УДК 539.216.2 *Оригинальная статья*

Формирование фрактальных наноструктур фазоизменяемого материала $Ge_2Sb_2Te_5$ при лазерно-индуцированном переносе

А.А. Бурцев[1], Д.Н. Бухаров[2], В.В. Ионин[1], В.А. Михалевский[1], А.В. Киселев[1], А.А. Невзоров[1,3], Н.Н. Елисеев[1], М.Р. Конникова[1], А.А. Лотин[1,4]

[1]ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, 1
[2]ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
600000, Россия, Владимир, ул. Горького, 87
[3]ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, Россия, Москва, улица Орджоникидзе, 8/9
[4]ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»
125047, Россия, Москва, Миусская пл., 9
murrkiss2009@yandex.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.021

Аннотация: Работа посвящена исследованию процессов синтеза наночастиц фазоизменяемого материала $Ge_2Sb_2Te_5$ методом прямого лазерно-индуцированного переноса с использованием суб-наносекундных импульсов (длительностью порядка сотен пикосекунд). В качестве исходных образцов использовались тонкие пленки $Ge_2Sb_2Te_5$, нанесенные методом термического вакуумного испарения на кремниевые подложки. Показано, что ключевым фактором, определяющим эффективность кластеризации и морфологию формирующихся агрегатов, является температурный режим, в котором протекает процесс переноса. В частности, высокая температура плавления кристаллических фаз $Ge_2Sb_2Te_5$ (около 600 °C) и их способность к быстрой рекристаллизации создают специфические условия для зародышеобразования и роста частиц из расплавленного материала. С использованием методов растровой электронной микроскопии проведен детальный анализ морфологии синтезированных наночастиц и их агрегатов. Установлено, что в зависимости от плотности энергии лазерного импульса и толщины исходной пленки формируются структуры различной сложности — от изолированных сферических частиц до разветвленных дендритных кластеров. Для количественного описания процессов агрегации применена модель диффузионно-ограниченной агрегации, позволяющая объяснить наблюдаемые морфологические закономерности с позиций случайных блужданий частиц в газовой фазе и их последующей адгезии на подложке. Показано, что, варьируя экспериментальные параметры (энергию и длительность импульса, толщину пленки, расстояние до подложки), можно синтезировать кластеры с заданной морфологией и, соответственно, контролируемыми оптическими и электрическими свойствами. Это открывает возможность создания на основе наночастиц $Ge_2Sb_2Te_5$ переключаемых элементов с предсказуемыми характеристиками, которые в перспективе способны заменить традиционные тонкопленочные устройства в ряде приложений. Определяющим параметром, коррелирующим с функциональными свойствами таких структур, выступает фрактальная размерность кластерных структур, которая может служить критерием для оценки их эффективности.

Ключевые слова: халькогениды, фазоизменяемые материалы, наночастицы, кластеризация, лазерно-индуцированный перенос, фрактальная размерность.

© А.А. Бурцев, Д.Н. Бухаров, В.В. Ионин, В.А. Михалевский, А.В. Киселев, А.А. Невзоров, Н.Н. Елисеев, М.Р. Конникова, А.А. Лотин, 2026

Бурцев Антон Андреевич – научный сотрудник, ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
Бухаров Дмитрий Николаевич – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, руководитель молодежной лаборатории, ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
Ионин Виталий Вячеславович – научный сотрудник, ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
Михалевский Владимир Александрович – научный сотрудник, ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
Киселев Алексей Владимирович – к.ф.-м.н., старший 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»
Елисеев Николай Николаевич – младший научный сотрудник, ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
Конникова Мария Руслановна – 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»

Original paper

Formation of fractal nanostructures of $Ge_2Sb_2Te_5$ phase-change material by laser-induced transfer

A.A. Burtsev[1], D.N. Bukharov[2], V.V. Ionin[1], V.A. Mikhalevsky[1], A.V. Kiselev[1], A.A. Nevzorov[1,3], N.N. Eliseev[1], M.R. Konnikova[1], A.A. Lotin[1,4]

[1]*National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*
[2]*Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia*
[3]*University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia*
[4]*Mendeleev University of Chemical Technology, Moscow, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.021

Abstract: This work is devoted to the study of the synthesis of $Ge_2Sb_2Te_5$ phase-change material nanoparticles via direct laser-induced forward transfer using sub-nanosecond pulses with durations of the order of hundreds of picoseconds. Thin $Ge_2Sb_2Te_5$ films deposited by thermal vacuum evaporation onto silicon substrates were used as the initial targets. It is shown that the temperature regime, governed by the high melting temperature of the crystalline $Ge_2Sb_2Te_5$ phases (approximately 600 °C) and their ability to rapidly recrystallize, plays a key role in determining the efficiency of the cluster formation and morphology of the resulting aggregates. These factors create specific conditions for nucleation and growth of particles from the molten material. A detailed morphological analysis of the synthesized nanoparticles and their aggregates was performed using scanning electron microscopy. It was found that depending on the laser pulse fluence and the initial film thickness, structures of varying complexity can be formed, ranging from isolated spherical particles to highly branched dendritic clusters. To quantitatively describe the aggregation processes, the diffusion-limited aggregation model was employed, which explains the observed morphological features in terms of random walks of particles in the gas phase and their subsequent adhesion to the substrate. It is demonstrated that by varying the experimental parameters (pulse energy and duration, film thickness, and target-to-substrate distance), clusters with tailored morphology and, consequently, controllable optical and electrical properties can be synthesized. This opens up the possibility of creating switchable elements based on $Ge_2Sb_2Te_5$ nanoparticles with predictable characteristics, which could potentially replace conventional thin-film devices in a number of applications. The fractal dimension of the aggregates is identified as a key parameter correlating with their functional properties and can serve as a criterion for evaluating their performance.

Keywords: chalcogenides, phase change materials, nanoparticles, clustering, laser-induced transfer, fractal dimension.

Anton A. Burtsev – Researcher, National Research Centre «Kurchatov Institute», ORCID: 0000-0003-0280-7943
Dmitry N. Bukharov – Ph. D., Senior Researcher, Head of the Youth Research Laboratory, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, ORCID: 0000-0002-4536-8576
Vitaly V. Ionin – Researcher, National Research Centre «Kurchatov Institute», ORCID: 0000-0002-1253-2261
Vladimir A. Mikhalevsky – Researcher, National Research Centre «Kurchatov Institute», ORCID: 0000-0002-6234-1084
Alexey V. Kiselev – Ph. D., Senior Researcher, National Research Centre «Kurchatov Institute», ORCID: 0000-0003-0292-9553
Alexey A. Nevzorov – Ph. D., Researcher, National Research Centre «Kurchatov Institute», Researcher, Laboratory of Photonic Gas Sensors, University of Science and Technology MISIS, ORCID: 0000-0001-5602-6355
Nikolay N. Eliseev – Junior Researcher, National Research Centre «Kurchatov Institute», ORCID: 0000-0002-8864-3961
Maria R. Konnikova – Junior Researcher, National Research Centre «Kurchatov Institute», ORCID: 0000-0003-4701-6483
Andrey A. Lotin – Sc. D., 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: 20.06.2026; после рецензирования/revised: 12.07.2026; принята/accepted: 14.07.2026.

1. Введение

Создание высокопроизводительных и энергоэффективных систем обработки данных следующего поколения требует преодоления ограничений, присущих традиционной вычислительной парадигме, основанной на архитектуре фон Неймана, в которой устройства обработки данных и их хранения разделены. В связи с этим всё большее внимание исследователей привлекают альтернативные подходы, включая нейроморфные вычисления и элементную базу на основе энергонезависимых мемристивных ячеек [1]. Особый интерес представляют тонкоплёночные элементы из фазоизменяемых материалов (ФИМ) [2-4]. Полупроводники данного класса (в первую очередь, сплав $Ge_2Sb_2Te_5$) демонстрируют обратимый фазовый переход между кристаллическим и аморфным состояниями, что обеспечивает их функциональность в качестве переключаемых элементов памяти.

Ключевыми ограничениями тонкоплёночных и макроскопических элементов на основе ФИМ являются высокое энергопотребление и большая длительность фазового перехода (десятки-сотни наносекунд без учёта тепловой релаксации) [5, 6]. Переход к наноструктурам позволяет преодолеть эти недостатки: малый объём и высокая удельная поверхность обеспечивают существенное снижение энергии нагрева до температур фазового перехода. Данный подход обеспечивает следующие преимущества: улучшение динамики переключения благодаря неоднородному температурному полю в окрестности каждой наночастицы [7]; быстрое охлаждение, необходимое для эффективных фазовых переключений [8]; снижение пороговых температур и возникновение новых свойств при уменьшении размеров [9], оптимизация контакта с

управляющим электродом и нагревателем [10].

Эффективным подходом к предсказанию и описанию свойств нанокластеров и массивов наночастиц является применение моделей, основанных на фрактальной геометрии и формировании кластеров фрактальной размерности. Традиционная термодинамика, описываемая уравнениями Клапейрона-Клаузиуса, демонстрирует ограниченную применимость в наномасштабе, поскольку в этой области поверхностные эффекты начинают доминировать над объёмными [11, 12]. Фрактальные модели позволяют преодолеть указанные ограничения, вводя понятие нецелочисленной размерности в термодинамические и кинетические уравнения. Как было показано в ряде работ, такие характеристики, как электрическое сопротивление, температура фазового перехода, процессы зародышеобразования и формирования кластеров, могут быть эффективно описаны в рамках фрактальной геометрии [13-17].

Настоящая работа имела своей целью анализ экспериментальных данных, касающихся образования фрактальных кластеров GST, формирующихся при лазерно-индуцированном переносе. Обработка и интерпретация экспериментальных данных выполнялись с использованием математических моделей, основанных на клеточных автоматах.

2. Техника эксперимента, методы синтеза наноматериалов и методы теоретического анализа

В качестве донорной подожки были использованы образцы тонких пленок GST (50 нм), которые были получены методом термического вакуумного осаждения на подложки кварцевого стекла (SiO_2). Условия получения и свойства тонких пленок и методика синтеза наночастиц лазерным переносом приведены в работах [18, 19]. В качестве акцепторной подложки использовались пластины монокристаллического кремния (Si). Лазерно-индуцированный перенос наночастиц с пленки осуществлялся под действием импульсного лазерного излучения (λ = 532 нм, τ = 0,7 нс). Как было показано ранее, особенности кластеризации в основном определяются температурой [19]. Морфология, топология и размеры наночастиц и кластеров анализировались с помощью растровой электронной микроскопии (см. рис. 1).

Для моделирования кластеров, полученных методом лазерно-индуцированного осаждения применимо фрактальное приближение в рамках диффузионного приближения. Такое приближение применимо вследствие диффузионного характера распространения тепла, являющегося одним из инициаторов формирования кластерных структур. Более того имеется как качественное сходство, так и количественное по фрактальным размерностям для кластеров, смоделированных в рамках

фрактального подхода со структурами, синтезированными методом лазерно-индуцированного осаждения. Одним из удобных и популярных диффузионных фрактальных приближений является диффузионно-ограниченная агрегация (ДОА) [20], основанное на решении дискретного уравнения диффузии методом клеточного автомата [21].

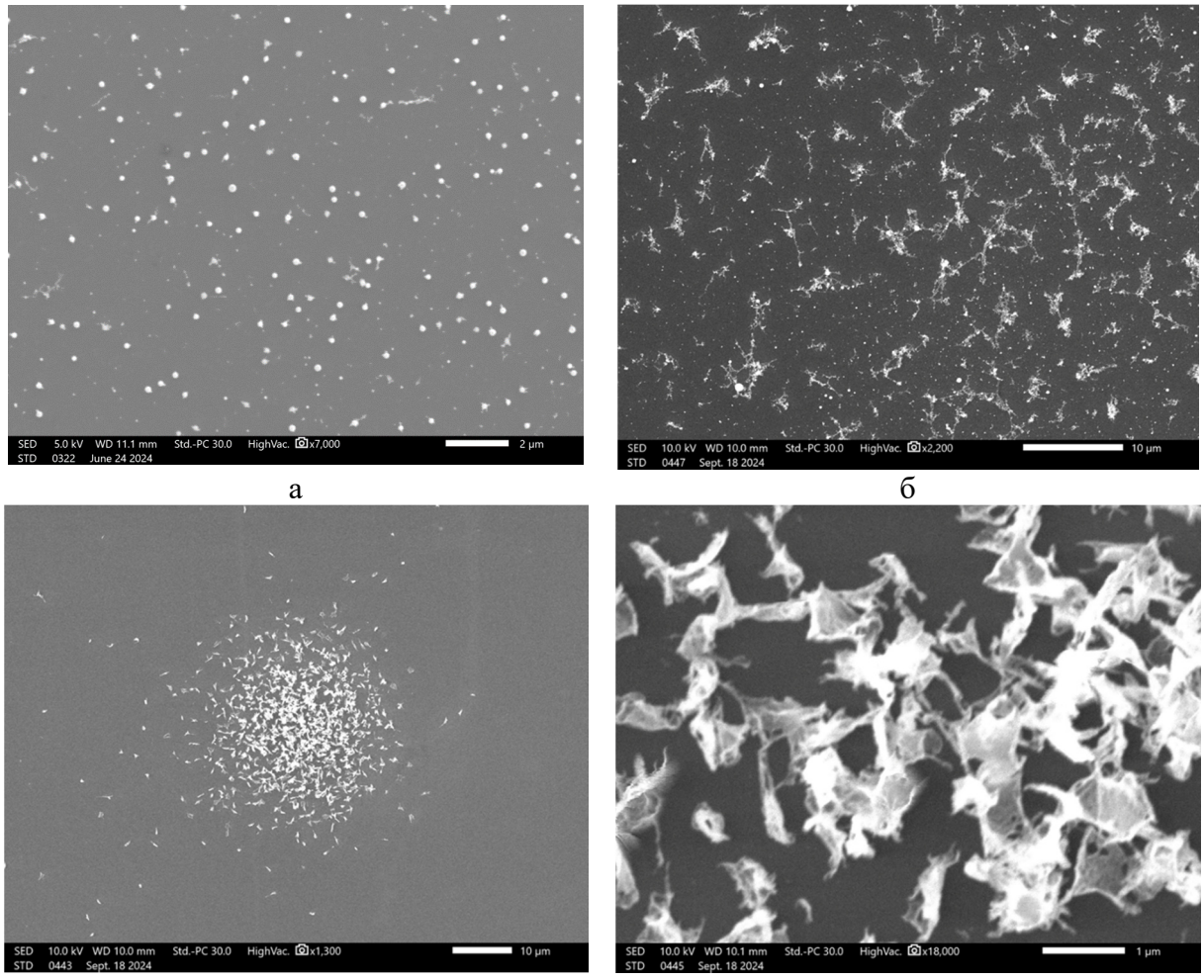

Рис. 1. РЭМ-изображения наночастиц ФИМ и их кластеров на кремниевой подложке. Масштаб 1-2 мкм. Значение плотности энергии импульса: а – 80 мДж/см^2, б – 70 мДж/см^2, в – 65 мДж/см^2, г – 60 мДж/см^2.

Построение модельного кластера производится на квадратной расчетной области с наложенной равномерной сеткой, от стартовой фигуры (множества занятых ячеек), выполняющей роль начальных условий для уравнения диффузии. Генерация кластера от стартовой структуры реализуется через итерационный процесс. На каждой итерации в расчетную область от верхней границы вводится модельная частица, которая совершает блуждания по расчетной области с единичными смещениями с заданной вероятностью, что позволяет задать направление роста молельной структуры.

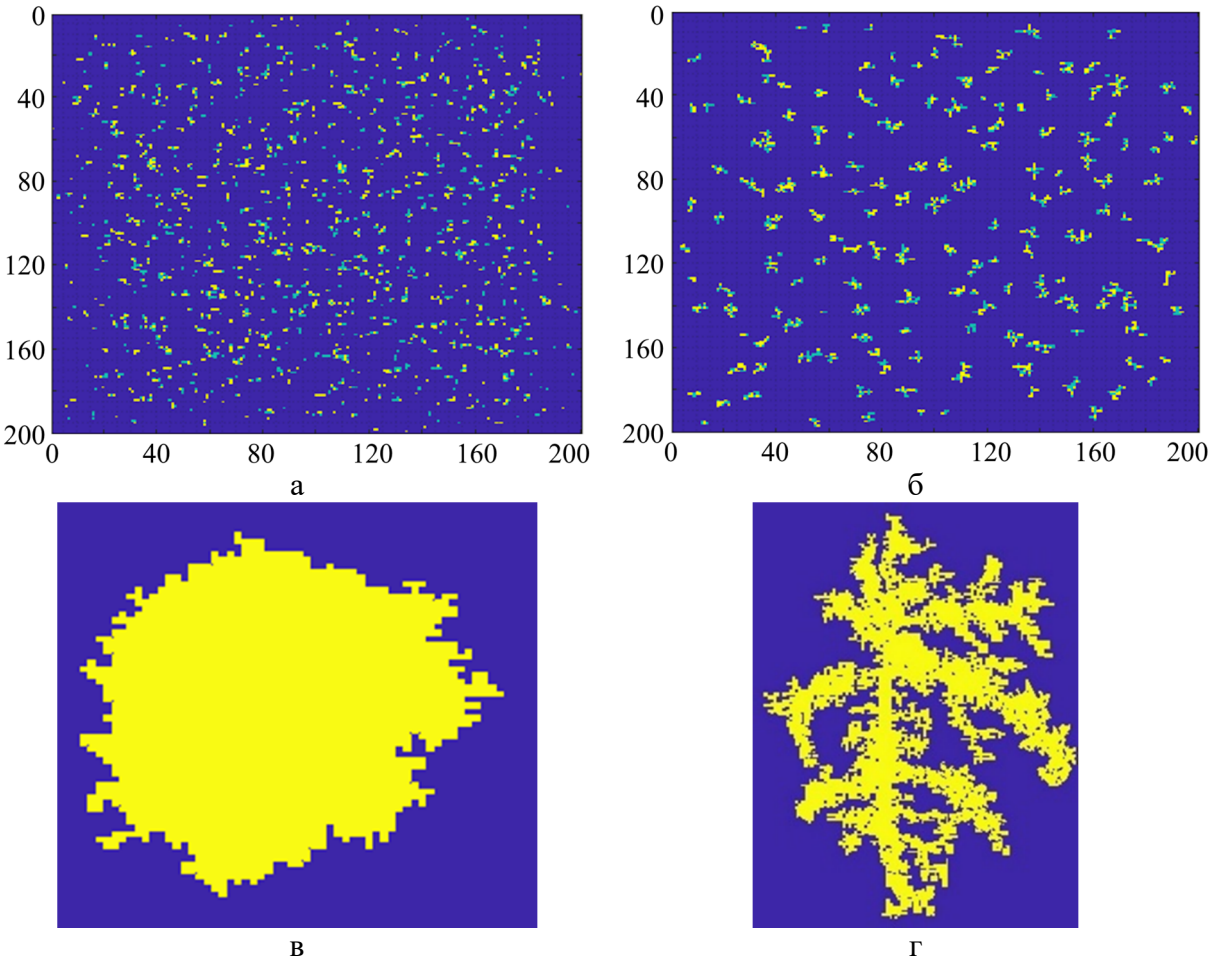

Рис. 2. Изображения кластеров, полученных в результате моделирования методом ДОА. Значения соответствующих параметров: а – $s = 0{,}3$, $\rho = 0{,}1$, $T = 470$ К, $D_m = 1{,}3$; б – $s = 0{,}3$, $\rho = 0{,}3$, $T = 470$ К, $D_m = 1{,}4$; в – $s = 0{,}01$, $\rho = 0{,}9$, $T = 450$ К, $D_m = 1{,}99$; г – $s = 1$, $\rho = 1$, $T = 440$ К, $D_m = 1{,}7$.

В случае появления в окрестности соседства Неймана (4 ячейки, примыкающей к сторонам текущей ячейки) блуждающей частицы занятой ячейки она с заданной вероятностью фиксируется в текущей позиции или продолжает движение [22]. Эту вероятность обычно называют вероятностью агрегации. Она зависит от температуры расчетной области T и является величиной обратной ей: чем выше температура, тем меньше вероятность агрегации s. Блуждающая частица продолжает свое движение, пока не произойдет ее агрегации с уже сформированной структурой или пока он не зафиксируется в текущей позиции спустя заданное количество смещений, которое определяется на основании нормированного параметра вязкости среды ρ. Эти номерованные по площади расчетной области параметры из интервала от 0 до 1 совместно с вероятностями единичных смещений являются величинами, определяющим структурные особенности сгенерированной фрактальной фигуры. Если модельная частица попадает на границу расчетной области,

то она уничтожается. Текущая итерация процесса построения модельной фигуры заканчивается в случае фиксации модельной частицы, после чего производится расчет фрактальной размерности текущей фигуры с отношения логарифмов, количества занятых ячеек к общему числу ячеек расчетной области. Итерационный процесс заканчивается, когда фрактальная размерность модели D_m отличается от требуемого значения на величину, меньшую 0,01.

По предложенной модели были произведены построения моделей кластерных систем, фрактальные размерности которых оценивались методом подсчета квадратов (box-counting) [23]. На рис. 2 приведены изображения кластеров, полученных на основе моделирования методом ДОА. Моделирование проводилось в среде MATLAB.

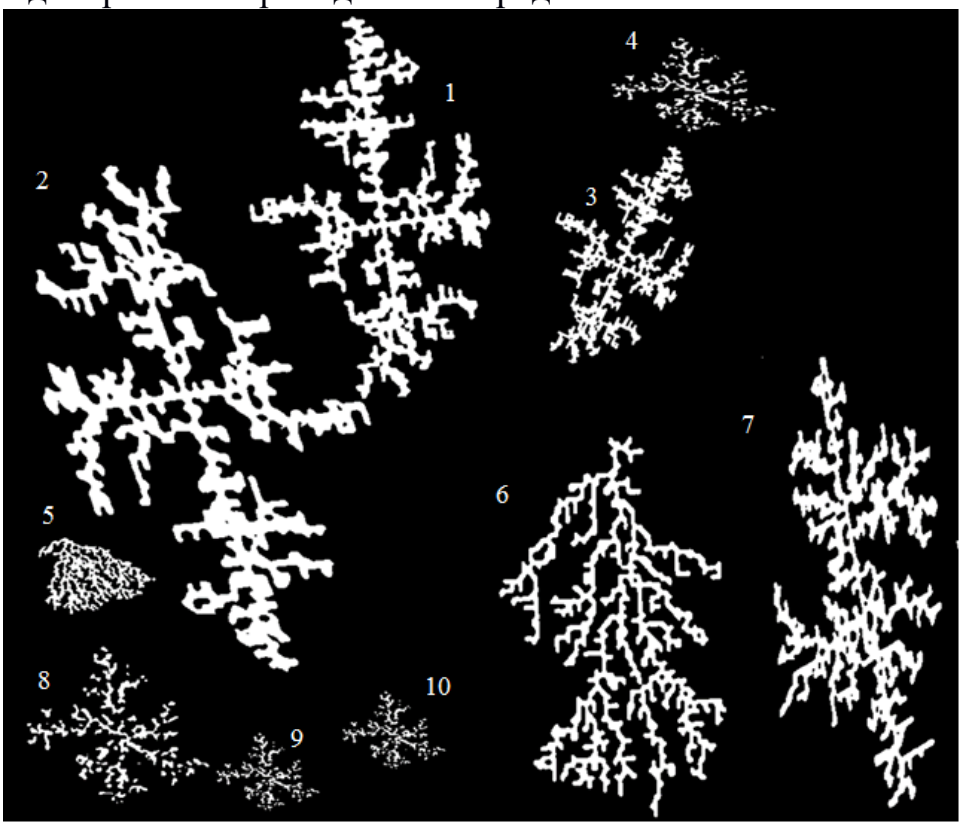

Рис. 3. Коллажированное изображение многообразия фрактальных диффузионных кластеров, полученные при $s = 1$, $\rho = 1$: 1-3 – кластеры, сгенерированные от крестовой стартовой фигуры, 4-6 – кластеры, сгенерированные от стартовой фигуры в виде точки, 7 – кластер, сгенерированный от стартовой фигуры в виде прямой линии, 8-10 – кластеры, сгенерированные от стартовой фигуры в виде точки.

На коллажированном изображении (см. рис. 3) фигуры 5 и 6 получены в случае неравновероятных единичных смещений при единичных блужданиях: фигура 5 – построена от стартовой фигуры в виде точки, когда модельные частицы двигались преимущественно вниз и вправо, фигура 6 – построена от стартовой фигуры в виде точки, когда модельные частицы двигались преимущественно вниз.

4. Заключение

В работе были рассмотрены эксперименты по синтезу массивов наночастиц и сложных кристаллических структур ФИМ методом прямого лазерного переноса. Особенности структуры практически полностью определяются энергией импульса и температурой, при которой происходит кластеризация и формирование отдельных наночастиц. Указано, что при различных условиях (плотность энергии лазерного импульса и расстояние между донорной пленкой и акцепторной подложкой) возникает различная морфология (массивы наночастиц, ветвистые и круглые кластеры). При анализе результатов математического моделирования обнаружено качественное совпадение результатов моделей с экспериментальными данными. Для роста кластера под действием термодиффузии эффективно применяется метод диффузионного осаждения. Изучение условий формирования и свойств кластеров фазоизменяемых материалов открывает возможность для исследования фазовых переходов в неравновесных системах, а также для предсказания и синтеза структур, обладающих новыми физико-химическими характеристиками, в том числе фрактальной геометрией поверхности. В качестве потенциального применения массивов наночастиц и их кластеров можно рассматривать ячейки фазовой памяти. Такие ячейки обладают потенциалом для использования в трёх основных ролях: как многоуровневый мемристор, как нейроморфный вычислительный элемент и как классический элемент памяти.

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

Библиографический список:

1. **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.

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 др. // Успехи химии. – 2022. – Т. 91. – Вып. 9. – Статья № RCR5033. – 39 с. DOI: 10.1070/RCR5033.

4. 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.

5. **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.

6. **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.

7. **Nevzorov, A.A.** Chaotic computing cell based on nanostructured phase-change materials / A.A. Nevzorov, A.A. Burtsev, A.V. Kiselev et al. // Journal of Computational Electronics. – 2024. – V. 23. – I. 6. – P. 1448-1454. DOI: 10.1007/s10825-024-02221-1.

8. **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. – 5 p. DOI: 10.1063/5.0156207.
9**. 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.
10. **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.
11. **Николис, Г.** Познание сложного: Введение / Г. Николис, И.Р. Пригожин. – М.: Ленанд, 2014. – 355 с.
12. **Суздалев, И.П**. Нанотехнология: Физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов / И.П. Суздалев. – М.: URSS, 2017. – 592 с.
13. **Bukharov, D.N.** Modeling of a profile of a PbTe semiconductor nanofilm / D.N. Bukharov, A.O. Kucherik, S.M. Arakelyan, A.A. Lotin //Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1331. – Art. №. 012002. – 8 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1331/1/012002
14. **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.
15. **Брылкин, Ю.В.** Исследование зависимости физических свойств поверхности от фрактальной размерности / Ю.В. Брылкин, А.Л. Кусов // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2015. – Вып. 7. – С. 142-149. DOI: 10.26456/pcascnn/2015.7.142.
16. **Антонов, А.С.** Исследование фрактальных свойств наноразмерных пленок золота, серебра и меди: атомно-силовая и туннельная микроскопия / А.С. Антонов, Н.Ю. Сдобняков, Д.В. Иванов и др. // Химическая физика и мезоскопия. – 2017. – Т. 19. – № 3. – С. 473-486.
17. **Сдобняков, Н.Ю.** Морфологические характеристики и фрактальный анализ металлических пленок на диэлектрических поверхностях: монография / Н.Ю Сдобняков, А.С. Антонов, Д.В, Иванов. – Тверь: ТвГУ, 2019. – 168 с.
18. **Бурцев, А.А.** Получение наночастиц фазоизменяемого материала $Ge_2Sb_2Te_5$ методом прямого лазерно-индуцированного переноса / А.А. Бурцев, В.А. Михалевский и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2024. – Вып. 16. – С. 612-620. DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.612.
19. **Бурцев, А.А.** Кластеризация наночастиц фазоизменяемого материала $Ge_2Sb_2Te_5$, полученных методом лазерно-индуцированного переноса / А.А. Бурцев, В.А. Михалевский, В.В. Ионин и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2025. – Вып. 17. – С. 598-605. DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.598.
20. **Witten, T.A.** Diffusion limited aggregation / T.A. Witten, L.M. Sander // Physical Review B. – 1983. – V. 27. – I. 9. – P. 5686-5697. DOI: 10.1103/PhysRevB.27.5686.
21. **Mroczka, J.** Algorithms and methods for analysis of the optical structure factor of fractal aggregates / J. Mroczka, M. Woźniak, F.R.A. Onofri// Metrology and Measurement Systems. – 2012. – V. XIX. – I. 3. – P. 459-470. DOI: 10.2478/v10178-012-0039-2.
22. **Zaitsev, D.A.** A generalized neighborhood for cellular automata/ D. A. Zaitsev // Theoretical Computer Science. – 2017. – V. 666. – P. 21-35. DOI: 10.1016/j.tcs.2016.11.002.
23. **Wu, J.** An effective method to compute the box-counting dimension based on the mathematical definition and intervals / J. Wu, X. Jin, S. Mi, J. Tang // Results in Engineering. – 2020. – V. 6. – P. 100-106. DOI: 10.1016/j.rineng.2020.100106.

References:

1. 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.
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. et al. 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. *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.
5. 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.
6. 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.
7. Nevzorov A.A., Burtsev A.A., Kiselev A.V. et al. Chaotic computing cell based on nanostructured phase-change materials, *Journal of Computational Electronics*, 2024, vol. 23, issue 6, pp. 1448-1454. DOI: 10.1007/s10825-024-02221-1.
8. Caretta A., Casarin B., Chen B. et al. Ultrafast response of $Ge_2Sb_2Te_5$ 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, 5 p. DOI: 10.1063/5.0156207.
9. 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.
10. 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.
11. Nicolis G., Prigogine I. *Exploring complexity: an introduction*, New York, St. Martin's Press, 1989, 328 p.
12. Suzdalev I.P. *Nanotekhnologiya: Fiziko-khimiya nanoklasterov, nanostruktur i nanomaterialov* [Nanotechnology: Physical chemistry of nanoclusters, nanostructures and nanomaterials]. Moscow, URSS Publ., 2017, 592 p. (In Russian).
13. Bukharov D.N., Kucherik A.O., Arakelyan S.M., Lotin A.A. Modeling of a profile of a PbTe semiconductor nanofilm, *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1331, art no. 012002, 8 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1331/1/012002.
14. Burtsev A.A., Butkovskii O.Ya. Analiz kristallicheskikh 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).
15. Brylkin Yu.V., Kusov A.L. Issledovanie zavisimosti fizicheskikh svojstv poverkhnosti ot fraktal'noj razmernosti [Research of the dependence of surface physical properties from the fractal dimension], *Fizikokhimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2015, issue 7, pp. 142-149. DOI: 10.26456/pcascnn/2015.7.142 (In Russian).
16. Antonov A.S., Sdobnyakov N.Yu., Ivanov D.V. et al. Issledovanie fraktal'nykh svojstv nanorazmernykh plenok zolota, serebra i medi: atomno-silovaya i tunnel'naya mikroskopiya [Investigation of fractal properties of nanosized gold, silver and copper films: atomic force and tunnelling microscopy], *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya [Chemical Physics and Mesoscopy]*, 2017, vol. 19, no. 3, pp. 473-486. (In Russian).
17. Sdobnyakov N.Yu., Antonov A.S., Ivanov D.V. *Morfologicheskie kharakteristiki i fraktal'nyj analiz metallicheskikh plenok na dielektricheskikh poverkhnostyakh: monografiya* [Morphological characteristics and fractal analysis of metal films on dielectric substrates: monography], Tver, Tver State University Publ., 2019, 168 p. (In Russian).
18. Burtsev A.A., Mikhalevsky V.A. et al. Poluchenie nanochastits fazoizmenyaemogo materiala $Ge_2Sb_2Te_5$ metodom pryamogo lazerno-indutsirovannogo perenosa [Synthesis of phase-change material $Ge_2Sb_2Te_5$ nanoparticles by laser-induced forward transfer techniques], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2024, issue 16, pp. 612-620. DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.612. (In Russian).
19. Burtsev A.A., V.A. Mikhalevsky, V.V. Ionin et al. Klasterizatsiya nanochastits fazoizmenyaemogo materiala $Ge_2Sb_2Te_5$, poluchennykh metodom lazerno-indutsirovannogo perenosa [Clustering of phase-change material $Ge_2Sb_2Te_5$ nanoparticles obtained by laser-induced forward transfer techniques], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2025, issue 17, pp. 598-605. DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.598. (In Russian).
20. Witten T.A., Sander L.M. Diffusion limited aggregation, *Physical Review B*, 1983, vol. 27, issue 9, pp. 5686-5697. DOI: 10.1103/PhysRevB.27.5686.
21. Mroczka J., Woźniak M., Onofri F.R.A. Algorithms and methods for analysis of the optical structure factor of fractal aggregates, *Metrology and Measurement Systems*, 2012, vol. XIX, issue 3, pp. 459-470. DOI: 10.2478/v10178-012-0039-2.
22. Zaitsev D.A. A generalized neighborhood for cellular automata, *Theoretical Computer Science*, 2017, vol. 666, pp. 21-35. DOI: 10.1016/j.tcs.2016.11.002.
23. Wu J., Jin X., Mi S., Tang J. An effective method to compute the box-counting dimension based on the mathematical definition and intervals, *Results in Engineering*, 2020, vol. 6, pp. 100-106, DOI: 10.1016/j.rineng.2020.100106.