

УДК539.216.2

Оригинальная статья

Особенности кинетики лазерной кристаллизации тонких пленок халькогенидных фазоизменяемых материалов $GeTe$ и $Ge_2Sb_2Te_5$

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

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный
исследовательский центр «Курчатовский институт»

123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

murrkiss2009@yandex.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.603

Аннотация: В работе представлены результаты теоретического анализа кристаллизации тонких пленок фазоизменяемых материалов $GeTe$ и $Ge_2Sb_2Te_5$ под действием импульсного лазерного излучения. Изменение фазового состояния и оценка доли кристаллической фазы проводились на основе изменения коэффициента оптического отражения зондирующего излучения от поверхности образца пленки. Для оценки кинетических особенностей фазового превращения под действием лазерного излучения применялся формализм на основе теории Колмогорова – Джонсона – Мэла – Аврами. На основе экспериментальных данных изменения отражения при кристаллизации исследуемых материалов были построены графики и определены постоянные Аврами. Показано, что $GeTe$ демонстрирует одноступенчатый процесс кристаллизации, что связано с высокой скоростью зародышеобразования и ростом кристаллитов во всех направлениях. Материал $Ge_2Sb_2Te_5$ отличает двухступенчатый процесс кристаллизации с изменением постоянной Аврами, что связано с влиянием многих факторов, таких как геометрия пленки, особенности напыления и т.д. и объясняется преобладанием высоко стохастичного зародышеобразования.

Ключевые слова: лазерная кристаллизация, фазовые переходы, халькогениды, фазоизменяемые материалы, тонкие пленки, кинетика.

1. Введение

Фазоизменяемые материалы (ФИМ) существуют в двух различных стабильных состояниях – кристаллическом и аморфном, которые демонстрируют совершенно разные физические свойства [1, 2]. Наиболее важной особенностью этого класса материалов является способность многократно и быстро переключаться между этими состояниями путем нагрева [1]. Концепция использования фазовых состояний ФИМ в качестве логических «1» и «0» и переключения между этими состояниями были широко изучены для хранения данных. Используя контраст оптических свойств, на основе ФИМ уже были реализованы коммерчески успешные технологии оптических носителей информации, таких как CD, DVD и Blu-ray диски [3]. Позже на основе переключаемого большого контраста электрического сопротивления были созданы энергонезависимые электронные устройства памяти [4]. Всё больший интерес в последние годы вызывает возможность создания оптических и электронных архитектур для хранения и обработки информации, например

нейроморфных устройств и систем «вычислений в памяти», что обеспечит эффективность за счет преодоления узкого места в традиционной архитектуре фон Неймана (когда большая часть энергии расходуется из-за необходимости постоянной передачи данных между процессором и модулем памяти) [5, 6].

Наиболее популярными и распространенными являются материалы линии Н. Ямады, представляющие сплавы теллуридов $GeTe-Sb_2Te_3$. Широкое применение нашло тройное соединение $Ge_2Sb_2Te_5$ (GST) благодаря низкой температуре кристаллизации и плавления, что обеспечивает высокую скорость переключения фазы и энергетическую эффективность [7]. Теллурид германия $GeTe$ обладает высокой термической стабильностью, что позволяет рассматривать его как альтернативу GST в областях, где необходима работа при более высоких температурах [8]. Дополнительной возможностью изменить свойства соединений линии $GeTe-Sb_2Te_3$ является их легирование такими элементами, как Se , N , Si и т.д. [9-11].

Необходимо заметить, что в последние годы всё больше внимания привлекают к себе малоисследованные семейства халькогенидов, в частности сульфиды и селениды [12]. Во многом благодаря своим оптическим характеристикам, данные материалы могут рассматриваться в качестве основы для оптических устройств. Тем не менее, пока наиболее зрелыми и технологически отработанными являются устройства на основе тонких пленок теллуридов [13, 14].

Работа посвящена исследованию кристаллизации тонких пленок материалов $GeTe$ и GST под действием импульсного лазерного излучения и анализу кинетики кристаллизации на основе подхода Колмогорова – Джонсона – Мэла – Аврами (КДМА).

2. Техника эксперимента и методы теоретического анализа

Серия образцов тонких пленок (100 нм) $GeTe$ и GST была получена методом вакуумного термического осаждения на подложки из кварцевого стекла (SiO_2). Условия синтеза и свойства образцов тонких пленок приведены в работах [15, 16]. Скорости фазовых переходов в тонких пленках исследовались с помощью регистрации изменения их оптических свойств (коэффициентов пропускания и отражения) в схеме «pump-probe». Регистрации изменения коэффициентов пропускания и поверхностного отражения, связанного с фазовыми переходами в пленках $GeTe$ и GST под действием импульсного лазерного излучения ($\lambda=532$ нм, $\tau=20$ нс), осуществлялась на длине волны 1064 нм непрерывного лазера мощностью 10 мВт (probe). Профиль интенсивности воздействующего импульса

(pump) был близок к профилю «top hat», эффективность применения которого была ранее продемонстрирована в работе [16].

Измерение показателя отражения R эффективно при оценке фазового перехода, в частности, по его динамике возможно точно определить долю образовавшейся новой фазы и прогресс кристаллизации [17, 18]. На его основе можно оценить значение параметра χ , характеризующим долю образовавшейся фазы:

$$\chi(t) = \frac{R(t) - R_{am}}{R_{cr} - R_{am}}, \quad (1)$$

где $R(t)$, R_{am} , R_{cr} соответствуют значениям коэффициента отражения, полученному в результате проведённого измерения и его значений для аморфной и кристаллической фаз.

Для анализа кинетических свойств полученные в эксперименте временные зависимости аппроксимируются уравнением Колмогорова – Джонсона – Мэла – Аврами (КДМА) [19-21]:

$$\chi(t) = 1 - \exp[-(kt)^n], \quad (2)$$

где n – показатель степени (постоянная) Аврами, характеризующий природу зародышеобразования (нуклеации) и роста кристалла, k – кинетический коэффициент, зависящий от температуры согласно уравнению Аррениуса:

$$k(T) = \mathcal{G} \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right), \quad (3)$$

здесь $\mathcal{G}$ – частотный коэффициент, E_a – энергия активации процесса фазового перехода, k_B – постоянная Больцмана.

Поскольку значение k постоянно во времени, график зависимости величины $\ln\{-\ln[1 - \chi(t)]\}$ от $\ln(t)$ часто аппроксимируют прямой с наклоном n . Теория КДМА применима ко многим реальным превращениям (кристаллизация, переключение сегнетоэлектрика и др.), на основании величины n можно сделать выводы о механизме и особенностях фазового превращения. Показатель Аврами включает в себя информацию о кинетике следующим образом [20]:

$$n = am + b, \quad (4)$$

здесь a , b и m – показатели роста, зародышеобразования и числа пространственных измерений.

Первоначально считалось, что n имеет целочисленное значение от 1 до 4, что отражает характер рассматриваемого фазового перехода. Например, можно сказать, что значение $n = 4(3+1)$ получает вклады от трех измерений роста, а одно представляет постоянную скорость зародышеобразования. Существуют альтернативные деривации, где n имеет другое значение, в том числе дробное. В частности, для многих

процессов даже число m может иметь дробное значение (кристаллизация фрактальных кластеров) [22, 23].

3. Результаты и обсуждение

Ниже приводятся результаты анализа кинетики кристаллизации тонких пленок материалов *GeTe* и *GST* под действием лазерных импульсов. Процесс зарождения и роста кристаллической фазы оценивается по временной динамике показателя отражения [15, 16]. На основе графиков КДМА определяется значение постоянной Аврами.

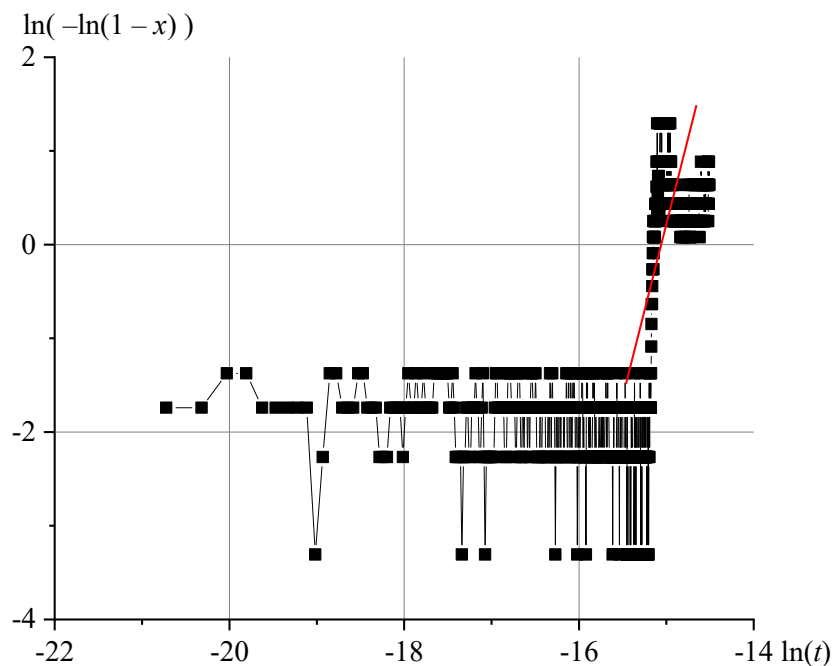


Рис. 1. График КДМА, соответствующий кристаллизации тонкой пленки *GeTe*. Красным цветом выделена линия, аппроксимирующая значение постоянной Аврами.

На основании проведенного расчета и анализа можно сделать заключение, что фазовый переход в пленке *GeTe* носит следующий характер: быстрый рост кристаллической фазы наряду с интенсивным зародышеобразованием (или наличие скрытых центров кристаллизации в пленке в результате напыления). Для теллурида германия характерен одноступенчатый процесс кристаллизации, а значение постоянной Аврами соответствует приведённому в литературе ($n \approx 4$) [24].

Для пленки *GST* более характерным является двухступенчатый процесс с изменением показателя Аврами [18].

Изменение показателя Аврами ($n \approx 1$ на первом этапе, $n \approx 2,5$ на втором) может быть связано с тем, что на первом этапе преобладает зародышеобразование, а на втором этапе рост (скорость роста выше скорости зародышеобразования) [25]. Значение $n \approx 2,5$ совпадает с

полученным и проанализированном в работе [18], где в качестве объяснения приводятся различные механизмы кристаллизации или роста в горизонтальном и вертикальном направлениях. Изменения наклона на графике КДМА происходят и при изотермических переходах, что также связывают с преобладанием роста или зародышеобразования на разных этапах кристаллизации [26, 27]. В работе [28] высказывается предположение, что изменение постоянной Аврами может быть связано с неидеальной геометрией пленки и соответствующим временем зародышеобразования.

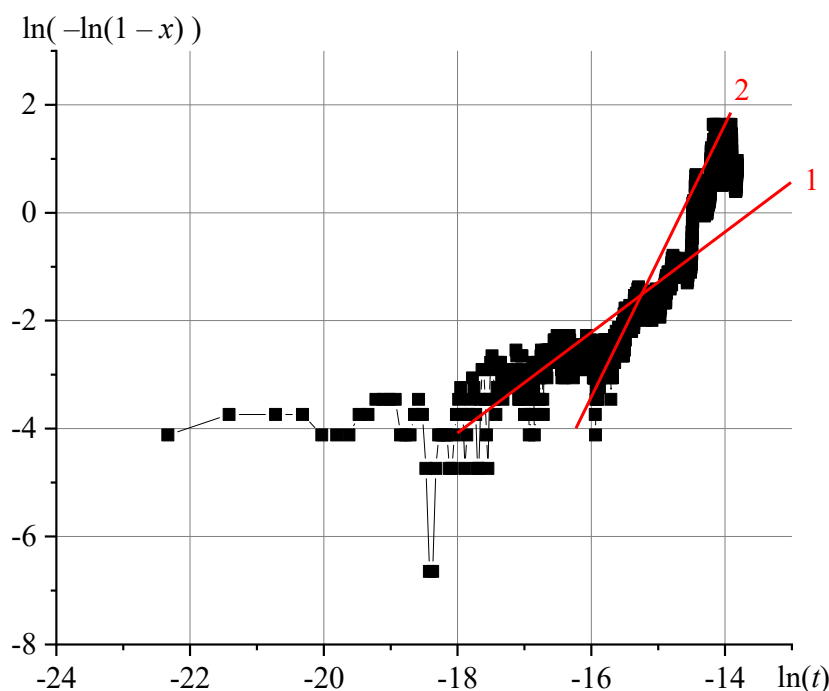


Рис. 2. График КДМА, соответствующий кристаллизации тонкой пленки *GST*. Красным цветом выделены линии, аппроксимирующие значение постоянной Аврами (цифры 1 и 2 соответствуют прямым для двух этапов фазового превращения).

4. Заключение

На основе экспериментальных данных были проанализированы особенности кинетики кристаллизации тонких пленок фазоизменяемых материалов *GeTe* и *GST*. Показано, что эти материалы различаются по кинетическим свойствам, в частности, теллурид германия демонстрирует как высокую скорость роста, так и интенсивное зародышеобразование. В свою очередь сплав *GST* демонстрирует изменение постоянной Аврами, что может быть связано с высокой степени стохастичности при преобладании в кристаллизации зародышеобразования. Поэтому на кристаллизацию пленки могут влиять разные факторы, связанные с геометрией пленки и методами напыления.

Несмотря на развитие теоретических методов расчета и анализа,

быструю качественную оценку особенностей кристаллизации материалов, даже тонких пленок, можно получить, основываясь на формальном подходе Колмогорова – Джонсона – Мэла – Авраами. Он может быть использован для анализа температурных зависимостей скорости фазовых переходов, а также для оценки времени, необходимого для достижения равновесия между различными фазами, что позволит подобрать материал для конкретной технологической задачи.

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

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. **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.
4. **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.
5. **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.
6. **Lian, C.** Photonic (computational) memories: tunable nanophotonics for data storage and computing / C. Lian, C. Vagionas, T. Alexoudi et. al. // Nanophotonics. – 2022. – V. 11. – I. 17. – P. 3823-3854. DOI: 10.1515/nanoph-2022-0089.
7. **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.
8. **Singh, K.** A review on GeTe thin film-based phase-change materials / K. Singh, S. Kumari, H. Singh et al. // Applied Nanoscience. – 2023. – V. 13. – I. 1. – P. 95-110. DOI: 10.1007/s13204-021-01911-7.
9. **Sahoo, D.** GSST phase change materials and its utilization in optoelectronic devices: A review / D. Sahoo, R. Naik // Materials Research Bulletin. – 2022. – V. 148. – Art. № 111679. – 13 p. DOI: 10.1016/j.materresbull.2021.111679.
10. **Bala, N.** Recent advances in doped Ge₂Sb₂Te₅ thin film based phase change memories / N. Bala, B. Khan, K. Singh et al. // Materials Advances. – 2023. – V. 4. – I. 3. – P. 747-768. DOI: 10.1039/D2MA01047J.
11. **Yang, F.** Effect of Si doping on the structure and optical properties of Ge₂Sb₂Te₅ studied by ab initio calculations / F. Yang, X. Tang, T. Chen et al. // Computational Materials Science. – 2019. – V. 168. – P. 253-259. DOI: 10.1016/j.commatsci.2019.05.019.
12. **Delaney, M.** A new family of ultralow loss reversible phase-change materials for photonic integrated circuits: Sb₂S₃ and Sb₂Se₃ / M. Delaney, I. Zeimpekis, D. Lawson et al. // Advanced Functional Materials. – 2020. – V. 30. – I. 36. – Art. № 2002447. – 10 p. DOI: 10.1002/adfm.202002447.
13. **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.
14. **Abdollahramezani, S.** Tunable nanophotonics enabled by chalcogenide phase-change materials / S. Abdollahramezani, O. Hemmatyar, H. Taghinejad et al. // Nanophotonics. – 2020. – V. 9. – I. 5. – P. 1189-1241. DOI: 10.1515/nanoph-2020-0039.
15. **Kiselev, A.V.** Transmissivity to reflectivity change delay phenomenon observed in GeTe thin films at laser-induced 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 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 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.
17. **Huber, E.** Laser-induced crystallization of amorphous GeTe: A time-resolved study / E. Huber, E.E. Marinero // *Physical Review B*. – 1987. – V. 36. – I. 3. – P. 1595-1604. DOI: 10.1103/PhysRevB.36.1595.
18. **Weidenhof, V.** Laser induced crystallization of amorphous $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ films/ V. Weidenhof, I. Friedrich, S. Ziegler, M. Wuttig // *Journal of Applied Physics*. – 2001. – V. 89. – I. 6. – P. 3168-3176. DOI: 10.1063/1.1351868.
19. **Колмогоров, А.Н.** К статистической теории кристаллизации металлов / А.Н. Колмогоров // *Известия Академии наук СССР. Серия математическая*. – 1937. – Т. 1. – Вып. 3. – С. 355-359.
20. **Avrami, M.** Kinetics of phase change. II Transformation-time relations for random distribution of nuclei / M. Avrami // *The Journal of chemical physics*. – 1940. – V. 8. – I. 2. – P. 212-224. DOI: 10.1063/1.1750631.
21. **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.
22. **Андреева, Л.В.** Закономерности кристаллизации растворенных веществ из микрокапли / Л.В. Андреева, А.С. Новоселова, П.В. Лебедев-Степанов и др. // *Журнал технической физики*. – 2007. – Т. 77. – № 2. – С. 22-30.
23. **Бурцев, А.А.** Анализ кристаллических структур на поверхности нержавеющей стали / А.А. Бурцев, О.Я. Бутковский // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2019. – Вып. 11. – С. 107-114. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.107.
24. **Lu, Q.M.** Microstructural measurements of amorphous GeTe crystallization by hot-stage optical microscopy / Q.M. Lu, M. Libera // *Journal of Applied Physics*. – 1995. – V. 77. – I. 2. – P. 517-521. DOI: 10.1063/1.359034.
25. **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.
26. **Yang, I.** Effect of doped nitrogen on the crystallization behaviors of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ / I. Yang, K. Do, H.J. Chang et al. // *Journal of The Electrochemical Society*. – 2010. – V. 157. – № 4. – P. H483-H486. DOI: 10.1149/1.3321759.
27. **Do, K.** Crystallization behaviors of laser induced $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ in different amorphous states / K. Do, D. Lee, H. Sohn et al. // *Journal of The Electrochemical Society*. – 2010. – V. 157. – № 3. – P. H264-H267. DOI: 10.1149/1.3274225.
28. **Ruitenbergh, G.** Determination of the isothermal nucleation and growth parameters for the crystallization of thin $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ films / G. Ruitenbergh, A.K. Petford-Long, R.C. Doole // *Journal of Applied Physics*. – 2002. – V. 92. – I. 6. – P. 3116-3123. DOI: 10.1063/1.1503166.

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. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Lian C., Vagionas C., Alexoudi T. et al. Photonic (computational) memories: tunable nanophotonics for data storage and computing, *Nanophotonics*, 2022, vol. 11, issue 17, pp. 3823-3854. DOI: 10.1515/nanoph-2022-0089.
7. 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.
8. Singh K., Kumari S., Singh H. et al A review on GeTe thin film-based phase-change, *Applied Nanoscience*, 2023, vol. 13, issue 1, pp. 95-110. DOI: 10.1007/s13204-021-01911-7.
9. Sahoo D., Naik R. GSST phase change materials and its utilization in optoelectronic devices: A review, *Materials Research Bulletin*, 2022, vol. 148, art. no. 111679, 13 p. DOI: 10.1016/j.materresbull.2021.111679.

10. Bala N., Khan B., Singh K. et al. Recent advances in doped $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ thin film based phase change memories, *Materials Advances*, 2023, vol. 4, issue 3, pp. 747-768. DOI: 10.1039/D2MA01047J.
11. Yang F., Tang X., Chen T., et al. Effect of Si doping on the structure and optical properties of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ studied by ab initio calculations, *Computational Materials Science*, 2019, vol. 168, pp. 253-259. DOI: 10.1016/j.commatsci.2019.05.019
12. Delaney M., Zeimpekis I., Lawson D. et al. A new family of ultralow loss reversible phase-change materials for photonic integrated circuits: Sb_2S_3 and Sb_2Se_3 , *Advanced Functional Materials*, 2020, vol. 30, issue 36, art. no. 2002447, 10 p. DOI: 10.1002/adfm.202002447.
13. 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.
14. Abdollahramezani S., Hemmatyar O., Taghinejad H. et al. Tunable nanophotonics enabled by chalcogenide phase-change materials, *Nanophotonics*, 2020, vol. 9, issue 5, pp. 1189-1241. DOI: 10.1515/nanoph-2020-0039.
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 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 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.
17. Huber E., Marinero E.E. Laser-induced crystallization of amorphous GeTe: A time-resolved study, *Physical Review B*, 1987, vol. 36, issue 3, pp. 1595-1604. DOI: 10.1103/PhysRevB.36.1595.
18. Weidenhof V., Friedrich I., Ziegler S., & Wuttig M. Laser induced crystallization of amorphous $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ films, *Journal of Applied Physics*, 2001, vol. 89, issue 6, pp. 3168-3176. DOI: 10.1063/1.1351868.
19. Kolmogorov A.N. K statisticheskoy teorii kristallizatsii metallov [Zur statistik der kristallisationsvorgänge in metallen], *Izvestiya Akademii Nauk SSSR Seriya Matematicheskaya [Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Mathematical series]*, 1937, vol. 1, issue 3, pp. 355-359. (In Russian, German summary).
20. Avrami M. Kinetics of phase change. II Transformation-time relations for random distribution of nuclei, *The Journal of Chemical Physics*, 1940, vol. 8, issue 2, pp. 212-224. DOI: 10.1063/1.1750631.
21. 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.
22. Andreeva L.V., Novoselova A.S., Lebedev-Stepanov P.V. et al. Crystallization of solutes from droplets, *Technical Physics*, 2007, vol. 52, issue 2, pp. 164-172. DOI: 10.1134/S1063784207020041.
23. Burtsev A.A., Butkovskii O.Ya. Analiz kristallicheskih struktur na poverkhnosti nerzhaveyushchej stali [Analysis of crystal structures on stainless steel surface], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2019, issue 11, pp. 107-114. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.107. (In Russian).
24. Lu Q.M., Libera M. Microstructural measurements of amorphous GeTe crystallization by hot-stage optical microscopy, *Journal of Applied Physics*, 1995, vol. 77, issue 2, pp. 517-521. DOI: 10.1063/1.359034
25. 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.
26. Yang I., Do K., Chang H.J. et al. Effect of doped nitrogen on the crystallization behaviors of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, *Journal of The Electrochemical Society*, 2010, vol. 157, no. 4, pp. H483-H486. DOI 10.1149/1.3321759.
27. Do K., Lee D., Sohn H. et al. Crystallization behaviors of laser induced $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ in different amorphous states, *Journal of The Electrochemical Society*, 2010, vol. 157, no. 3, pp. H264-H267. DOI 10.1149/1.3274225.
28. Ruitenberg G., Petford-Long A.K., Doole R.C. Determination of the isothermal nucleation and growth parameters for the crystallization of thin $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ films, *Journal of Applied Physics*, 2002, vol. 92, issue 6, pp. 3116-3123. DOI 10.1063/1.1503166.

Original paper

Kinetics of laser-induced crystallization of GeTe and $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ chalcogenide phase-change material thin films

A.A. Burtsev, A.V. Kiselev, V.A. Mikhalevsky, V.V. Ionin, A.A. Nevzorov, N.N. Eliseev, A.A. Lotin
National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.603

Abstract: The paper presents the results of theoretical analysis of crystallization of GeTe and $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ thin films under the influence of pulse laser radiation. The phase transformations and the fraction of the crystalline phase was estimated on basis of the change of the probe optical reflection coefficient from the film sample surface. The formalism based on the Kolmogorov-Johnson-Mehl-

Avrami theory was used to evaluate the kinetic behaviors of the phase transformation under the action of laser radiation. On the basis of experimental data of reflection changes during crystallization process of the researched materials, graphs were plotted and Avrami constants were determined. It is shown that *GeTe* exhibits a single step crystallization process associated with a high rate of nucleation and crystallite growth in all directions. The *Ge₂Sb₂Te₅* alloy is characterized by a two-step crystallization process with a change in the Avrami constant due to the influence of many factors such as the film geometry, sputtering characteristics, etc. Such type of crystallization is explained by the predominance of the high-stochastic nucleation.

Keywords: laser-induced crystallization, phase transitions, chalcogenides, phase-change materials, thin films, kinetics.

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

Киселев Алексей Владимирович – научный сотрудник ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Михалевский Владимир Александрович – 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»

Елисеев Николай Николаевич – младший научный сотрудник ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Лотин Андрей Анатольевич – к.ф.-м.н., заместитель руководителя отделения «ИПЛИТ — Шатура» Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники, ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

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

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

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

Vitaly V. Ionin – Researcher, National Research Centre «Kurchatov Institute»

Alexey A. Nevzorov – Ph. D., 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 «ILIT-Shatura» of Crystallography and Photonics Complex, National Research Centre «Kurchatov Institute»

Поступила в редакцию/received: 15.05.2024; после рецензирования/revised: 06.06.2024; принята/accepted: 08.06.2024.