность структурных состояний, так и высокую скорость фазовых переходов. Особый интерес представляют сплавы на основе Ge–Sb–Te (GST) и Ag–In–Sb–Te (AIST), которые уже нашли применение в технологиях хранения данных, включая оптические диски и устройства энергонезависимой памяти [7–11]. Эти материалы демонстрируют высокую скорость переключения, низкую энергопотребляемость и долговременную стабильность, что делает их перспективными для использования в современных оптоэлектронных устройствах.

Хотя коммерческие устройства электронной памяти на основе ФИМ (GST), могут переключаться более 10^8 раз, а время переключения может составлять менее 500 пс, реализация таких характеристик в оптических устройствах и метаматериалах по-прежнему затруднена [12–15]. Это связано с тем, что материалы, используемые в электронной памяти, не имеют требуемых оптических характеристик. Чтобы реализовать электрически переключаемые метаматериалы,электрические, оптические и тепловые свойства всех компонентов должны быть правильно спроектированы и оптимизированы, и это сложно, особенно с точки зрения независимого управления отдельными устройствами, где необходимо учитывать тепловые перекрестные помехи.

Для реализации новых устройств фотоники и оптики усилия исследователей направлены на изучение менее известных семейств халькогенидных материалов, в первую очередь на основе серы и селена, обеспечивающих низкое поглощение света и высокий контраст показателя преломления в ближней инфракрасной области [16–19]. Данная работа продолжает исследования, опубликованные ранее, где было показано, что для точного управления фазой проходящего света может быть использована тонкая пленка $Ge_2Sb_2Te_5$ [20, 21]. Однако, для достижения наи-

[1)]e-mail: tonyiplit@gmail.com

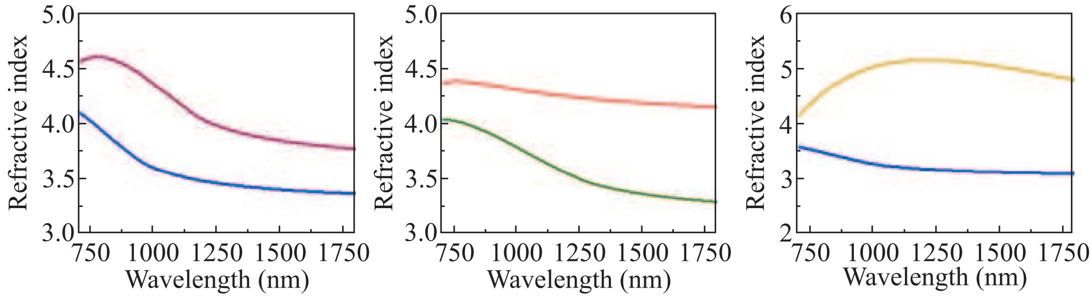

Рис. 1. (Цветной онлайн) Спектральные зависимости показателя преломления тонких пленок $Ge_2Sb_2Se_4Te_1$, Sb_2Se_3 и Bi_2Se_3 (слева-направо). Более высокие значения показателя преломления соответствуют кристаллическим фазам материалов

большего динамического диапазона изменения оптической фазы ячейки ФИМ необходимо использовать материал с максимально возможным контрастом показателя преломления на выбранной длине волны. Фазоактивные материалы востребованы при создании пространственных модуляторов света, в различных приложениях адаптивной оптики и устройств интегральной фотоники [22–27].

По этой причине для создания фазосдвигающей ячейки нами были выбраны и исследованы три материала $Ge_2Sb_2Se_4Te_1$, Sb_2Se_3 и Bi_2Se_3. Пленки $Ge_2Sb_2Se_4Te_1$, Sb_2Se_3 и Bi_2Se_3 толщиной 100 нм были получены на подложках из кварцевого стекла (SiO_2) толщиной 1 мм методом термического вакуумного напыления.

Оптические свойства тонких пленок $Ge_2Sb_2Se_4Te_1$, Sb_2Se_3 и Bi_2Se_3 были изучены методом эллипсометрии на установке Horiba UVIsel. Спектральные зависимости показателя преломления для всех трех материалов, находящихся в аморфном и кристаллическом состояниях, приведены на рис. 1. Наиболее подробно свойства данных материалов и особенности фазовых переходов были описаны авторами ранее [28].

Оптически управляемый фазовый сдвиг опорного излучения в тонких пленках $Ge_2Sb_2Se_4Te_1$, Sb_2Se_3 и Bi_2Se_3 осуществлялся в экспериментальной установке, основанной на схеме интерферометра Жамена. Фазовый сдвиг регистрировался по смещению интерференционных полос в одном из плеч интерферометра вследствие изменения показателя преломления при оптическом переключении структурного состояния тонкой пленки [19]. В плечах интерферометра располагался экспериментальный образец, содержащий контрольную всегда аморфную точку и точку, в которой осуществлялось управление кристаллическим состоянием. Переключение активной ячейки из аморфного в кристаллическое состояние осуществлялось лазерным импульсом длительностью 20 нс на длине волны 532 нм. Энергия управляющих лазерных импульсов изменялась в диапазоне от 20 до 50 мДж/см^2 [21]. В качестве опорного излучения использовался лазер непрерывного излучения на длине волны 800 нм. Регистрация изменения интерференционной картины осуществлялась сенсором, чувствительным к области излучения 800 нм. Изменение плотности энергии лазерного импульса,индуцирующего переход из аморфного в кристаллическое состояние, позволяет управлять сдвигом оптической фазы опорного излучения, проходящего через ячейку ФИМ за счет изменения степени ее кристалличности. Из рисунка 1 видно, что изменение показателя преломления между аморфным и кристаллическим состоянием на выбранной длине волны $\lambda = 800$ нм составляет $\Delta n = 0.6$ для $Ge_2Sb_2Se_4Te_1$, $\Delta n = 0.32$ для Sb_2Se_3 и $\Delta n = 0.8$ для Bi_2Se_3.

Оценить фазовый сдвиг проходящего через тонкую пленку света относительно световой волны, распространяющейся в воздухе, можно по формуле:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(n-1)L, \tag{1}$$

где λ – длина волны проходящего излучения, L – толщина пленки.

Для разности фаз пучков света, проходящих через полностью аморфную и полностью кристаллическую пленку, получим аналитическое выражение [20]:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta nL. \tag{2}$$

Для используемой в экспериментальной установке длины волны ($\lambda = 800$ нм) и толщины пленки ($L = 100$ нм) оценка по показателю преломления дает следующие значения сдвига фазы: 0.2π, 0.08π и 0.15π для пленок Sb_2Se_3, Bi_2Se_3 и $Ge_2Sb_2Se_4Te_1$ соответственно.

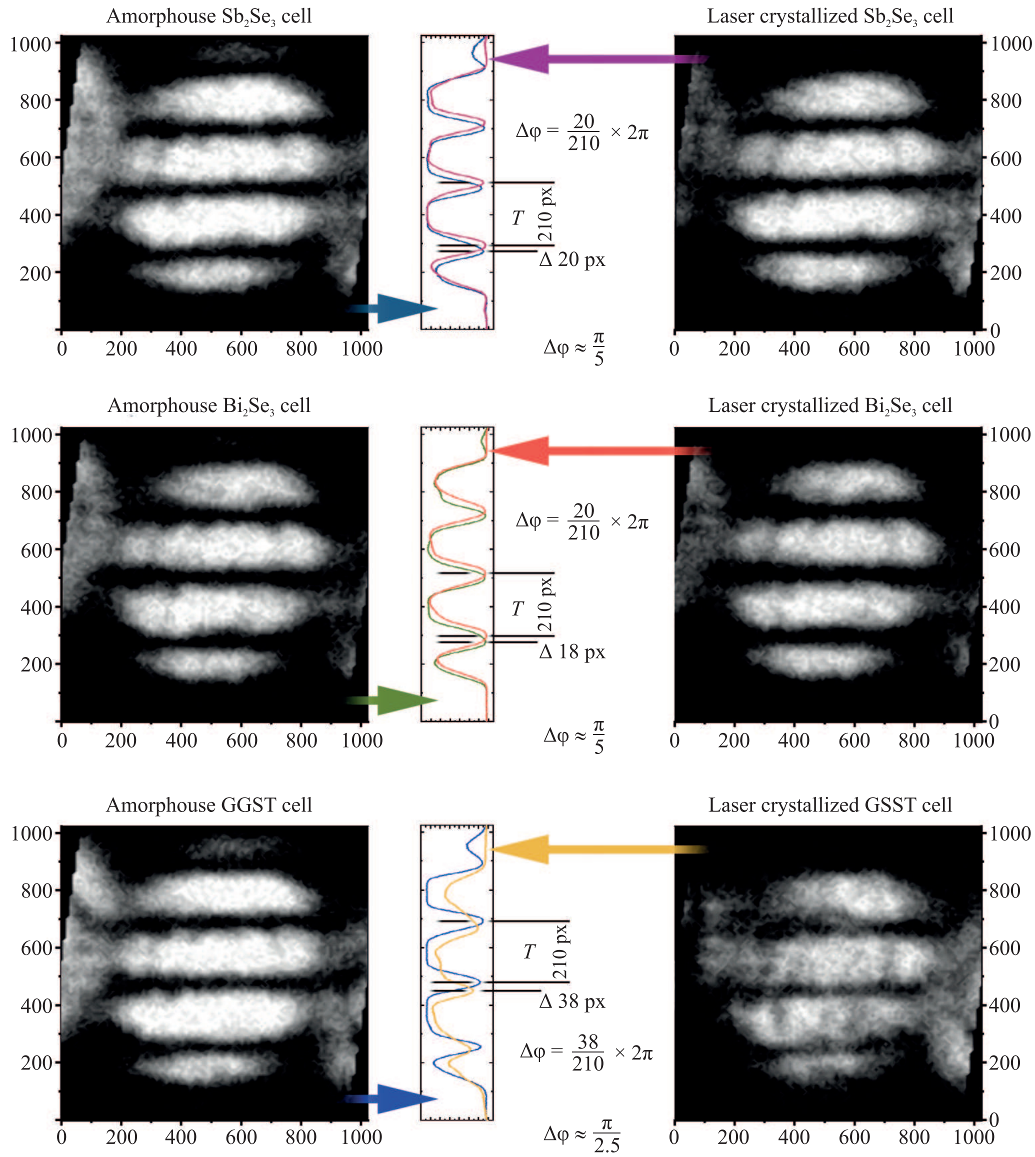

Рис. 2. (Цветной онлайн) Изменение фазового сдвига проходящего света в оптически управляемой ячейке толщиной 100 нм на основе Sb_2Se_3, Bi_2Se_3 и $Ge_2Sb_2Se_4Te_1$

На рисунке 2 представлены результаты, демонстрирующие сдвиг оптической фазы опорного излучения,проходящего через оптически управляемую ячейку интерферометра Жамена толщиной 100 нм на основе Sb_2Se_3, Bi_2Se_3 и $Ge_2Sb_2Se_4Te_1$. Как показали экспериментальные исследования, при использовании 100 нм пленок возможно добиться динамического диапазона перестройки фазы световой волны $\pm 0.4\pi$ при управлении состоянием ячейки наносекундными лазерными импульсами, что сравнимо с результатами для пленки GST [20]. Это примерно совпадает с теоретической оценкой, полученной исходя из показателей преломления для разных фаз материала, измеренных методами эллипсометрии. Предлагаемая структура устройства является хорошо масштабируемой в пределах приведенных толщин тонких пленок. На основе экспериментально исследованной элементарной ячейки можно создать метаповерхность для преобразования оптического пучка произвольной апертуры [14]. Если требуется небольшая и быстрая перестройка фазовой оптической прозрачности, то предложенный метод управления фазой оптического пучка может оказаться весьма перспективным. Преимуществами такого устройства на основе Sb_2Se_3, Bi_2Se_3 и $Ge_2Sb_2Se_4Te_1$ являются широкая спектральная полоса и амплитуда модуляции показателя преломления, и способность быстро и точно изменять свои оптические свойства под воздействием лазерного излучения или электрических импульсов, что важно для разработки и создания гибридных оптоэлектронных устройств [29, 30]. Все три исследуемых материала являются хорошими оптическими модуляторами и при этом обеспечивают низкие оптические потери в инфракрасной области спектра [28].

Однако, принимая во внимание все новые направления исследований и быстро развивающиеся технологические достижения, можно считать, что следующее поколение метаустройств будет перепрограммируемым благодаря использованию архитектур на основе халькогенидных ФИМ [31–33]. Такая оптическая реконфигурируемость открывает возможность создавать новую "умную" оптику, дисплеи и интегральные фотонные схемы (ФИС) [14]. На основе исследуемых материалов уже были успешно продемонстрированы различные прототипы фотонных интегральных схем (модуляторы излучения, оптические синапсы, сенсоры, кольцевые резонаторы и интерферометры Маха–Цендера) [34–37]. В качестве оптических ФИМ с малыми потерями и поглощением света перспективно использовать материалы на основе селена, которые вполне способны заменить соединения GST в ряде технологических задач.

Финансирование работы. Работа проведена в рамках выполнения государственного задания Федерального государственного бюджетного учреждения "Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт".

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

---

1. S. Raoux and M. Wutting, *Phase Change Materials. Science and Applications*, Springer Science, N.Y. (2009).
2. A.V. Kolobov and J. Tominaga, *Chalcogenides: Metastability and Phase Change Phenomena*, Springer, Berlin (2012).
3. S. Raoux, Annu. Rev. Mater. Res. **39**(1), 25 (2009).
4. E.R. Meinders, A.V. Mijritskii, L. van Pieterson, and M. Wuttig, *Optical Data Storage: Phase Change Media and Recording*, Springer, Berlin (2006).
5. M. Wuttig and N. Yamada, Nat. Mater. **6**, 824 (2007).
6. L. Martin-Monier, C.C. Popescu, L. Ranno, B. Mills, S. Geiger, D. Callahan, M. Moebius, and J. Hu, Opt. Mater. Express **12**(6), 2145 (2022).
7. N. Yamada, R. Kojima, M. Uno, T. Akiyama, H. Kitaura, K. Narumi, and K. Nishiuchi, Optical Data Storage **4342**, 55 (2002).
8. T. Matsunaga, J. Akola, S. Kohara, T. Honma, K. Kobayashi, E. Ikenaga, R.O. Jones, N. Yamada, M. Takata, and R. Kojima, Nature Mater. **10**(2), 129 (2011).
9. D. Lencer, M. Salinga, and M. Wuttig, Adv. Mater. **23**(18), 2030 (2011).
10. S.G. Sarwat, Mater. Sci. Technol. **33**, 1890 (2017).
11. A. Redaelli, *Phase Change Memory. Device Physics, Reliability and Applications*, Springer Int., Cham, Switzerland (2018).
12. W. Zhang, R. Mazzarello, M. Wuttig, and E. Ma, Nat. Rev. Mater. **4**, 150 (2019).
13. T. Cao, R. Wang, R.E. Simpson, and G. Li, Progress in Quantum Electronics **74**, 100299 (2020).
14. S. Abdollahramezani, O. Hemmatyar, H. Taghinejad, A. Krasnok, Y. Kiarashinejad, M. Zandehshahvar, A. Alu, and A. Adibi, Nanophotonics **9**,1189 (2020).
15. А.С. Кадочкин, В.В. Амеличев, С.С. Генералов, Д.В. Горелов, Фотоника **17**(7), 556 (2023).
16. M. Delaney, I. Zeimpekis, D. Lawson, D.W. Hewak, and O.L. Muskens, Adv. Funct. Mater. **30**(36), 2002447 (2020).
17. A. Bieganski, M. Perestjuk, R. Armand et al. (Collaboration), Opt. Mater. Express **14**(4), 862 (2024).
18. Y. Zhang, J.B. Chou, J. Li et al. (Collaboration), Nat. Commun. **10**, 4279 (2019).
19. D. Sahoo and R. Naik, Mater. Res. Bull. **148**, 111679 (2022).
20. A.V. Kiselev, A.A. Nevzorov, A.A. Burtsev, V.A. Mikhalevsky, N.N. Eliseev, V.V. Ionin, and A.A. Lotin, JETP Lett. **120**(6), 440 (2024).
21. A.V. Kiselev, V.A. Mikhalevsky, A.A. Nevzorov, A.A. Burtsev, V.V. Ionin, N.N. Eliseev, and A.A. Lotin, Physical and Chemical Aspects of the Study of Clusters, Nanostructures and Nanomaterials **16**, 651 (2024).
22. H. Sun, Q. Qiao, Q. Guan, and G. Zhou, Micromachines **13**(9), 1509 (2022).
23. И.Ю. Ерёмчев, Д.В. Прокопова, Н.Н. Лосевский, И.Т. Мынжасаров, С.П. Котова, А.В. Наумов, Успехи физических наук **192**(6), 663 (2022).
24. D.V. Prokopova, I.Yu. Eremchev, N.N. Losevsky, D.A. Belousov, S.K. Golubtsov, S.P. Kotova, and A.V. Naumov, Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. **88**(12), 1875 (2024).
25. А.П. Семенов, А.В. Бобков, М.А. Абдулкадыров, Д.А. Бригаднов, А.Д. Тамбовский, В.Е. Патрикеев, Фотоника **16**(4), 318 (2022).
26. А.Л. Соколов, В.М. Петров, В.Ю. Венедиктов, Д.Д. Решетников, Фотоника **17**(7), 542 (2023).
27. M. Takenaka, J.-H. Han, F. Boeuf, J.-K. Park, Q. Li, C. Pei Ho, D. Lyu, S. Ohno, J. Fujikata, S. Takahashi, and S. Takagi, J. Light. Technol. **37**(5), 1474 (2019).

28. A. A. Burtsev, A. V. Kiselev, M. E. Fedyanina, N. N. Eliseev, V. A. Mikhalevsky, A. A. Nevzorov, V. V. Ionin, V. V. Grebenev, A. M. Maliutin, V. N. Glebov, O. A. Novodvorsky, and A. A. Lotin, Opt. Mater. **157**, 116117 (2024).
29. M. Delaney, I. Zeimpekis, H. Du, X. Yan, M. Banakar, D. J. Thomson, D. W. Hewak, and O. L. Muskens, Sci. Adv. **7**(25), eabg3500 (2021).
30. B. Liu, T. Wei, J. Hu, W. Li, Y. Ling, Q. Liu, M. Cheng, and Z. Song, Chin. Phys. B **30**(5), 058504 (2021).
31. M. Pan, Y. Fu, Y. Zang, M. Zheng, H. Chen, X. He, Y. Lu, and Y. Chen, Opt. Express **31**(14), 22554 (2023).
32. S. A. Vitale, P. Miller, P. Robinson, C. Roberts, V. Liberman, Q. Du, Y. Zhang, C. Popescu, M. Y. Shalaginov, M. Kang, K. A. Richardson, T. Gu, C. Ríos, and J. Hu, Advanced Photonics Research **3**(10), 2200202 (2022).
33. D. Lawson, S. Blundell, M. Ebert, O. L. Muskens, and I. Zeimpekis, Opt. Mater. Express **14**, 22 (2023).
34. X. Chen, J. Lin, and K. Wang, Advanced Physics Research **4**, 2400080 (2025).
35. A. H. A. Nohoji, P. Keshavarzi, and M. Danaie, Results in Physics **75**, 108338 (2025).
36. M. Miscuglio, J. Meng, O. Yesiliurt, Y. Zhang, L. J. Prokopeva, A. Mehrabian, J. Hu, A. V. Kildishev, and V. J. Sorger, Artificial Synapse with Mnemonic Functionality using GSST-based Photonic Integrated Memory, 2020 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES), Monterey, CA, USA (2020), p. 1; doi: 10.23919/ACES49320.2020.9196183.
37. Y. Hu, M. Tong, X. Cheng, J. Zhang, H. Hao, J. You, X. Zheng, and T. Jiang, ACS Photonics **8**(3), 771 (2021).