

**Получение наночастиц фазоизменяемого материала $Ge_2Sb_2Te_5$
методом прямого лазерно-индуцированного переноса**

А.А. Бурцев, В.А. Михалевский, А.А. Невзоров, А.В. Киселев, М.Р. Конникова,
В.В. Ионин, 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/2024.16.612

Аннотация: В работе представлены экспериментальные результаты по синтезу наночастиц фазоизменяемого материала $Ge_2Sb_2Te_5$ методом прямого лазерно-индуцированного переноса. В качестве донорного материала использовались тонкие пленки, полученные методом термического вакуумного осаждения, в качестве акцептора – кремниевые пластины. Лазерно-индуцированный перенос осуществлялся импульсным лазерным излучением суб-наносекундной длительности. Анализ морфологии, топологии и размеров полученных наночастиц проводился с помощью растровой электронной микроскопии. Структурные исследования проводились методом комбинационного рассеяния. Было достигнуто квазиравномерное распределение наночастиц по подложке и по размерам. Экспериментально достигнут диаметр наночастиц менее 100 нм. Спектры комбинационного рассеяния демонстрируют, что полученные наночастицы находятся в кристаллическом состоянии. Результаты работы показывают возможность создания элемента на основе наночастиц с определенным распределением и размерами, как технологическую альтернативу устройствам на основе тонких пленок. Использование наночастиц позволит добиться энергетической эффективности, большей гибкости и плавности переключения, а также даст возможность реализовать нейроморфных и стохастические вычисления.

Ключевые слова: халькогениды, фазоизменяемые материалы, наночастицы, нанокластеры, лазерно-индуцированный перенос, фазовые переходы.

1. Введение

Халькогенидные материалы довольно рано привлекли к себе интерес в фундаментальных исследованиях, например, поведения фотопроводников, особенностей ионной проводимости и аморфных полупроводников [1-3]. Никакого большого прорыва в их практическом применении не произошло до тех пор, пока Овшинский не обнаружил быстрый и обратимый переход проводимости в халькогенидах [4]. Основное свойство энергонезависимой памяти, а именно пороговое переключение, заключается в том, что при достижении определенного значения температуры (кристаллизации или плавления) материал переходит в новое фазовое состояние. Поэтому к данным химическим соединениям применяется термин фазоизменяемый материал (ФИМ) или материал фазовой памяти. Из-за эффекта порогового переключения электрическое сопротивление ФИМ в аморфном состоянии может быть резко снижено, как только напряжение смещения превышает пороговое значение, что приводит к высокому току, благоприятному для

наступающей кристаллизации. Пороговое переключение чрезвычайно важно для ФИМ, поскольку оно допускает фазовый переход при относительно низком напряжении. В противном случае фазовый переход мог бы происходить только при очень высоком напряжении, что приводило бы к ненужному потреблению энергии. Примечательно, хотя пороговые фазовые превращения были описаны как эффекты изменения электрической проводимости при приложенном напряжении, в 1971 году было доказано, что быстрый фазовый переход (кристаллизацию и аморфизацию) можно инициировать воздействием света [5], что послужило вдохновением концепции энергонезависимой оптической памяти.

Из-за значительного улучшения оптических контрастов и скорости записи данных благодаря открытию и исследованию материалов линии $Ge-Sb-Te$, в первую очередь $Ge_2Sb_2Te_5$ (GST) [6], оптическая версия переключаемых ФИМ развивалась быстрее, чем электронная, и была успешно коммерциализирована в начале 1990-х годов. Данная технология включает перезаписываемые CD, DVD и Blue-ray диски, а также новые устройства фотонной памяти [7]. В настоящее время наиболее многообещающими новыми приложениями ФИМ являются энергонезависимые электронные запоминающие устройства (PCRAM – phase-change random access memory) [8]. Здесь короткие импульсы напряжения используются для переключения ячейки ФИМ, а также применяются для считывания ее состояния. Удельное сопротивление между аморфным и кристаллическим состоянием способно измениться на несколько порядков. Это обеспечивает успешную реализацию многоуровневой памяти [9]. Превосходные физические свойства в сочетании со значительными практическими и теоретическими знаниями, успешно наделяют ФИМ несколькими преимуществами, такими как превосходная масштабируемость (порядка 5 нм), высокая скорость переключения (меньше 1 нс), количество циклов переключения (свыше 10^{12}) и низкое энергопотребление, что делает возможным использование наноразмерных устройств ФИМ для реализации нейроморфных устройств обработки информации [10-12].

Тем не менее, тонкопленочные или макроскопические элементы на основе ФИМ требуют значительной энергии даже для частичного изменения своего фазового состояния, а время необходимое для окончания процессов фазового перехода зависит от объема вещества и для тонкопленочных структур составляет сотни наносекунд без учета тепловой релаксации, которая также сильно влияет на свойства таких веществ. Решением этих проблем может стать использование наноструктур ФИМ и построенных на их основе элементов. Такие структуры имеют большую

площадь поверхности и малый объем, поэтому требуют меньшей энергии оптического излучения для нагрева всего материала до температур фазового перехода. Переход от объемного материала к низкоразмерным структурам нередко сопровождается появлением новых оптических переходов и изменения их энергии, изменением таких свойств, как время люминесценции и флуоресценции [13, 14].

Недавние опубликованные работы показали, что наночастицы (НЧ) *GST* требуют меньше энергии для осуществления перехода из кристаллического состояния в аморфное, благодаря снижению температуры плавления [15] и более низкой энергии аморфизации [16]. Снижение пороговой энергии фазовых переходов объясняют «эффектом масштабирования»: температура плавления ряда металлических и полупроводниковых НЧ снижается по мере уменьшения размера (диаметра НЧ). Как было показано в работе [15], температура кристаллизации для НЧ *GST* снижается с уменьшением диаметра НЧ. Интересно отметить, что для другого известного ФИМ, теллурида германия *GeTe*, «эффект масштабирования» обратный, поскольку температура кристаллизации увеличивается с уменьшением размеров НЧ [17]. Повышение температуры кристаллизации означает, что температурное окно между кристаллизацией и плавлением уменьшается, и снижается максимальная достижимая скорость фазового перехода, что является нежелательным эффектом.

Несмотря на то, что вышеупомянутые результаты являются многообещающими, чтобы удовлетворить требованиям технологических приложений интегральной фотоники и микроэлектроники, необходимо провести ряд дополнительных экспериментов по изучению методов синтеза НЧ и влияния параметров синтеза на свойства получаемых кластеров. Настоящая работа посвящена методу прямого лазерно-индуцированного переноса НЧ *GST* и описанию структурных свойств полученных НЧ.

2. Техника эксперимента и методы синтеза наноматериалов

Метод прямого лазерно-индуцированного переноса (LIFT – laser-induced forward transfer) эффективно применяется для получения НЧ и кластеров из самых разных материалов, в том числе биологических тканей. Перенос определяется исключительно параметрами лазерной установки, обладает высоким разрешением, может осуществляться в условиях воздушной атмосферы и дает возможность многослойной печати [18].

В качестве донорной подложки были использованы образцы тонких пленок *GST* (50 нм), которые были получены методом термического вакуумного осаждения на подложки кварцевого стекла (*SiO₂*). Условия синтеза и свойства тонких пленок приведены в работе [19]. В качестве

акцепторной подложки использовались пластины монокристаллического кремния (Si). Лазерно-индуцированный перенос НЧ с пленки осуществлялся под действием импульсного лазерного излучения ($\lambda = 532$ нм, $\tau = 0,7$ нс). Короткая длительность лазерных импульсов позволяет уменьшить тепловые эффекты воздействия и получить более мелкие кластеры. Размеры НЧ GST варьировались путем изменения плотности энергии в импульсе, а плотность частиц на подложке – за счет изменения числа импульсов на донорной подложке.

Морфология, топология и размеры массива НЧ анализировались с помощью электронной микроскопии. Структурные свойства изучались методом комбинационного рассеяния (спектр Рамана).

3. Результаты и обсуждение

Эмпирически были определены оптимальные параметры переноса НЧ GST , что позволяет достичь квазиравномерного распределения НЧ по подложке и по размерам. Параметры воздействующего лазерного излучения: диаметр пятна $d = 2$ мкм, количество импульсов $N = 240$, расстояние между акцепторной пленкой и донорной подложкой $h = 300$ мкм, плотность энергии в импульсе $F = 80$ мДж/см². На рис. 1 приведены снимки растровой электронной микроскопии (РЭМ) НЧ GST , высаженных на кремниевую подложку.

Средний размер полученных НЧ GST , оцененный по приведенным выше РЭМ-изображениям: 237 нм, дисперсия 108 нм. Используя описанный метод, возможно получить частицы размером менее 100 нм и достичь их равномерного распределения на акцепторной подложке.

Экспериментально оценить долю кристаллической фазы можно с помощью методов структурного анализа. На рис. 2 приведен спектр комбинационного рассеяния полученного массива НЧ GST .

Пик комбинационного рассеяния света расположен при 125 см⁻¹ и связан с колебаниями тетраэдрических единиц $GeTe_{4-n}Ge_n$ ($n = 0, 1$) [20]. Различие может быть вызвано колебанием гетерополярных связей. Пик, наблюдаемый при 143 см⁻¹, может быть также связан и с колебаниями тетраэдрических единиц, и с наличием колебаний связей $Sb-Te$ или дефектной октаэдрической координацией атомов Sb [21]. В GST контраст свойств обусловлен изменением локального расположения атомов, при котором координация Ge переключается между октаэдрическим (в кристаллической фазе) и тетраэдрическим (в аморфной фазе) состояниями, что связано с высокой плотностью собственных вакансий [2] и резонансом химических связей [1]. Другими важными свойствами, обеспечивающими контрастность свойств, являются атомные связи р-типа и количество валентных электронов (4 и более) [20].

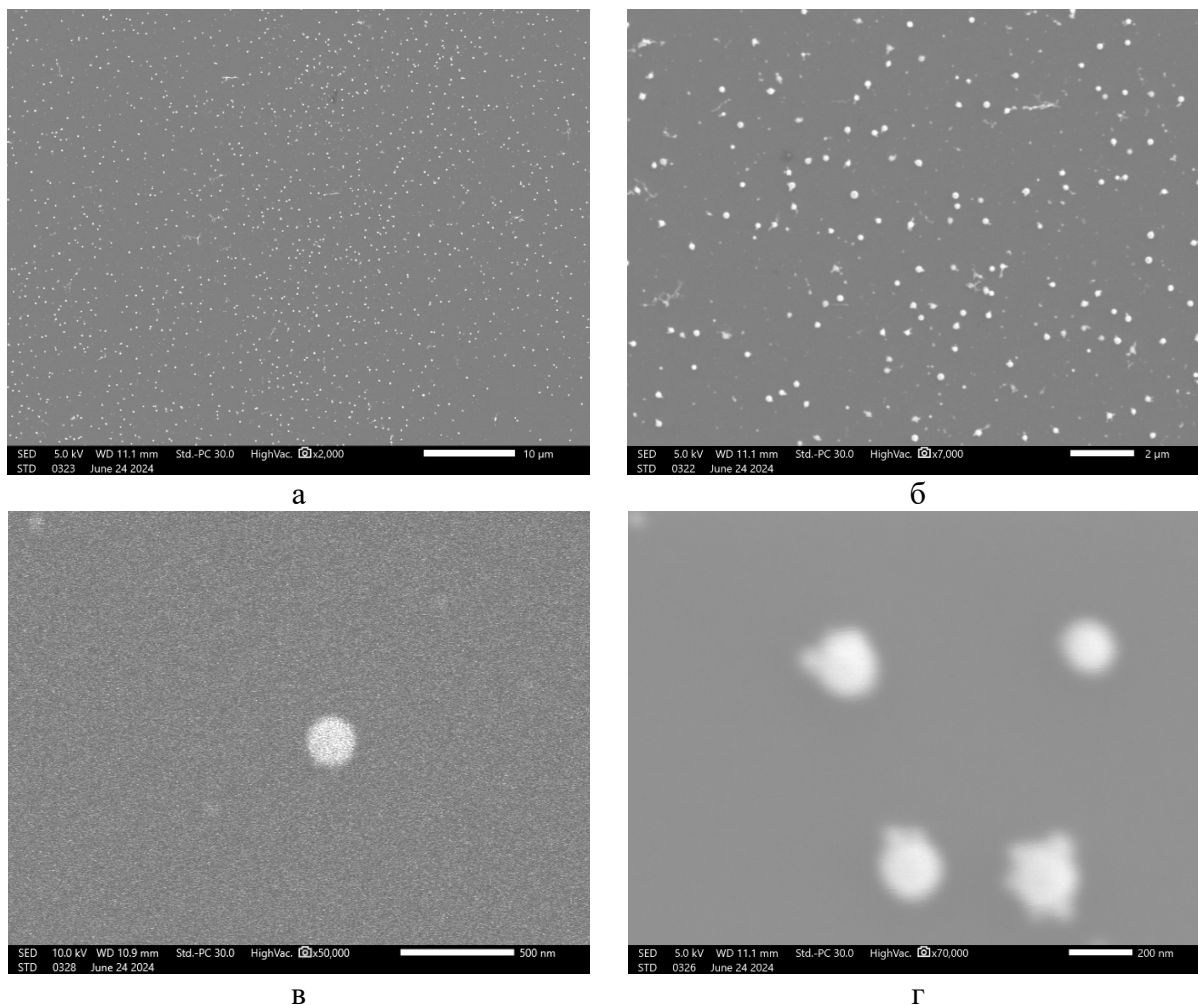


Рис. 1. РЭМ-изображения НЧ *GST* на кремниевой подложке. Масштаб изображений: а – 10 мкм, б – 2 мкм, в – 500 нм, г – 200 нм.

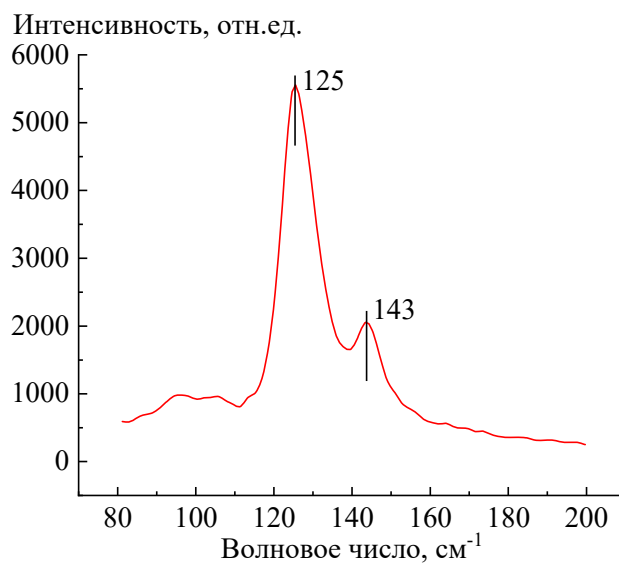


Рис. 2. Спектр комбинационного рассеяния массива НЧ *GST* на кремниевой подложке.

Метод прямого лазерно-индуцированного переноса позволяет

получать НЧ GST в кристаллической фазе с квазиравномерным распределением частиц по подложке и по размерам.

4. Заключение

В работе были рассмотрены эксперименты по синтезу НЧ фазоизменяемого материала $Ge_2Sb_2Te_3$. Показано, что исследуемый метод лазерно-индуцированного переноса позволяет достичь как малого диаметра НЧ (меньше 100 нм), так и их равномерного распределения по акцепторной подложке. Структурные исследования показывают, что полученные НЧ находятся в кристаллической фазе.

Использование таких материалов может открыть перспективы построения высокоэффективных оптических вычислительных ускорителей, эргодонезависимых элементов, оптоэлектронных и микроэлектронных компонентов, а также полностью оптических элементов памяти. Структуры на основе НЧ имеют большую площадь поверхности и малый объем, поэтому требуют меньшей энергии для нагрева материала до требуемых температур фазового перехода. Кроме того, сама температура фазового перехода уменьшается с размером частиц. Это в свою очередь обеспечит не только увеличение скорости переключения фазового состояния, но и позволит легко переключать состояние таких частиц с меньшей энергией. А возможность использования в качестве элемента фотоники и микроэлектроники структуры, состоящей из множества частиц разного размера, позволит обеспечивать большое количество воспроизводимых и хорошо контролируемых состояний такого элемента.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» в части получения тонких пленок, а также договора № 075-15-2023-324 в части синтеза наночастиц и исследования их свойств.

Библиографический список:

1. 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.
2. **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.
3. **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.
4. **Ovshinsky, S.R.** Reversible electrical switching phenomena in disordered structures / S.R. Ovshinsky // Physical Review Letters. – 1968. – V. 21. – I. 20. – P. 1450-1453. DOI: 10.1103/PhysRevLett.21.1450.
5. **Feinleib, J.** Rapid reversible light-induced crystallization of amorphous semiconductors / J. Feinleib, J. deNeufville, S.C. Moss, S.R. Ovshinsky // Applied Physics Letters. – 1971. – V. 18. – I. 6. – P. 254-257. DOI: 10.1063/1.1653653.
6. **Yamada, N.** Rapid-phase transitions of $GeTe-Sb_2Te_3$ pseudobinary amorphous thin films for an optical disk memory / N. Yamada, E. Ohno, K. Nishiuchi, N. Akahira, M. Takao // Journal of Applied Physics. – 1991.

- V. 69. – I. 5. – P. 2849-2856. DOI: 10.1063/1.348620.
7. **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.
8. **Sarwat, S.G.** Materials science and engineering of phase change random access memory / S.G. Sarwat // *Materials Science and Technology*. – 2017. – V. 33. – I. 16. – P. 1890-1906. DOI: 10.1080/02670836.2017.1341723.
9. **Papandreou, N.** Multilevel phase-change memory / N. Papandreou, A. Pantazi, A. Sebastian, M. Breitwisch, C. Lam, H. Pozidis, E. Eleftheriou // 2010 17th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, 12-15 December 2010, Athens. – New York: IEEE Publ., 2010. P. 1017-1020. DOI: 10.1109/ICECS.2010.5724687.
10. **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.
11. **Wuttig, M.** The science and technology of phase change materials / M. Wuttig, S. Raoux // *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*. – 2012. – V. 638. – I. 15. – P. 2455-2465. DOI: 10.1002/zaac.201200448.
12. **Zhang, W.** Designing crystallization in phase-change materials for universal memory and neuro-inspired computing/ W. Zhang, R. Mazzeo, M. Wuttig, E. Ma // *Nature Reviews Materials*. – 2019. – V. 4. – I. 3. – P. 150-168. DOI: 10.1038/s41578-018-0076-x.
13. **Суздаев, И.П.** Электрические и магнитные переходы в нанокластерах и наноструктурах / И.П. Суздаев. – М.: URSS, 2016. – 480 с.
14. **Суздаев, И.П.** Нанотехнология: Физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов / И.П. Суздаев. – М.: URSS, 2017. – 592 с.
15. **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.
16. **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.
17. **Arachchige, I.U.** Amorphous and crystalline GeTe nanocrystals / I.U. Arachchige, R. Soriano, C.D. Malliakas et al. // *Advanced Functional Materials*. – 2011. – V. 21. – I. 14. – P. 2737-2743. DOI: 10.1002/adfm.201100633.
18. **Morales, M.** Laser-induced forward transfer techniques and applications / M. Morales, D. Munoz-Martin, A. Marquez, et al // *Advances in Laser Materials Processing; 2nd ed. Technology, Research and Applications Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies*. – Coventry: Woodhead Publishing, 2018. – Ch. 13. – P. 339-379. DOI: 10.1016/B978-0-08-101252-9.00013-3.
19. **Kiselev, A.V.** Dynamics of reversible optical properties switching of Ge₂Sb₂Te₅ thin films at laser-induced phase transitions / A.V. Kiselev, V.V. Ionin, A.A. Burtsev, et al. // *Optics & Laser Technology*. – 2022. – V. 147. – Art. № 107701. – 6 p. DOI: 10.1016/j.optlastec.2021.107701.
20. **Burtsev, A.A.** Physical properties' temperature dynamics of GeTe, Ge₂Sb₂Te₅ and Ge₂Sb₂Se₄Te₁ phase change materials / A.A. Burtsev, N.N. Eliseev, V.A. Mikhalevsky et al. // *Materials Science in Semiconductor Processing*. – 2022. – V. 150. – Art. № 106907. – 8 p. DOI: 10.1016/j.mssp.2022.106907.
21. **Zhu, Z.** Raman study on the crystallization characteristics of amorphous Ge₂Sb₂Te₅ film / Z. Zhu, F.R. Liu, Y.N. Huang // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – V. 541-542. – P. 229-233. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.541-542.229.

References:

1. *Phase change materials: science and applications*, ed. by S. Raoux and M. Wuttig. New York, Springer Science+Business Media, LLC, 2009, 450 p. DOI: 10.1007/978-0-387-84874-7.
2. 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.
3. Kozuykhin 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.
4. Ovshinsky S.R. Reversible electrical switching phenomena in disordered structures, *Physical Review Letters*, 1968, vol. 21, issue 20, pp. 1450-1453. DOI: 10.1103/PhysRevLett.21.1450.
5. Feinleib J, DeNeufville J., Moss S.C., Ovshinsky S.R. Rapid reversible light-induced crystallization of amorphous semiconductors, *Applied Physics Letters*, 1971, vol. 18, issue 6, pp. 254-257. DOI:

10.1063/1.1653653.

6. Yamada N., Ohno E., Nishiuchi K. et al. Rapid-phase transitions of GeTe-Sb₂Te₃ pseudobinary amorphous thin films for an optical disk memory, *Journal of Applied Physics*, 1991, vol. 69, issue 5, pp. 2849-2856. DOI: 10.1063/1.348620.

7. 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.

8. Sarwat S.G. Materials science and engineering of phase change random access memory, *Materials Science and Technology*, 2017, vol. 33, issue 16, pp. 1890-1906. DOI: 10.1080/02670836.2017.1341723.

9. Papandreou N., Pantazi A., Sebastian A. et al. Multilevel phase-change memory, *17th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, 12-15 December 2010, Athens, New York, IEEE Publ., 2010, pp. 1017-1020. DOI: 10.1109/ICECS.2010.5724687.

10. 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.

11. Wuttig M., Raoux S. The science and technology of phase change materials, *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*, 2012, vol. 638, issue 15, pp. 2455-2465. DOI: 10.1002/zaac.201200448.

12. 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.

13. Suzdalev I.P. *Elektricheskie i magnitnye perekhody v nanoklasterakh i nanostrukturakh [Electrical and magnetic transitions in nanoclusters and nanostructures]*, Moscow, URSS, 2016, 480 p. (In Russian).

14. Suzdalev I.P. *Nanotekhnologiya: Fiziko-khimiya nanoklasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Nanotechnology: Physical chemistry of nanoclusters, nanostructures and nanomaterials]*, Moscow, URSS, 2017, 592 p. (In Russian).

15. 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.

16. Caretta A., Casarin B., Chen B., et al. Ultrafast response of Ge₂Sb₂Te₅ 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.

17. Arachchige I.U., Soriano R., Malliakas C.D. et al. Amorphous and crystalline GeTe nanocrystals, *Advanced Functional Materials*, 2011, vol. 21, issue 14, pp. 2737-2743. DOI: 10.1002/adfm.201100633.

18. Morales M., Munoz-Martin D., Marquez A. et al. Laser-induced forward transfer techniques and applications, *Advances in Laser Materials Processing, 2nd ed. Technology, Research and Applications* Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies, Coventry, Woodhead Publishing, 2018, chapter 13, pp. 339-379. DOI: 10.1016/B978-0-08-101252-9.00013-3.

19. Kiselev A.V., Ionin V.V., Burtsev A.A. et al. Dynamics of reversible optical properties switching of Ge₂Sb₂Te₅ thin films at laser-induced phase transitions, *Optics & Laser Technology*, 2022, vol. 147, art. no. 107701, 6 p. DOI: 10.1016/j.optlastec.2021.107701.

20. Burtsev A.A., Eliseev N.N., Mikhalevsky V.A. et al. Physical properties' temperature dynamics of GeTe, Ge₂Sb₂Te₅ and Ge₂Sb₂Se₄Te₁ phase change materials, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2022, vol. 150, art. no. 106907, 8 p. DOI: 10.1016/j.mssp.2022.106907.

21. Zhu Z., Liu F.R., Huang Y.N. Raman study on the crystallization characteristics of amorphous Ge₂Sb₂Te₅ film, *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 541-542, pp. 229-233. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.541-542.229.

Original paper

Synthesis of phase-change material Ge₂Sb₂Te₅ nanoparticles by laser-induced forward transfer techniques

A.A. Burtsev, V.A. Mikhalevsky, A.A. Nevzorov, A.V. Kiselev, M.R. Konnikova, V.V. Ionin,
N.N. Eliseev, A.A. Lotin

National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.612

Abstract: Experimental results on the synthesis of nanoparticles of Ge₂Sb₂Te₅ phase-change material by the direct laser-induced transfer method are presented. Thin films obtained by the thermal vacuum deposition were used as a donor material and silicon wafers as an acceptor. The laser-induced forward transfer was carried out using the sub-nanosecond pulsed laser irradiation. The morphology, topology,

and size of the obtained nanoparticles were analyzed by scanning electron microscopy. Structural studies were performed by Raman scattering. A quasi-uniform distribution of nanoparticles on the substrate and a quasi-uniform size distribution were achieved. It was shown that it is possible to achieve a nanoparticle diameter of less than 100 nm. Raman spectra show that the nanoparticles obtained are in the crystalline state. The results show the possibility of creating an element based on nanoparticles with a specific distribution in size as a technological alternative to devices based on thin films. The use of nanoparticles will make it possible to achieve the energy efficiency, greater flexibility, and smoothness of switching as well as to realize neuromorphic and stochastic computation.

Keywords: chalcogenides, phase-change materials, nanoparticles, nanoclusters, laser-induced forward transfer, phase transitions.

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

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

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

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

Конникова Мария Руслановна – младший научный сотрудник ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Ионин Виталий Вячеславович – 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»

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

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

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

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

Maria R. Konnikova – Junior Researcher, National Research Centre «Kurchatov Institute»

Vitaly V. Ionin – 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: 30.08.2024; после рецензирования/revise: 22.09.2024; принята/accepted 27.09.2024.