УДК 539.216.2 *Оригинальная статья*

Планарный массив мемристорных элементов на основе GST_{225}

В.А. Михалевский[1], А.А. Бурцев[1], В.В. Ионин[1], А.А. Невзоров[1,2], А.В. Киселев[1], Н.Н. Елисеев[1], А.А. Лотин[1,3]

[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
[3]ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»
125047, Россия, Москва, Миусская пл., 9
murrkiss2009@yandex.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.705

Аннотация: В статье представлены результаты моделирования изменения электрического сопротивления мемристорной структуры за счет изменения структурного состояния активной области ячейки из фазоизменяемого материала $Ge_2Sb_2Te_5$, подвергнутой управляющему воздействию электрических импульсов. Продемонстрирована новая архитектура планарных мемристорных структур. На основе данных моделирования исследованной архитектуры мемристора описаны изменения температуры и фазовые превращения на основе классической задачи Стефана. Предложены оптимальные значения параметров управляющих электрических импульсов. Показано, что время изменения сопротивления практически не зависит от управляющих параметров после достижения порогового значения фазового перехода. Предложенная архитектура мемристорных структур демонстрирует преимущества в энергопотреблении и реализации многоуровневых резистивных состояний, что позволяет стать ключевым элементом технологий мемристоров нового поколения. Сочетание технологической простоты изготовления с сохранением функциональных характеристик, характерных для классического вертикального подхода, является решающим преимуществом, которое может обеспечить масштабируемость производства и коммерциализацию мемристоров нового поколения.

Ключевые слова: мемристор, халькогениды, фазоизменяемые материалы, тонкие пленки, аморфизация.

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

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

Ионин Виталий Вячеславович – 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»

Киселев Алексей Владимирович – к.ф.-м.н., старший 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», заместитель директора департамента научно-технический политики ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»

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

Original paper

A planar array of GST_{225}-based memristor elements

V.A. Mikhalevsky[1], A.A. Burtsev[1], V.V. Ionin[1], A.A. Nevzorov[1,2], A.V. Kiselev[1], N.N. Eliseev[1], A.A. Lotin[1,3]

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

[2]*Laboratory of Photonic Gas Sensors, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia*

[3]*Mendeleev University of Chemical Technology, Moscow, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.705

Abstract: This paper presents a modeling study of the electrical resistance in a memristor structure based on the phase-change $Ge_2Sb_2Te_5$ material. The changes in resistance are driven by some structural transformations in the active region of the memory cell under the influence of electrical control pulses. A novel planar architecture for memristor structures has been demonstrated. Using the simulation data for this architecture, temperature dynamics and phase transitions are analyzed within the framework of the classical Stefan problem. Optimal parameters for the electrical control pulses are identified. The results demonstrate that once the phase transition threshold is reached, the resistance switching time becomes essentially independent of the control parameters. The proposed memristor architecture exhibits advantages in both power efficiency and the capability for multilevel resistance states, positioning it as a key component for next-generation memristive technologies.

Keywords: memristor, chalcogenides, phase change materials, thin films, amorphization.

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

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

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

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», Deputy Director of the Department of Scientific and Technical Policy at Mendeleev University of Chemical Technology, ORCID: 0000-0001-9051-7158

Поступила в редакцию/received: 16.08.2026; после рецензирования/revised: 25.09.2026; принята/accepted: 27.09.2026.

1. Введение

Фазоизменяемые материалы (ФИМ), в частности сплавы на основе теллуридов, такие как $Ge_2Sb_2Te_5$ (GST_{225}), являются основой современных технологий энергонезависимой памяти и «in-memory» вычислений, благодаря способности к быстрому и обратимому переключению между стабильными аморфной и кристаллической фазами. Это позволяет им существовать в разных состояниях с заметно различающимися оптическими и электрофизическими свойствами [1-4]. Уникальным свойством ФИМ является возможность надежно и воспроизводимо переключать их оптические и электрические характеристики в течение миллиардов циклов переключения.

Тем не менее, существующие подходы к реализации устройств на

основе ФИМ сталкиваются с рядом ограничений, таких, например, как трудности плавного управления сопротивлением структуры электрическими методами или высокие технологические требования к реализации архитектуры наноразмерных систем [5]. Для решения этих проблем необходима разработка новых архитектур, способных преодолеть текущие ограничения.

Эффективная реализация фазовых переходов в фазоизменяемых материалах невозможна без способности локализовать нагрев на масштабе десятков нанометров и обеспечить быстрое охлаждение для аморфизации [1, 2]. Эта задача решается с помощью специальной конструкции, известной как нагреватель (heater), который одновременно выполняет функции нижнего электрода [6]. Локализация тепла достигается за счет того, что большая часть тепла, выделяемого в нагревателе, направляется вверх, в малый объем ФИМ, а не вглубь подложки.

Другой возможный вариант исполнения – это структура типа «гриб» (mushroom), где активный материал покрывает всю поверхность нагревателя [7-9]. Это упрощает технологическое исполнение, однако несколько возрастает необходимая для переключения мощность. Выбор конструкции и материалов имеет решающее значение для минимизации энергопотребления, достижения высокой стабильности и надежности работы устройств этого класса.

Такие зарекомендовавшие себя мемристорные конструкции на основе ФИМ с электрическим управлением представляют собой вертикальные системы, которые достаточно сложные в изготовлении. Для их изготовления, как правило, требуется несколько последовательных этапов фотолитографии, осаждения и травления для формирования кроссбар-матриц (crossbar arrays) [4, 10]. Этот 3D-процесс требует высокоточного совмещения масок, планаризации и сложного контроля толщин отдельных слоев, что увеличивает брак и себестоимость. Возможной альтернативой может стать использование стандартной концепции с использованием локального нагревателя, но реализованной в виде планарной структуры, гораздо более простой и масштабируемой с точки зрения технологии изготовления. Полностью горизонтальная (планарная) архитектура потребует только электронной литографии, а также значительно облегчит контроль качества изготовленных мемристоров, поскольку понадобится только сканирующая электронная микроскопия, а в обычных вертикальных структурах необходима просвечивающая электронная микроскопия. Кроме того, в предлагаемой нами геометрии теплоотвод от пленки может оказаться значительно лучше, а требования к механической прочности из-за термического расширения контактов значительно меньшие. Также в нашем подходе

используются структуры с меньшим количеством слоев. Простая технология при сохранении тех же геометрических размеров мемристора позволяет более гибко масштабировать структуру.

В данной работе проведено математическое моделирование структуры планарного электронного устройства на основе тонкой пленки GST_{225}. Наибольшее внимание уделяется совершенствованию архитектуры системы за счет расположения всех важных элементов в плоскости подложки и увеличения площади контакта элемента ФИМ с нагревателем таким образом, чтобы увеличить потенциал масштабирования и упростить технологические трудности, сохраняя в полной мере все рабочие характеристики.

2. Методы теоретического анализа и математического моделирования

Схема устройства показана на рис. 1. В плоскости подложки располагаются тонкопленочные общий электрод, электроды нагреватели, изготовленные из вольфрама, а также активная область, в качестве которой используется GST_{225}. Именно этот материал обеспечивает возможность переключения резистивного состояния структуры [11, 12]. При достижении температуры кристаллизации происходит перестройка его кристаллической структуры и переход из аморфной фазы в кристаллическую. Аналогично, при достижении изначально кристаллической пленкой температуры плавления и дальнейшем быстром охлаждении формируется аморфная фаза. Между общим и одним из управляющих электродов прикладываются импульсы напряжения, приводящие к джоулеву нагреву и обеспечивающие необходимое тепловое воздействие. Каждая такая пара ведет себя как отдельная мемристорная структура, а количество управляющих электродов нагревателей может быть любым. Толщина слоев структуры 100 нм, так же как ширина активной области ФИМ и ширина электродов нагревателей. Такую конструкцию можно реализовать с помощью, магнетронного распыления, электронной литографии и травления.

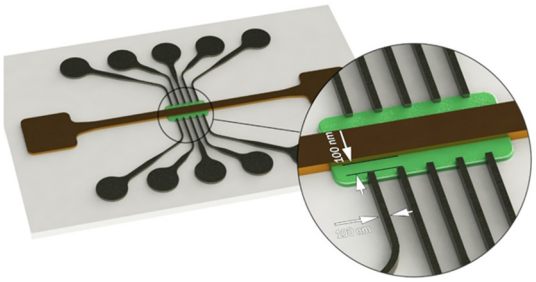

Рис. 1. Схема моделируемого устройства мемристора.

Одним из основных механизмов переключения ФИМ является джоулев нагрев электрическими импульсами, вызываемый протеканием

электрического тока через небольшую область материала, расположенного между двумя электродами. Относительно высокое сопротивление вольфрама и небольшая площадь контакта позволяют добиться контролируемого локального нагрева активной области мемристорной структуры. Этот принцип лежит в основе исследуемой в работе архитектуры. Рассматривается влияние электрических импульсов различной амплитуды и длительности.

Основой математического аппарата модели служит уравнение нестационарной теплопроводности, которое связывает изменение температуры во времени с источниками тепла и потерями тепла через теплопроводность и конвекцию. Источником тепла в данном случае является джоулев нагрев, мощность которого пропорциональна квадрату приложенного напряжения и обратно пропорциональна удельному сопротивлению материала. Уравнение становится нелинейным и требует численного решения, поскольку возникает необходимость учитывать зависимость теплофизических и электрофизических параметров материала от температуры и фазового состояния на каждом временном шаге. Расчет реализован методом конечных элементов в программном комплексе Comsol Multiphysics [13]. При моделировании также учитывается скрытая теплота фазового перехода, играющая важную роль в энергозатратах на изменение фазового состояния. Изменение фазового состояния описывается на основе решения задачи Стефана для движения границы раздела фаз в процессе переключения материала [14].

Ключевым фактором, определяющим возможность и скорость переключения, является скорость охлаждения. В такой конструкции она обеспечивается за счет малой толщины пленки (порядка 100 нм) и большой площади контакта с подложкой. Использование нагревателей позволяет локализовать область нагрева, чтобы обеспечить большую контролируемость, критически важную для практического применения управляемых элементов на основе ФИМ. Моделирование, учитывающее эти температурно-зависимые свойства, становится необходимостью для точного прогнозирования энергии переключения и оптимизации конструкции устройства до этапа изготовления.

В среде Comsol Multiphysics [13] построена описанная выше планарная геометрия. Между общим электродом, который заземлен, и нагревателем прикладывается импульс напряжения. Используется время-зависимый расчет. Изменение фазового состояния материала приводит к изменению его электропроводящих и теплофизических свойств. Если при моделировании между временными дискретами происходит изменение фазового состояния в некоторой области материала, это приводит к изменению проводимости сразу на несколько порядков. Поскольку в

реальности процесс изменения параметров материала непрерывен, то для моделирования используется сглаживание резкого перехода между физическими свойствами разных структурных фаз. В качестве такой сглаживающей функции используются логистический сигмоид – функция, описывающая непрерывный переход между двумя асимптотическими значениями.

Для каждой формируемой области подставляются теплофизические параметры, соответствующее структурной фазе. Подробное описание модели и параметров различных фазовых состояний приведено в работах [15, 16]. Учитывается охлаждение расчетной области за счет теплопроводности и конвекции. Далее производится расчет изменения электрического сопротивления от времени.

3. Результаты и обсуждение

Расчеты проводились на одной паре общий электрод – нагреватель для подбора оптимальных параметров управляющих электрических импульсов. Было показано, что из-за максимальной плотности тока на интерфейсе между нагревателем и активной областью ФИМ возникает наибольший нагрев, мощность которого спадает ближе к общему электроду. Это хорошо видно на рис. 2 а (вид сверху), отображающем распределение температуры на поверхности элемента после воздействия электрического импульса. На рис. 2 б (вид сверху) показано соответствующее распределение кристаллической и аморфной областей.

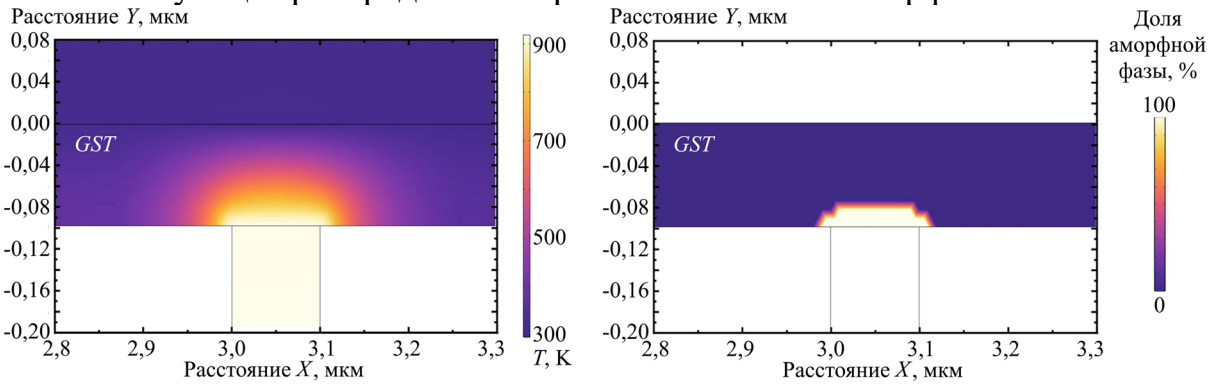

Рис. 2. Распределение температуры после воздействия электрического импульса длительностью 100 нс и амплитудой 0,5 В к одному электроду (а). Аморфная и кристаллическая области (б).

Проведены расчеты для импульсов в диапазоне амплитуд 0,1-1 В и длительностей от 2 до 500 нс. После начала формирования аморфного слоя мощность убывает пропорционально толщине этого слоя. Этим объясняется обнаруженный эффект ограничения максимальной температуры (незначительно превышает температуру плавления) и резкого замедления скорости роста аморфной области в кристаллической пленке с

увеличением длительности импульса. Таким образом, на длительностях больше 100 нс нет необходимости поддерживать длительность с большой точностью. Зависимость температуры в слое ФИМ вдоль линии, соединяющей общий и управляющий электроды, в разные моменты времени, показана на рис. 3.

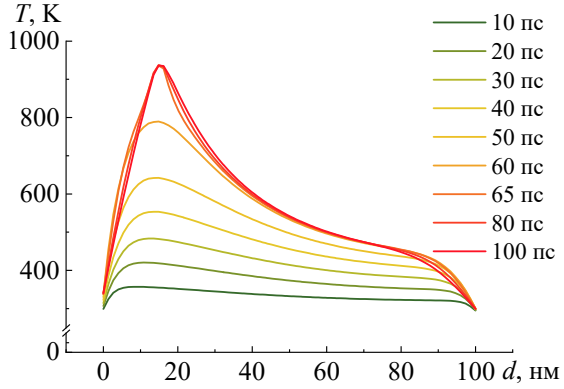

Рис. 3. График зависимости температуры от расстояния до управляющего электрода d разные моменты времени для импульса 0,5 В.

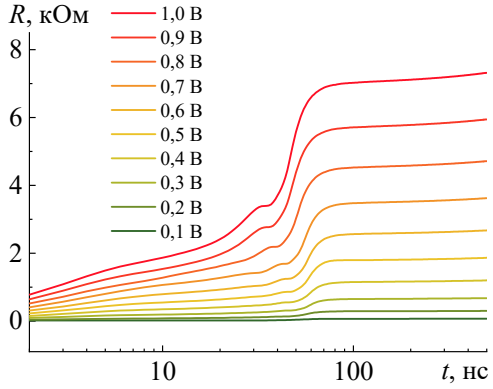

Рис. 4. Динамика изменения сопротивления структуры для различных управляющих импульсов длительностью 100 нс.

Изменение амплитуды импульса позволяет управлять резистивным состоянием такой структуры в широких пределах. Для вариации амплитуды импульсов от 0,1 до 1 В изменение сопротивления происходит на два порядка. На рис. 4 показаны зависимости сопротивления R от управляющих импульсов различной амплитуды длительностью 100 нс. Используя более плавный шаг по амплитуде управляющих импульсов, можно обеспечить большее число хорошо различимых резистивных состояний.

Хорошо видно, что изменение сопротивления прекращается примерно через 50 нс. Причем, как показали вычислительные эксперименты, это время практически не зависит от длительности управляющих импульсов. Это позволяет сделать вывод о том, что характерное время переключения описанного мемристора не зависит ни от мощности, ни от длительности управляющего импульса и не превосходит 50 нс. Кроме того, показано, что даже импульсы небольшой мощности позволяют добиться изменения сопротивления элемента почти на порядок. Такие контрасты сопротивления и времена переключения примерно соответствуют аналогичным параметрам в вертикальных структурах [9].

4. Заключение

Исследованная новая архитектура показывает ряд преимуществ по сравнению с классическими подходами к формированию мемристоров на основе тонких пленок ФИМ. Изменение параметров управляющих электрических импульсов дает возможность плавно изменять соотношение

между аморфной и кристаллической областями. Было обнаружено слабое влияние длительности импульса в диапазоне от 100 до 500 нс на итоговое сопротивление при его явной зависимости от амплитуды импульса. Таким образом, удается добиться контролируемого многоуровневого переключения исследуемой структуры. Дополнительным преимуществом является хорошая энергоэффективность: амплитуды управляющих импульсов варьируются в диапазоне от 0,1 до 1 В.

Технологическая простота изготовления предполагаемых структур, при сохранении функциональных свойств относительно классического вертикального подхода, может стать ключевым элементом, определяющим возможности массово производства таких мемристоров нового поколения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-19-90201).

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. **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.
5. **Papandreou, N.** Multilevel phase-change memory / N. Papandreou, A. Pantazi, A. Sebastian, M. Breitwisch, C. Lam, H. Pozidis, E. Eleftheriou // 17th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, 12-15 December 2010 Athens, Greece. – New York, IEEE Publ., 2010. – P. 1017-1020. DOI: 10.1109/ICECS.2010.5724687.
6. **Burr, G.W.** Phase change memory technology / G.W. Burr, M.J. Breitwisch, M. Franceschini et al. // Journal of Vacuum Science & Technology B. – 2010. – V. 28. – I. 2. – P. 223-262. DOI: 10.1116/1.3301579.
7. **Terao, M.** Electrical phase-change memory: fundamentals and state of the art / M. Terao, T. Morikawa, T. Ohta // Japanese Journal of Applied Physics. – 2009. – V. 48. – I. 8R. – Art. № 080001. – 14 p. DOI: 10.1143/JJAP.48.080001.
8. **Fong, S.W.** Phase-change memory – Towards a storage-class memory / S.W. Fong, C.M. Neumann, H.S.P. Wong // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2017. – V. 64. – I. 11. – P. 4374-4385. DOI: 10.1109/TED.2017.2746342.
9**. Le Gallo, M.** An overview of phase-change memory device physics / M. Le Gallo, A. Sebastian // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2020. – V. 53. – I. 21. – Art. № 213002. – 27 p. DOI: 10.1088/1361-6463/ab7794.
10. **Burr, G.W.** Recent progress in phase-change memory technology / G.W. Burr, M.J. Brightsky, A. Sebastian et al. // IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems. – 2016. – V. 6. – I. 2. – P. 146-162. DOI: 10.1109/JETCAS.2016.2547718.
11. **Burtsev, A.A.** Physical properties' temperature dynamics of GeTe, $Ge_2Sb_2Te_5$ and $Ge_2Sb_2Se_4Te_1$ 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.
12. **Lazarenko, P.I.** Electrical properties of the Ge2Sb2Te5 thin films for phase change memory application / P.I. Lazarenko, A.A. Sherchenkov, S.A. Kozyukhin et al. // AIP Conference Proceedings. – 2016. – V. 1727. – I. 1. – Art. 020013. – 6 p. DOI: 10.1063/1.4945968.
13. **Xiong, W.** Applications of Comsol multiphysics software to heat transfer processes: degree thesis / W. Xiong. – Helsinki: Arcada University of Applied Sciences, 2010. – 64 p.
14. **Gupta, S.C.** The classical Stefan problem. Basic concepts, modelling and analysis / S.C. Gupta. – 2nd ed.

– Elsevier, 2017. – II+726 p. DOI: 10.1016/C2017-0-02306-6.
15. **Kiselev, A.V.** Transmissivity to reflectivity change delay phenomenon observed in GeTe thin films at laserinduced reamorphization / A.V. Kiselev, V.A. Mikhalevsky, A.A. Burtsev et al. // Optics & Laser Technology. – 2021. – V. 143. – Art. № 107305. – 6 p. DOI: 10.1016/j.optlastec.2021.107305.
16. **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.

References:

1. *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.
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. 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.
4. 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.
5. 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, Greece. New York, IEEE Publ., 2010, pp. 1017-1020. DOI: 10.1109/ICECS.2010.5724687.
6. Burr G.W., Breitwisch M.J., Franceschini M. et al. Phase change memory technology, *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2010, vol. 28, issue 2, pp. 223-262. DOI: 10.1116/1.3301579.
7. Terao M., Morikawa T., Ohta T. Electrical phase-change memory: fundamentals and state of the art, *Japanese Journal of Applied Physics*, 2009, vol. 48, issue 8R, art. no. 080001, 14 p. DOI: 10.1143/JJAP.48.080001.
8. Fong S.W., Neumann C.M., Wong H.S.P. Phase-change memory – Towards a storage-class memory, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2017, vol. 64, issue 11, pp. 4374-4385. DOI: 10.1109/TED.2017.2746342.
9. Le Gallo M., A. Sebastian A. An overview of phase-change memory device physics, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, vol. 53, issue 21, art. no. 213002, 27 p. DOI: 10.1088/1361-6463/ab7794.
10. Burr G.W., Brightsky M.J., Sebastian A. et al. Recent progress in phase-change memory technology, *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 2016, vol. 6, issue 2, pp. 146-162. DOI: 10.1109/JETCAS.2016.2547718.
11. Burtsev A.A., Eliseev N.N., Mikhalevsky V.A., et a. Physical properties' temperature dynamics of GeTe, $Ge_2Sb_2Te_5$ and $Ge_2Sb_2Se_4Te_1$ phase change materials, *Materials Science in Semiconductor Processing,* 2022, vol. 150, art. no. 106907, 8 p. DOI: 10.1016/j.mssp.2022.106907.
12. Lazarenko P.I., Sherchenkov A.A., Kozyukhin S.A. et al. Electrical properties of the $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films for phase change memory application, *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1727, issue 1, art. no. 020013, 6 p. DOI: 10.1063/1.4945968.
13. Xiong W. *Applications of Comsol multiphysics software to heat transfer processes: degree thesis*. Helsinki: Arcada University of Applied Sciences, 2010, 64 p.
14. Gupta S.C. *The classical Stefan problem. Basic concepts, modelling and analysis*, 2nd ed. Elsevier, 2017, II+726 p. DOI: 10.1016/C2017-0-02306-6.
15. Kiselev A.V., Mikhalevsky V.A., Burtsev A.A. et al. Transmissivity to reflectivity change delay phenomenon observed in GeTe thin films at laser-induced reamorphization, *Optics & Laser Technology*, 2021, vol. 143, art. no. 107305, 6 p. DOI: 10.1016/j.optlastec.2021.107305.
16. 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.