УДК 539.216.2 *Краткое сообщение*

Температурная зависимость эллипсометрических параметров тонких плёнок фазоизменяемого халькогенида AIST

А.А. Невзоров[1,2], В.А. Михалевский[1], А.А. Бурцев[1], В.В. Ионин[1], 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/2026.18.094

Аннотация: Работа посвящена исследованию температурной зависимости значений показателя преломления (n) и коэффициента экстинкции (k) в спектральном диапазоне 380-1000 нм тонких плёнок фазоизменяемого халькогенида *AIST* ($Ag_5In_5Sb_{60}Te_{30}$). Методом спектроскопической эллипсометрии проведено прямое сравнение оптических свойств аморфной и кристаллической фаз в процессе нагрева от комнатной температуры до 170°C. Установлено, что нагрев аморфной плёнки до 100°C приводит к уменьшению n на 3,2% и увеличению k на 2,55% при длине волны 780 нм, а также к уменьшению n на 5% и уменьшению k на 4,2% при длине волны 910 нм. Наблюдаемое поведение показывает заметную нестабильность как аморфной, так и кристаллической фазы исследуемого материала AIST. Полученные количественные данные формируют необходимую экспериментальную основу для точного теплового и оптического моделирования устройств фазовой памяти, работающих в ближнем инфракрасном диапазоне. Эффективное применение указанного материала требует оптимизации и контроля методов синтеза, свойств тонких плёнок и точной кинетики фазовых превращений. Тем не менее, AIST может быть рекомендован для задач, где приоритетом является высокая скорость переключения, а не требования к стабильности и многоуровневому хранению состояний.

Ключевые слова: халькогениды, фазоизменяемые материалы, тонкие пленки, кристаллизация, оптические свойства.

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»

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»

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»

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

Short Communication

Temperature dependence of the ellipsometric parameters of thin films of the AIST phase-change chalcogenide

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

[1]*National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*
[2]*University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia*
[3]*Mendeleev University of Chemical Technology, Moscow, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.094

Abstract: This work is devoted to the study of the temperature dependences of the refractive index (*n*) and extinction coefficient (*k*) of thin films of the phase-change chalcogenide *AIST* ($Ag_5In_5Sb_{60}Te_{30}$) in the spectral range of 380-1000 nm. Using spectroscopic ellipsometry, a direct comparison of optical properties of the amorphous and crystalline phases was performed during heating from room temperature to 170°C. It was found that heating the amorphous film to 100°C leads to a decrease in *n* by 3,2% and an increase in *k* by 2,55% at a wavelength of 780 nm, as well as a decrease in *n* by 5,0% and a decrease in *k* by 4,2% at a wavelength of 910 nm. The observed behavior indicates a notable instability of both the amorphous and crystalline phases of the investigated AIST material. The quantitative data obtained provide a necessary experimental basis for accurate thermal and optical modeling of phase-change memory devices operating in the near-infrared range. The effective application of this material requires optimization and control of synthesis methods, thin-film properties, and the precise kinetics of phase transformations. Nevertheless, AIST may be suitable for applications where high switching speed is the primary requirement, rather than stability and multilevel state retention.

Keywords: chalcogenides, phase change materials, thin films, crystallization, optical properties.

Alexey A. Nevzorov – Ph. D., Researcher, National Research Centre «Kurchatov Institute», Researcher at Laboratory of Photonic Gas Sensors, University of Science and Technology MISIS, ORCID: 0000-0001-5602-6355
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 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, Mendeleev University of Chemical Technology, ORCID: 0000-0001-9051-7158

Поступила в редакцию/received: 01.07.2026; после рецензирования/revised: 04.08.2026; принята/accepted: 06.08.2026.

1. Введение

Хранение информации в халькогенидных фазоизменяемых материалах (ФИМ) реализуется за счёт контраста их свойств (оптических, электрофизических, магнитных) между аморфным и кристаллическим состояниями [1-3]. Два класса материалов — с преобладанием нуклеации (зародышеобразования) и с преобладанием роста кристаллитов — уже заняли свою нишу в оптических устройствах памяти (CD-RW, DVD-RW) [4]. Устройства на основе ФИМ должны обеспечивать высокую скорость фазовых переходов, выраженный контраст свойств фаз, стабильность

фазовых состояний и энергоэффективность переключения.

Режимы кристаллизации двух наиболее распространённых материалов *GST* ($Ge_2Sb_2Te_5$) и *AIST* ($Ag_5In_5Sb_{60}Te_{30}$) различаются из-за большого различия в их скоростях зародышеобразования [5]. Высокая скорость роста кристаллов обеспечивает экстремально высокую скорость переключения, характерную для оптических дисков, но сопровождается повышенной стохастичностью (случайностью) процесса. Это ограничивает применение *AIST* в многоуровневых (мультибитных) ячейках памяти, требующих высокой точности промежуточных состояний [6]. В результате *AIST* остаётся преимущественно материалом для высокоскоростной записи (например, оптические диски), а не для глубинного хранения данных. Тем не менее, уникальные структурные и квантовые свойства делают данный материал перспективным для нейроморфных и квантовых приложений.

Зародышеобразование – это стохастический (вероятностный) процесс, опосредованный тепловыми колебаниями. Два конкурирующих эффекта, движущая сила (объемный эффект) и межфазная энергия (поверхностный эффект), определяют высоту барьера свободной энергии для зародышеобразования [7]. Согласно классической теории зародышеобразования, свободная энергия системы возрастает по мере добавления атомов к ядру с размером, близким к критическому, на границе раздела. Чем больше движущая сила и/или ниже межфазная энергия, тем меньше размер критического зародыша. В классической теории скорость зародышеобразования имеет четко выраженный максимум при температуре, определяемой двумя факторами, действующими в противоположном направлении друг от друга: с понижением температуры движущая сила увеличивается (уменьшая размер критического зародыша), но атомные взаимодействия также уменьшаются (снижая скорость присоединения атомов к ядрам) [2]. Однако такое приближение неадекватно для описания сверхбыстрых процессов зародышеобразования в ФИМ как следствие неизотермического состояния и неравновесной динамики в устройствах.

Температурные диапазоны, в которых можно долговременно хранить информацию в пленке ФИМ определяется стабильностью фазового состава. Такие температуры, при которых могут существовать и не разрастаться кристаллические зародыши, а аморфная фаза является метастабильной всегда ниже температуры стеклования материала. Для ФИМ скорость изменения температуры также влияет на особенности фазовых переходов, однако для определения долговременной стабильности разумно рассматривать медленные изменения температуры, т.е. квазиравновесное состояние материала. Температура кристаллизации

AIST около 150°C [8]. Известно, что при более низких температурах скорость роста кристаллической фазы так мала, что соотношение фазового состава можно считать неизменным даже для больших интервалов времени [9, 10].

В данной работе в широком спектральном ИК-диапазоне исследованы температурные зависимости показателя преломления и коэффициента экстинкции тонких плёнок фазоизменяемого материала *AIST* методом спектроскопической эллипсометрии. Проведено прямое сравнение оптических свойств аморфной и кристаллической фаз в процессе нагрева от комнатной температуры до температуры кристаллизации.

2. Техника эксперимента и методы подготовки образцов

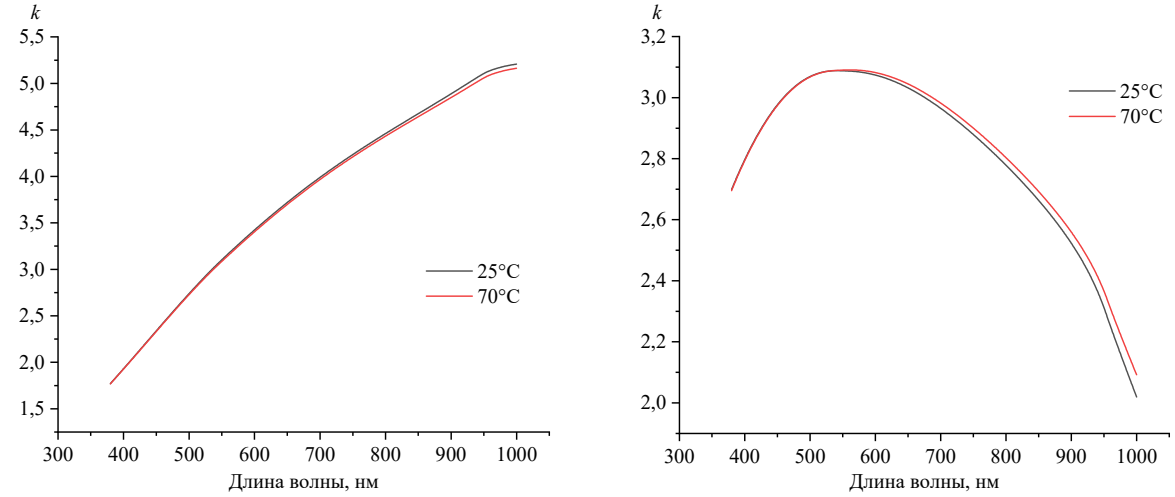
На спектральном эллипсометре Eoptics SE-VM (Wuhan Eoptics Technology Co, Ltd, Китай) были измерены показатель преломления n и коэффициент экстинкции k тонких пленок (100 нм) *AIST* в спектральном диапазоне от 380 нм до 1000 нм в зависимости от температуры T . Пленки были получены методом вакуумного магнетронного напыления на стеклянной подложке. Угол, при котором проводилось измерение спектров составлял 65°.

Для нагрева образца пленки использовался термостатический столик. Нагрев образца производился с шагом 20°C в диапазоне от комнатной (23°C) до 120°C. Затем в диапазоне температур от 120°C до 160°C с шагом 10°C. Далее спектры измерялись при понижении температуры от 160°C до комнатной с шагом 50°C.

3. Результаты измерений

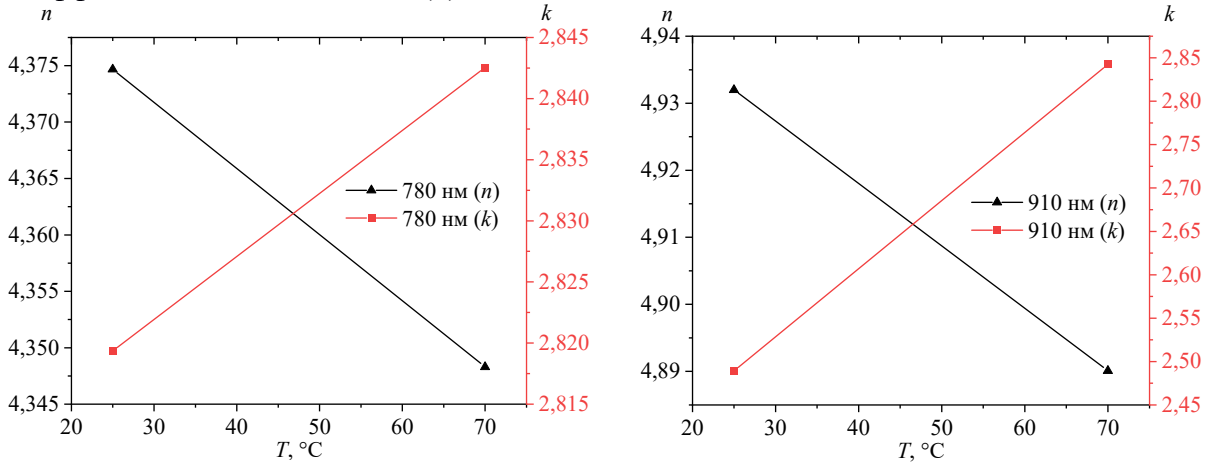
На рис. 1 представлены спектры показателя преломления n и коэффициента экстинкции k пленки *AIST*, измеренные при двух температурах 25°C и 70°C. На рис. 2 показано, как меняются эллипсометрические параметры для двух длин волн.

При 100°C произошли существенные изменения показателя преломления n и коэффициента экстинкции k , что вероятно связано с кристаллизацией образца или нестабильностью аморфной фазы. Вплоть до полной кристаллизации образец представлял собой сложную структуру с разным и нестационарным соотношением структурных фаз [11]. Однако температура, при которой произвольный фазовый состав долговременно стабилен, определяется температурой стеклования при низком темпе нагрева материала [2]. После полной кристаллизации пленки *AIST* проводились измерения спектров показателя преломления n и коэффициента экстинкции k в температурном диапазоне от 200°C до 50°C (см. рис. 3).



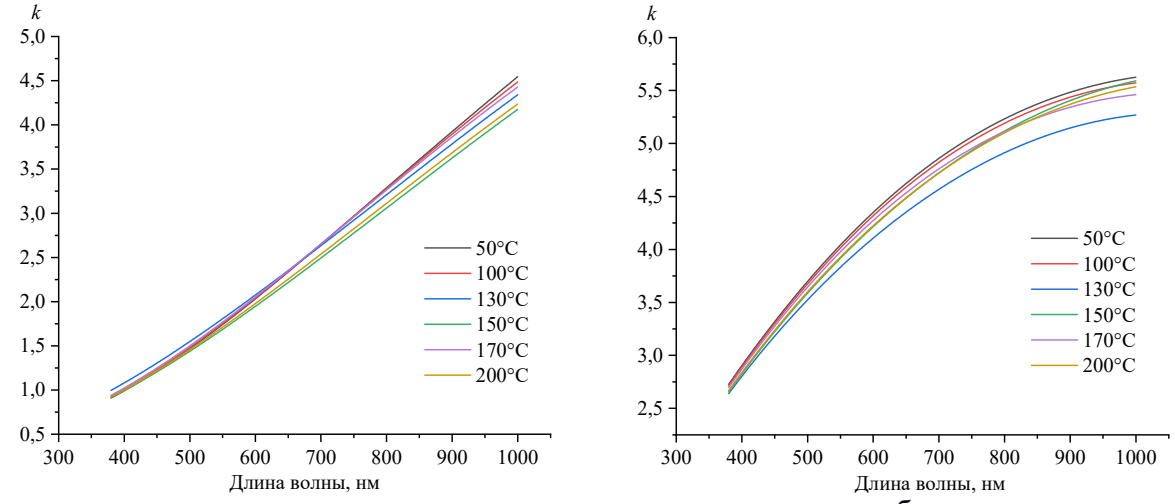
а б

Рис. 1. Температурные зависимости спектров показателя преломления n (а) и коэффициента экстинкции k (б) пленки *AIST*.



а б

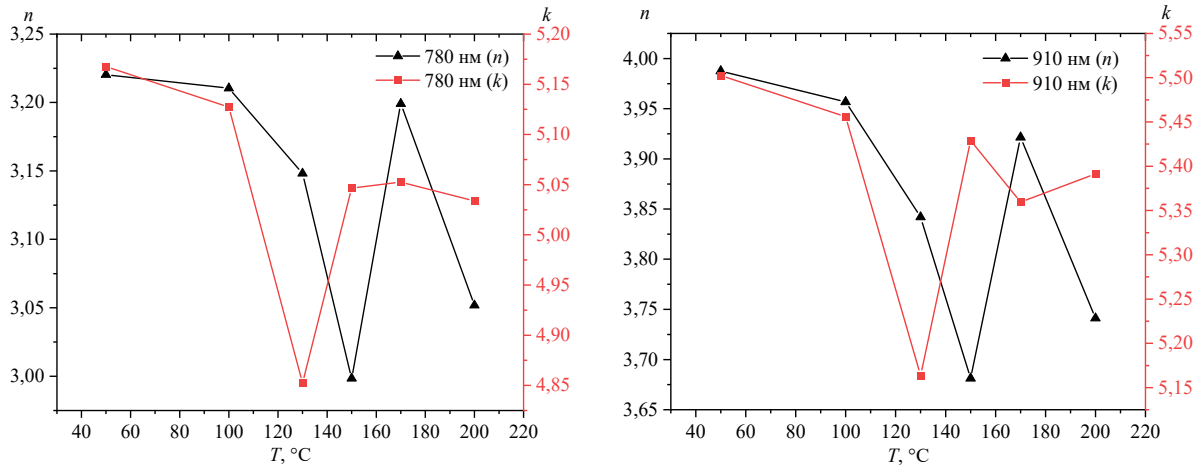
Рис. 2. Температурные зависимости спектров показателя преломления n и коэффициента экстинкции k пленки *AIST* для двух длин волн 780 нм (а) и 910 нм (б).



а б

Рис. 3. Зависимости спектров показателя преломления n (а) и коэффициента экстинкции k (б) пленки *AIST* от температуры.

Температурные зависимости оптических свойств для длин волн 780 нм и 910 нм приведены на рис. 4. Надо отметить, что характерные температуры стеклования могут зависеть от толщин пленок и особенностей их напыления, однако эти значения меняются всего в пределах десятков Кельвин. Физические ограничения и механизмы деградации систем на основе ФИМ, влияющие на надёжность хранения информации в элементах оптической памяти, определяются разными факторами. Так, например, нижняя граница температурного диапазона определяется возможностью хрупкого разрушения пленки из-за различия коэффициентов термического расширения между пленкой ФИМ и подложкой (либо между верхнележащими слоями), замедлением кинетики фазовых переходов при переключении, а также повышением удельного сопротивления кристаллической фазы [12, 13]. Верхняя граница рабочего температурного диапазона ограничена в первую очередь термически активируемой кристаллизацией аморфной фазы, диффузионными процессами на границах раздела и сегрегацией элементов при длительном нагреве [14, 15].



а б

Рис. 4. Температурные зависимости спектров показателя преломления n и коэффициента экстинкции k пленки *AIST* для двух длин волн 780 нм (а) и 910 нм (б).

4. Заключение

Установлено, что температурный дрейф оптических свойств кристаллической фазы *AIST* становится значительным уже при температурах выше 100°C. Таким образом, по сравнению с *GST*, *AIST* демонстрирует существенно более низкую стабильность кристаллического состояния даже в условиях умеренного нагрева. В практических приложениях именно кристаллическая фаза определяет оптические характеристики конечного устройства.

Типичная программируемая область устройства на основе ФИМ представляет собой аморфную зону переменного размера,

сформированную внутри полностью кристаллизованной матрицы. Следовательно, дрейф оптических свойств именно кристаллической фазы является критическим фактором, ограничивающим практическую применимость устройств на основе фазоизменяемых материалов. Это накладывает жёсткие требования к термической стабильности кристаллической фазы, особенно для устройств, работающих в условиях повышенных температур или при интенсивном нагреве в процессе переключения.

В отличие от аморфной фазы, свойства которой могут быть скорректированы в процессе синтеза, свойства кристаллической фазы определяются её кристаллической структурой и могут изменяться необратимо, что осложняет долгосрочную эксплуатацию таких устройств. Поэтому разработка материалов с высокой температурной стабильностью кристаллической фазы остаётся одной из ключевых задач в области фазоизменяемых материалов для оптических и фотонных приложений.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт».

Библиографический список:

1. **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.
2. 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.
3. **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.
4. **Zhou, G.F.** Materials aspects in phase change optical recording / G.F. Zhou // Materials Science and Engineering: A. – 2001. – V. 304-306. – P. 73-80. DOI: 10.1016/S0921-5093(00)01448-9.
5. **Kalb, J.A.** Kinetics of crystal nucleation in undercooled droplets of Sb- and Te-based alloys used for phase change recording / J.A. Kalb, F. Spaepen, M. Wuttig // Journal of Applied Physics. – 2005. – V. 98. – I. 5. – P. 054910-1-054910-7. DOI: 10.1063/1.2037870.
6. **Papandreou, N.** Multilevel phase-change memory / N. Papandreou, A. Pantazi, A. Sebastian, et al. // 17th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems. – 2010. – P. 1017-1020. DOI: 10.1109/ICECS.2010.5724687.
7. **Кристиан, Дж.В.** Теория превращений в металлах и сплавах. Часть 1. Термодинамика и общая кинетическая теория / Дж.В. Кристиан; пер. с англ. – М: Изд-во «Мир», 1978. – 806 с.
8. **Wuttig, M.** Phase-change materials for rewriteable data storage / M. Wuttig, N. Yamada // Nature materials. – 2007. – V. 6. – I. 11. – P. 824-832. DOI: 10.1038/nmat2009.
9**. McGieson, I.** Crystallization kinetics and thermodynamics of an Ag–In–Sb–Te phase change material using complementary in situ microscopic techniques. / I. McGieson, V.L. Bird, C.M. Barr et al. //Journal of Materials Research. – 2022. – V. 37. – I. 7. – P. 1281-1295. DOI: 10.1557/s43578-022-00486-5.
10. **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.
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. **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.

13. **Lee, B.S.** Nanoscale nuclei in phase change materials: Origin of different crystallization mechanisms of $Ge_2Sb_2Te_5$ and AgInSbTe / B.S. Lee, R.M. Shelby, S. Raoux et al. // Journal of Applied Physics. – 2014. – V. 115. – I. 6. – Article № 063506. – 10 p. DOI: 10.1063/1.4865295.
14. **Ziegler, S.** Nucleation of AgInSbTe films employed in phase-change media / S. Ziegler; M. Wuttig // Journal of Applied Physics. – 2006. – V. 99. – I. 6. – Article № 064907. – 8 p. DOI: 10.1063/1.2184428.
15. **Matsunaga, T.** From local structure to nanosecond recrystallization dynamics in AgInSbTe phase-change materials / T. Matsunaga, J. Akola, S. Kohara et al. // Nature Materials. – 2011. – V. 10. – P. 129-134. DOI: 10.1038/nmat2931.

References:

1. 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.
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. 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.
4. Zhou G.F. Materials aspects in phase change optical recording, *Materials Science and Engineering: A*, 2001, vol. 304-306, pp. 73-80. DOI: 10.1016/S0921-5093(00)01448-9.
5. Kalb J.A., Spaepen F., Wuttig M. Kinetics of crystal nucleation in undercooled droplets of Sb- and Te-based alloys used for phase change recording, *Journal of Applied Physics*, 2005, vol. 98, issue 5, pp. 054910-1-054910-70. DOI: 10.1063/1.2037870.
6. Papandreou N., Pantazi A., Sebastian A. et al. Multilevel phase-change memory, *17th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, 2010, pp. 1017-1020. DOI: 10.1109/ICECS.2010.5724687.
7. Christian J.W. *The theory of transformations in metals and alloys*, 3rd ed. Oxford, Pergamon, 2002, vol. 1-2, 1200 p. DOI: 10.1016/B978-0-08-044019-4.X5000-4.
8. 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.
9. McGieson I., Bird V. L., Barr C. M. et. al. Crystallization kinetics and thermodynamics of an Ag–In–Sb–Te phase change material using complementary in situ microscopic techniques, *Journal of Materials Research*, 2022, vol. 37, issue 7, pp. 1281-1295. DOI: 10.1557/s43578-022-00486-5.
10. 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.
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. 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.
13. Lee S., Shelby R.M., Raoux S. et al. Nanoscale nuclei in phase change materials: Origin of different crystallization mechanisms of $Ge_2Sb_2Te_5$ and AgInSbTe, *Journal of Applied Physics*, 2014, vol. 115, issue 6, art. no. 063506, 10 p. DOI: 10.1063/1.4865295.
14. Ziegler S.; Wuttig M. Nucleation of AgInSbTe films employed in phase-change media, *Journal of Applied Physics*, 2006, vol. 99, issue 6, art. no. 064907. – 8 p. DOI: 10.1063/1.2184428.
15. Matsunaga T., Akola J., Kohara S. et al. From local structure to nanosecond recrystallization dynamics in AgInSbTe phase-change materials, *Nature Materials*, 2011, vol. 10, pp. 129-134. DOI: 10.1038/nmat2931.