**Исследование низкоразмерных структур фазоизменяемого материала GST и архитектур устройств на их основе.**

***А.А. Бурцев***

*Научный сотрудник*

*Национальный Исследовательский Центр "Курчатовский Институт",*

*Лаборатория нанофотоники и наноплазмоники, Шатура, Россия*

*E–mail:* *murrkiss2009@yandex.ru*

В последние годы, не фон Неймановские вычислительные архитектуры привлекли значительное внимание исследователей в связи с их потенциалом для разработки высокопроизводительных и энергоэффективных систем обработки данных [1]. Особый интерес представляют нейроморфные вычисления и использование энергонезависимых мемристивных ячеек, включая тонкопленочные элементы с фазоизменяемыми материалами (ФИМ) [2, 3]. Этот класс полупроводниковых материалов может переключаться между двумя стабильными при комнатной температуре фазовыми состояниями – кристаллическим и аморфным. В кристаллическом состоянии эти материалы обладают низким удельным сопротивлением, которое возрастает на 5 порядков при потере дальнего порядка в структуре вещества [4, 5]. В настоящее время наиболее многообещающими новыми приложениями ФИМ являются энергонезависимые электронные запоминающие устройства [6]. Здесь короткие импульсы напряжения используются для переключения ячейки ФИМ, а также применяются для считывания ее состояния. Высокий контраст свойств обеспечивает успешную реализацию многоуровневой памяти [3]. Причем, переключение состояния элемента на основе ФИМ имеет пороговый характер и некоторые свойства, удовлетворяющие требованиям к data-driven нейроморфным системам [7].

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. Недавние опубликованные работы показали, что наночастицы (НЧ) материала Ge2Sb2Te5 (GST) требуют меньше энергии для осуществления перехода из кристаллического состояния в аморфное, благодаря снижению температуры плавления и более низкой энергии аморфизации [8]. Снижение пороговой энергии фазовых переходов объясняют «эффектом масштабирования»: температура плавления ряда металлических и полупроводниковых наночастиц снижается по мере уменьшения размера (диаметра наночастицы).

Представленная работа посвящена методу прямого лазерно-индуцированного переноса НЧ GST и описанию структурных свойств полученных наночастиц. Метод прямого лазерно-индуцированного переноса (LIFT) обладает высоким разрешением, может осуществляться в условиях воздушной атмосферы и дает возможность многослойной печати [9]. В качестве потенциального применения представлена модель оригинальной вычислительной ячейки на основе НЧ GST, которая обладает потенциалом для использования как в качестве многоуровневого мемристора и нейроморфного элемента, так и элемента памяти [10]. Данный подход позволяет не только преодолеть ограничения связанные с плавностью переключения, но и вносит элементы случайности в работу вычислительных систем, что может существенно ускорить сходимость к корректным решениям в нейроморфных архитектурах [11]. Кроме того, использование хаотически распределённых наночастиц повышает отказоустойчивость вычислительных элементов, открывая новые возможности для создания более надёжных и эффективных вычислительных систем. Использование таких материалов может открыть перспективы построения высокоэффективных оптических вычислительных ускорителей, энергонезависимых элементов, оптоэлектронных и микроэлектронных компонентов, а также полностью оптических элементов памяти. А возможность использования в качестве элемента 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 НИЦ «Курчатовский институт».

**Литература**

1. T. Zanotti, P. Pavan, F.M. Puglisi. Multi-input logic-in-memory for ultra-low power non-von Neumann computing //Micromachines. 2021, Vol. 12, №. 10, p. 1243.
2. A.V. Kolobov, J. Tominaga. Chalcogenides: Metastability and Phase Change Phenomena. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
3. S. Raoux, M. Wutting (Eds.) Phase change materials. Science and applications. Springer Science+Business Media, 2009.
4. S.A. Kozyukhin, I.I. Nikolaev, P.I. Lazarenko, G.A. Valkovskiy, O. Konovalov, A.V. Kolobov, N.A. Grigoryeva. Direct observation of amorphous to crystalline phase transitions in Ge–Sb–Te thin films by grazing incidence X-ray diffraction method //Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 2020, Vol. 31, №. 13, pp. 10196-10206.
5. P. Guo, A.M. Sarangan, I. Agha. A review of germanium-antimony-telluride phase change materials for non-volatile memories and optical modulators. // Applied sciences, 2019, Vol. 9, №. 3. p. 530.
6. S.G. Sarwat. Materials science and engineering of phase change random access memory. // Materials Science and Technology, 2017, Vol. 33, №. 16, pp. 1890-1906.
7. S.T. Han, Y. Zhou (Eds.) Photo-Electroactive Non-Volatile Memories for Data Storage and Neuromorphic Computing. Woodhead Publishing, 2020.
8. A. Caretta, B. Casarin, B. Chen, B.J. Kooi, M. Malvestuto. 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, p. 071117.
9. А.А. Бурцев, В.А. Михалевский, А.А. Невзоров, А.В. Киселев, М.Р. Конникова, В.В. Ионин, Н.Н. Елисеев, А.А. Лотин. Получение наночастиц фазоизменяемого материала Ge2Sb2Te5 методом прямого лазерноиндуцированного переноса. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов, 2024, №. 16, c. 612-620.
10. A.A. Nevzorov, A.A. Burtsev, A.V. Kiselev, V.A. Mikhalevsky, V.V. Ionin, N.N. Eliseev, A.A. Lotin. Chaotic computing cell based on nanostructured phase-change materials //Journal of Computational Electronics, 2024, Vol. 23, №. 6, pp. 1448-1454.
11. C.M. Bishop. Training with noise is equivalent to Tikhonov regularization //Neural computation, 1995, Vol. 7, №. 1, pp. 108-116.