

DOI: 10.18721/JHSS.11303

УДК 101.1+130.2.62

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МИКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

В.С. КошикМосковский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
Москва, Российская Федерация

На основе анализа синергетических процессов в микро- и нанотехнологиях показано, что в них самоорганизация управляется набором различных технологических параметров и иных факторов, устанавливаемых внешним исследователем или оператором. Сделан вывод о ярко выраженной управляемости этих процессов, обеспечиваемой привносимым аттрактором. Показано, что события и воздействия в управляемых синергетических процессах заранее продуманы и сконструированы, причем каждое из этих воздействий начинает влиять на всю систему в определенное время и в обозначенном месте, направляя её на достижение заданной цели. Аттрактор как одно из понятий междисциплинарности языка синергетики может иметь в конкретных технических приложениях такие определения и термины, как подложка, затравка и шаблон и задавать новое устойчивое состояние и новую структуру формирующейся наноструктуры. Создание аттракторов в управляемой самоорганизации возможно посредством конвергенции двух противоположных подходов: «снизу вверх» и «сверху вниз».

Ключевые слова: микротехнологии, нанотехнологии, синергетика, управляемая самоорганизация, привносимый аттрактор.

Ссылка при цитировании: Кошик В.С. Синергетические аспекты микро- и нанотехнологий // Общество. Коммуникация. Образование. 2020. Т. 11. № 3. С. 33–41. DOI: 10.18721/JHSS.11303

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

SYNERGETIC ASPECTS OF MICRO- AND NANOTECHNOLOGY

V.S. KoshikBauman Moscow State Technical University,
Moscow, Russian Federation

Based on the analysis of synergetic processes in micro- and nanotechnologies, it is shown that self-organization in them is controlled by a set of various technological parameters and other factors established by an external researcher or operator. The conclusion is made about the pronounced controllability of these process provided by the introduced attractor. It is shown that events and influences in controlled synergetic processes are thought out and constructed in advance, and each of these influences begins to affect the entire system at a certain time and in a designated place, directing it to achieve a given goal. The attractor, as one of the concepts of the interdisciplinarity of the synergetic language, can have in specific technical applications definitions and terms such as a substrate (monocrystalline substrate – wafer), a seed (single crystalline seed) and a pattern (pattern) and specify a new steady state and a new structure an emerging nanostructure. The creation of attractors in controlled self-organization is possible through the convergence of two opposing approaches: bottom-up and bottom-up.

Keywords: microtechnology, nanotechnology, synergetics, directed self-organization, introduced attractor.

Citation: V.S. Koshik, Synergetic aspects of micro- and nanotechnology, Society. Communication. Education, 11 (3) (2020) 33–41. DOI: 10.18721/JHSS.11303

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Введение

Происходящее в последние десятилетия сближение и взаимодействие науки и современных технологий привело к появлению в конце 1970-х гг. понятия «технонаука», которое символизировало превращение «техногенной среды из обычного “приложения” научного знания в естественную среду его развития» [1].

Ведущие области фундаментальных научных знаний трансформируются в технонауку, формируют облик науки современности и, вместе с тем, генерируют большие изменения в системе получения научных знаний. Эти изменения распространяются на все уровни познавательной деятельности, начиная от техники процесса протекания эксперимента и заканчивая глобальным осмыслением сущности научной мысли.

В ряду наукоёмких отраслей производства, реализующих концепцию технонауки и формирующих инфраструктуру ведущих промышленно развитых стран, особое место занимают микро- и нанотехнологии.

Нанотехнологии, развивающие и дополняющие методы микротехнологий, обеспечивают практическую реализацию массового создания структур с размерами элементов в десятки и даже единицы нанометров [2, 3].

Не случайно индустрия наносистем, основанная на применении управляемых, направленных процессов создания новых материалов, продуктов с размерами «нанометрового» характера и с заданными заранее свойствами, входит в «Перечень приоритетных направлений развития науки, технологий и техники Российской Федерации».

Исходя из списка приоритетных направлений сформирован список критических технологий Российской Федерации, в котором нанотехнологии входят в 9 из обозначенных 27 позиций, при этом почти во всех этих технологиях используются материалы с наноструктурой.

К числу особенностей современной технонауки и, в частности, микро- и нанотехнологий, можно отнести ее постоянное усложнение, предельное насыщение информацией, углубление соответствующих предметных областей.

При этом имеет место амбивалентное стремление, с одной стороны, к размежеванию, узкой специализации научных направлений и, с другой, — к их объединению, взаимопроникновению, кооперации.

Роль методологического обеспечения этих противоречивых процессов взяла на себя синергетика — наука о законах самоорганизации сложных развивающихся систем.

Постановка проблемы и определение цели исследования

Влияние синергетики распространяется на широкий круг предметных областей естествознания, для которых характерны различные необратимые процессы, являющиеся основой инноваций фундаментального характера.

Основными направлениями, в рамках которых сформировался принцип «синергетического подхода» в развитии современной научной мысли, являются квантовая механика, статистическая физика и нелинейная оптика (школа Германа Хакена [4]), а также физико-химические и математико-физические направления Ильи Пригожина [5].

В общем случае синергетику можно определить как науку о самоорганизации, предполагающую самопроизвольное усложнение формы или структуры или в более общем случае структуры системы при медленном и плавном изменении её параметров [6].

Традиционными примерами таких систем являются ячейки Бенара, лазеры, реакция Белоусова-Жаботинского. При этом проявление процессов самоорганизации в технонауке и, в част-

ности, в нанотехнологиях, описанное, например, в работах [7–9], относится преимущественно к коллоидным системам. Это не позволяет полностью применить методы синергетики, выявить в процессах микро- и нанотехнологии общие черты и действующие факторы.

Цель статьи – развитие методологических аспектов по описанию, обобщению и объяснению синергетических явлений применительно к прорывным технологиям на примере микро- и нанотехнологий.

Метод исследования

Рассмотрение поставленной задачи основывалось на терминологическом и концептуальном анализе процессов самоорганизации в микро- и нанотехнологиях для построения целостного синергетического взгляда на процесс самоорганизации в указанных областях.

Особое внимание было уделено рассмотрению понятия технонауки и физическим основам микро- и нанотехнологий [1–3], философскому осмыслению понятия синергетики и самоорганизации в неравновесных системах [4–9], методологическому определению понятия аттрактор, а также синергетического эффекта процесса самоорганизации и перехода из состояния хаоса в высокоорганизованное состояние в нано- и микротехнологиях в [10–22].

Результаты исследования

Самоорганизация и самосборка в нанотехнологиях – это процессы, приводящие к формированию упорядоченных структур в наносистемах.

Анализ особенностей консервативной и диссипативной самоорганизации, а также процессов формирования отсортированных (упорядоченных) массивов, различных блоков или кластеров из наноразмерных частиц, проведенный в [7–9], показывает широкий спектр возможных применений самоорганизации в нанотехнологиях.

На основе этого выглядит вполне оправданным высказывание о том, что «теория самоорганизации сложных систем и синергетика являются единственной надеждой нанотехнологий» [10].

Важно уточнить, что перенос результатов физико-химических исследований в реальные технологические процессы создания микро- и наноструктур сопряжен с учетом ряда важных аспектов.

Во-первых, для повышения эффективности анализа процессов микро- и нанотехнологии необходимо четко определять их целевую функцию через конечный результат, который необходимо получить.

Пример такого подхода продемонстрирован в [11], где анализ и классификация методов нанолитографии проведены на основе обозначения целевой функции процесса – использовании литографических процессов для локализации зон последующих операций – аддитивных (локальное нанесение материалов), субтрактивных (локальное травление), модификации поверхности (диффузия, ионное легирование).

Во-вторых, для процессов самоорганизации характерна инвариантность развития, т. е. существуют состояния, к которым тяготеет система. В синергетике конечные состояния этих систем называют «аттракторами» от латинского *attractio* – «притяжение».

При построении целостного синергетического взгляда на процессы самоорганизации в нанотехнологии аттрактор – ключевое понятие процесса самоорганизации.

Аттракторы играют особую роль в переломные моменты самоорганизации сложной системы – в точках бифуркации. Именно в этих точках хаос реализуется как фактор самоструктурирования нелинейной среды, формируется порядок из хаоса.

Специфика рассматриваемых процессов требует углубления и расширения значения понятия аттрактор. Наиболее важным является выявление интегративных (синергетически ориентированных), общих проявлений междисциплинарности этого понятия.

В области критических технологий, относящихся к сфере наноразмерных материалов и наносистем, выделяется онтологическая междисциплинарность, связывающая в одну технологическую сферу объекты для совершенно разных целей и применений.

Как пример можно привести технологию получения монокристаллического кремния, который является базовым материалом современного и будущего мира электроники, а также сплавы монокристаллов в тугоплавких металлах для производства турбинных лопаток для двигателей самолётов на реактивной тяге [12–14].

При создании монокристаллических материалов с уникальными свойствами совершенно разного назначения явно прослеживается методологическая междисциплинарность в формате интегрирования самостоятельных технологических дисциплин.

Способы получения монокристаллической решётки, разработанные и усовершенствованные в области кристаллографии, очень чётко показывают синергетические процессы самоорганизации в монокристаллических структурах.

На примере получения монокристаллического кремния можно выделить его аморфное состояние (рис. 1 а), которое после ряда сложных физико-химических операций преобразуется в поликристаллическую структуру в виде набора одиночных кристаллов (рис. 1 б).

Получение монокристаллического кремния (рис. 1 в) в виде алмазоподобной монокристаллической решетки с постоянной 0,354 нм (рис. 1 г) предусматривает доведение исходного поликремния до жидкого состояния (расплава, т. е. «хаоса»). Далее следует воздействие на расплав аттрактором – затравка из монокристаллического кремния заданной кристаллографической ориентации приводится в соприкосновение с расплавом. Затвердевание расплава в зоне контакта с затравкой и последующее вытягивание формируют образующийся при затвердевании монокристаллический слиток.

Этот процесс ярко иллюстрирует синергический эффект процесса самоорганизации и перехода из состояния хаоса в высокоорганизованное состояние, которое задаётся привнесённым аттрактором – затравкой.

При альтернативном методе формирования монокристаллических слитков – зонной плавкой – процесс начинается с расплавления зоны поликристаллического слитка, приведения его в контакт с монокристаллической затравкой (аттрактором), перемещения зоны расплава вдоль слитка. Затвердевающая часть слитка воспроизводит структуру затравки, самоорганизуясь до состояния монокристалла. Метод практически одинаков при получении как монокристаллических полупроводников, так и металлов [12–14].

Помимо массивных, объёмных монокристаллических слитков в микро- и нанотехнологии используются тонкие монокристаллические плёнки толщиной от одного до тысяч нанометров.

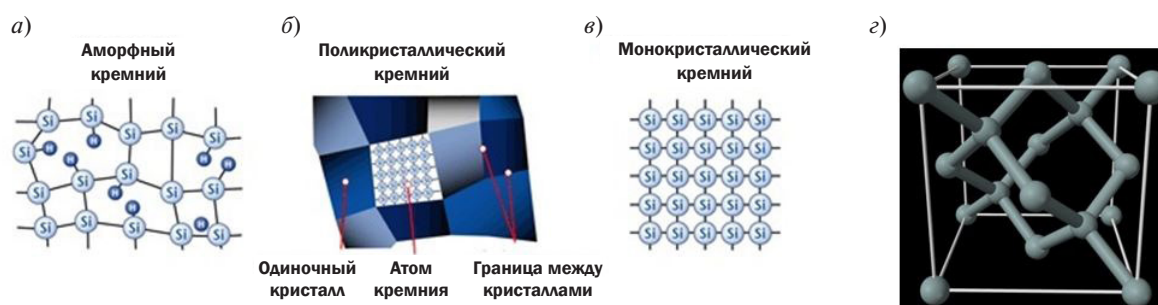


Рис. 1. Самоорганизация монокристаллической структуры

Fig. 1. Self-organization of a single crystal structure

Используемый для этого метод эпитаксии основан на самоорганизации продуктов химической реакции парогазовой смеси SiCl_4 и H_2 . В результате синергетического эффекта из состояния хаоса микрочастицы монокристаллического кремния формируют самоорганизованную монокристаллическую плёнку. Важным обстоятельством здесь является использование монокристаллической подложки как образца, т. е. аттрактора (рис. 2).

Следует подчеркнуть общие особенности рассмотренных «критических технологий».

Во-первых, создаваемые системы обладают эмерджентными свойствами – у системы появляются новые особые свойства, не присущие её элементам. В рассмотренных вариантах это не просто затвердевание кристалла или получение продуктов химической реакции, но, прежде всего, образование из хаоса расплава или парогазовой смеси монокристаллических структур. Можно утверждать, что самоорганизация в исследуемых средах имеет характер управляемого процесса (*directed self-assembly*).

Во-вторых, в рассмотренных примерах используется аттрактор, который привносится в расплав или парогазовую смесь и переводит их из состояния хаоса в упорядоченную монокристаллическую структуру посредством самоорганизации. В обоих случаях таким привносимым аттрактором является «затравка».

Процесс нанолитографии занимает особое место в указанных примерах синергетической самоорганизации, поскольку он обеспечивает локализацию зон обработки и является ключевым процессом микро- и нанотехнологий. В зависимости от способа воздействия на подложку в нанолитографии возможно предварительное структурирование резиста (излучением, потоком частиц, механически) или непосредственное физико-механическое воздействие [2, 3, 11, 15].

Для первого варианта с формированием резистивной маски приближение размеров формируемых микро- и наноструктур к размерам молекул стимулировало переход к альтернативному принципу их формообразования и структурирования – «снизу вверх» (*bottom-up*) [16, 17].

Характерные для синергетических процессов преимущества направленной самоорганизации реализуются в данном случае на основе использования блок-сополимеров, например, плёнок сополимера PS70PMMA30 (полистирол-блок-полиметилметакрилат) [18, 19]. Блок-сополимеры могут самопроизвольно формировать упорядоченную систему цилиндров полиметилметакрилата диаметром ~ 25 нм в матрице полистирола, благодаря чему можно получить массив монослоёв из отдельно расположенных нитей с нанометровыми размерами. Селективное удаление полиметилметакрилата приводит к формированию регулярной системы изолированных цилиндрических канавок, которые используются для создания нанонитей полупроводников или металлов с плотностью расположенных элементов порядка нанометра [20, 21].

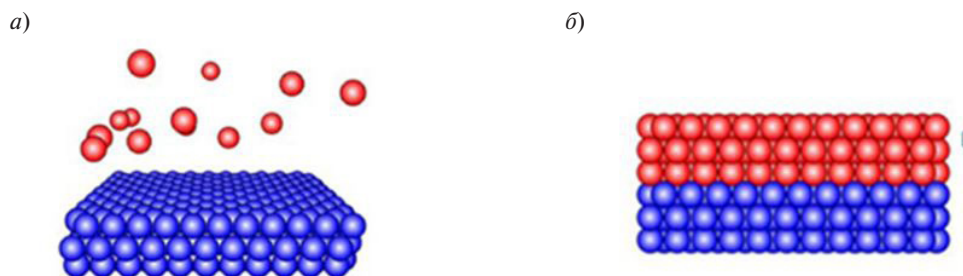


Рис. 2. Эпитаксия: *a* – осаждение на монокристаллическую подложку;
б – эпитаксиальный слой на монокристаллической подложке

Fig. 2. Epitaxy: *a* – deposition on a single crystal substrate; *b* – epitaxial layer on a single crystal substrate

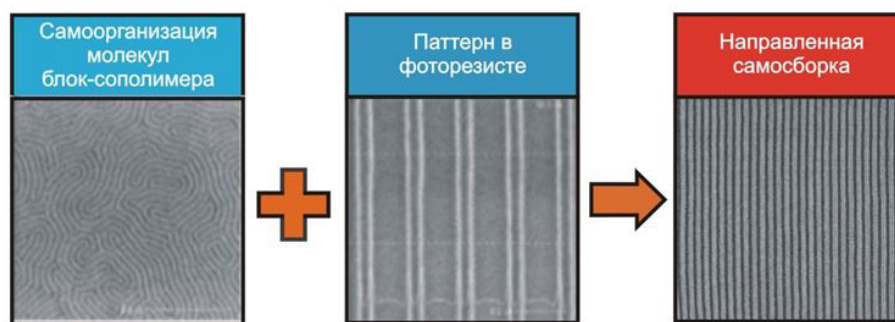


Рис. 3. Направленная самосборка под воздействием паттерна (аттрактора)

Fig. 3. Directional self-assembly under the influence of a pattern (attractor)

Введённый в систему аттрактор, задающий новую структуру и новое устойчивое состояние сформированной наноструктуры, является двигателем синергетического процесса самоорганизации.

В процессе направленной самоорганизации (*self-directed assembly*) в нанолитографии аттрактором является химический или топографический шаблон (паттерн), который создаётся в фоторезисте традиционными методами литографии (рис. 3) [22].

Используемый паттерн в роли аттрактора в процессе самоорганизации молекул блок-сополимера формирует не только нужное их направление расположения, но и в 3-4 раза больше обеспечивает частотную мультипликацию паттерна.

Заключение

Характерной особенностью микро- и нанотехнологий является то, что в них самоорганизация управляется набором различных технологических параметров и иных факторов, устанавливаемых внешним исследователем или оператором.

Можно утверждать, что все события и воздействия в управляемых синергетических процессах заранее продуманы и сконструированы. Каждый из этих процессов начинает влиять на всю систему в определённое время и в точно обозначенном месте, направляя систему по правильному для оператора пути.

Исходя из анализа примеров построения синергетических процессов микро- и наноструктур можно утверждать, что направленные (целевые) способы самоорганизации, детерминированные самоорганизующиеся системы, а также управляемые синергетические процессы описывают одинаковые проявления синергетики в процессе управления сложными техническими системами.

Таким образом, возможно описать следующие свойства, характерные для этих предметных областей:

Процесс самоорганизации можно охарактеризовать как управляемый процесс (*self-directed assembly*).

Управление самоорганизацией происходит с помощью аттрактора, привносимого оператором извне.

Аттрактор как одно из важнейших понятий синергетики имеет междисциплинарный характер и может обобщать определения и термины различных предметных областей технауки, например, таких как подложка (*monocrystalline substrate – wafer*), затравка (*single crystalline seed*) и шаблон (*pattern*).

Аттракторы в управляемой самоорганизации проявляются посредством конвергенции двух противоположных подходов: «снизу вверх» (*bottom-up*) и «сверху вниз» (*up-down*).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Андреев А.Л.** Технонаука // Философия науки и техники. 2011. Т. 16. № 1. С. 200–218.
2. **Макарчук В.В., Родионов И.А., Цветков Ю.Б.** Методы литографии в наноинженерии. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.
3. **Цветков Ю.Б., Панфилов Ю.В.** Современная контактная фотолитография – ключевой процесс микроэлектронного приборостроения // Приборы. 2020. № 1. С. 46–54.
4. **Хакен Г.** Синергетика. Иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. М.: Мир, 1985. 419 с.
5. **Николис Г., Пригожин И.** Самоорганизация в неравновесных процессах. От диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации. М.: Мир, 1979. 512 с.
6. **Дерябина М.А.** Теоретические и методологические основания самоорганизации // Вестник Института экономики РАН. 2017. № 5. С. 95–103.
7. **Лоскутов А.И.** Исследование процессов самосборки и самоорганизации при формировании металлполимерных наноконпозиций // Нанотехника. 2010. № 23. С. 66–69.
8. **Жуковский М.С., Безносюк С.А., Лерх Я.В., Жуковская Т.М.** Самосборка и самоорганизация неравновесных углеродных наногелей // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. 2010. Т. 8. № 2. С. 445–453.
9. **Климович Т.А., Колонтаева Т.В.** Самоорганизация и самосборка при получении твердофазных материалов // Новые направления развития приборостроения: Матер. XIII Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых и студентов. Минск: БНТУ, 2020. С. 163.
10. **Курдюмов С.П.** Сложность и самоорганизация. Будущее мира и России // Экономические стратегии. Т. 13. С. 13–30.
11. **Цветков Ю.Б., Багдасарьян Н.Г., Кошик В.С.** Анализ возможностей и перспектив методов нанолитографии с позиции синергетики // Вакуумная наука и техника: Матер. XXIV науч.-техн. конф. с участием зарубежных специалистов. Крым, Судак, 2017. М.: Новелла, 2017. 352 с.
12. **Каблов Е.Н., Толорайя, В.Н., Демонис, И.М., Орехов Н.Г.** Направленная кристаллизация жаропрочных никелевых сплавов // Технология легких сплавов. 2007. № 2. С. 60–70.
13. **Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Каблов Д.Е.** Особенности структуры и жаропрочных свойств монокристаллов <001> высокорениевого никелевого жаропрочного сплава, полученного в условиях высокоградиентной направленной кристаллизации // Авиационные материалы и технологии. 2011. № 4 (21). С. 25–31.
14. **Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б.** Развитие технологии направленной кристаллизации литейных высокожаропрочных сплавов с переменным управляемым температурным градиентом // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 24–38.
15. **Tsvetkov Y.B.** Computer simulation of diffraction focusing in proximity lithography // AIP Conf. Proc. AIP Publishing LLC, 2019. Vol. 2195. No. 1. P. 020064.
16. **Minghao Qi.** ECE 695Q: Nanometer Scale Patterning and Processing // URL: <https://nanohub.org/resources/24028> (Дата обращения: 17.02.2019).
17. **Park C.** Enabling nanotechnology with self assembled block copolymer patterns // Polymer. 2003. Vol. 44. No. 22. Pp. 6725–6760. DOI: 10.1016/j.polymer.2003.08.011
18. **Cheng J.Y., Ross C.A., Smith H.I., Thomas E.L.** Templated self-assembly of block copolymers: top-down helps bottom-up // Advanced Materials. 2006. Vol. 18. No. 19. Pp. 2505–2521. DOI: 10.1002/adma.200502651
19. **Black C.T.** Polymer self-assembly as a novel extension to optical lithography // ACS Nano. 2007. Vol. 1. No. 3. Pp. 147–150. DOI: 10.1021/nn7002663
20. **Kim J.K., Yang S.Y., Lee Y., Kim Y.** Functional nanomaterials based on block copolymer self-assembly // Progress in Polymer Science. 2010. Vol. 35. No. 11. Pp. 1325–1349. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2010.06.002
21. **Jeong S.J., Kim J.Y., Kim B.H., Moon H.S.** Directed self-assembly of block copolymers for next generation nanolithography // Materials today. 2013. Vol. 16. No. 12. Pp. 468–476. DOI: 10.1016/j.mat-tod.2013.11.002.
22. **Ramanathan M., Tseng Y.-C., Ariga K., Darling S.B.** Emerging trends in metal-containing block copolymers: Synthesis, self-assembly, and nanomanufacturing applications // J. of Materials Chemistry C. 2013. Vol. 1. No. 11. Pp. 2080–2091. DOI: 10.1039/c3tc00930k

Статья поступила в редакцию 14.03.2020.

REFERENCES

- [1] **L. Andreyev**, *Tekhnonauka [Technoscience], Philosophy of science and technology*, 16 (1) (2011) 200–218.
- [2] **V.V. Makarchuk, I.A. Rodionov, Yu.B. Tsvetkov**, *Metody litografii v nanoinzhenerii [Lithography techniques in nanoengineering]*, Moskva: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2011.
- [3] **Yu.B. Tsvetkov, Yu.V. Panfilov**, *Sovremennaya kontaktnaya fotolitografiya–klyuchevoj process mikroelektronnogo priborostroeniya [Modern contact photolithography is a key process in microelectronic instrumentation]*, *Pribory [Appliances]*, 1 (2020) 46–54.
- [4] **G. Khaken**, *Sinergetika: Ierarkhii neustoychivostey v samoorganizuyuy-shchikhsya sistemakh i ustroystvakh [Synergetics. Hierarchies of instabilities in self-organizing systems and devices]*. Moskva: Mir, 1985. 424 p.
- [5] **G. Nikolis, I. Prigozhin**, *Samoorganizatsiya v neravnovesnykh protsessakh. Ot dissipativnykh struktur k uporyadochennosti cherez fluktuatsii [Self-organization in nonequilibrium processes. From dissipative structures to ordering through fluctuations]*. Moskva: Mir, 1979. 512 p.
- [6] **M.A. Deryabina**, *Teoreticheskie i metodologicheskie osnovaniya samoorganizatsii [Theoretical and methodological foundations of self-organization]*, *Vestnik Instituta ekonomiki RAN*, 5 (2017) 95–103.
- [7] **A.I. Loskutov**, *Issledovanie processov samosborki i samoorganizatsii pri formirovanii metallpolimernykh nanokompozitsiy [Investigation of the processes of self-assembly and self-organization during the formation of metal-polymer nanocompositions]*, *Nanotekhnika*, 23 (2010) 66–69.
- [8] **M.S. Zhukovskij, S.A. Beznosyuk, YA.V. Lerh, T.M. Zhukovskaya**, *Samosborka i samoorganizatsiya neravnovesnykh uglerodnykh nanogeley [Self-assembly and self-organization of nonequilibrium carbon nanogels]*, *Nanosistemi, nanomateriali, nanotekhnologii*, 8 (2) (2010) 445–453.
- [9] **T.A. Klimovich, T.V. Kolontaeva**, *Samoorganizatsiya i samosborka pri poluchenii tverdogfaznykh materialov [Self-organization and self-assembly in the preparation of solid-phase materials]*. 2020.
- [10] **S.P. Kurdyumov**, *Slozhnost' i samoorganizatsiya. Budushchee mira i Rossii [Complexity and self-organization. The future of the world and Russia]*, *Ekonomicheskie strategii*, Vol. 13. Pp. 13–30.
- [11] **Yu.B. Tsvetkov, N.G. Bagdasaryan, V.S. Koshik**, *Analiz vozmozhnostey i perspektiv metodov nanolitografii s pozitsii sinergetiki, Vakuumnaya nauka i tekhnika: materialy XXIV nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s uchastiyem zarubezhnykh spetsialistov, Krym, g. Sudak, 16-23 sentyabrya 2017 [Vacuum Science and Technology: Materials of the XXIV Scientific and Technical Conference with the participation of foreign experts, Crimea, Sudak, September 16–23, 2017]*. Moskva: Novella, 2017. 352 p.
- [12] **E.N. Kablov, V.N. Tolorajya, I.M. Demonis, N.G. Orexov**, *Napravlennoy kristallizatsiya zharoprochnykh nikelovykh splavov [Directional crystallization of heat resistant nickel alloys]*, *Tekhnologiya legkikh splavov [Light alloy technology]*, 2 (2007) 60–70.
- [13] **E.N. Kablov, Yu.A. Bondarenko, D.E. Kablov**, *Osobennosti struktury i zharoprochnykh svoystv monokristallov <001> vysokorenievogo nikelovogo zharoprochnogo splava, poluchennogo v usloviyah vysokogradientnoy napravlennoy kristallizatsii [Features of the structure and heat-resistant properties of single crystals <001> of high-rhenium nickel heat-resistant alloy obtained under conditions of high-gradient directional solidification]*, *Aviacionnye materialy i tekhnologii [Aviation materials and technologies]*, 4 (21) (2011) 25–31.
- [14] **E.N. Kablov, Yu.A. Bondarenko, A.B. Echin**, *Razvitie tekhnologii napravlennoy kristallizatsii litejnykh vysokozharoprochnykh splavov s peremennym upravlyaemym temperaturnym gradientom [Development of technology for directional solidification of high-heat-resistant cast alloys with variable controlled temperature gradient]*, *Aviacionnye materialy i tekhnologii [Aviation materials and technologies]*, S (2017) 24–38.
- [15] **Yu. B. Tsvetkov**, *Computer simulation of diffraction focusing in proximity lithography*. AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC. 2195 (1) (2019) 020064.
- [16] **Qi Minghao**, *ECE 695Q: Nanometer Scale Patterning and Pro-cessing*. Available at: <https://nanohub.org/resources/24028> (accessed: 17.02.19).
- [17] **C. Park**, *Enabling nanotechnology with self assembled block copolymer patterns*, *Polymer*. 44 (22) (2003) 6725–6760. DOI: 10.1016/j.polymer.2003.08.011

- [18] **J.Y. Cheng, C.A. Ross, H.I. Smith, E.L. Thomas**, Templated self-assembly of block copolymers: top-down helps bottom-up, *Advanced Materials*, 18 (19) (2006) 2505–2521. DOI: 10.1002/adma.200502651
- [19] **C.T. Black**, Polymer self-assembly as a novel extension to optical lithography, *ACS Nano*, 1 (3) (2007) 147–150. DOI: 10.1021/nn7002663
- [20] **J.K. Kim, S.Y. Yang, Y. Lee, Y. Kim**, Functional nanomaterials based on block copolymer self-assembly, *Progress in Polymer Science*, 35 (11) (2010) 1325–1349. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2010.06.002
- [21] **S.J. Jeong, J.Y. Kim, B.H. Kim, H.S. Moon**, Directed self-assembly of block copolymers for next generation nanolithography, *Materials today*, 16 (12) (2013) 468–476. DOI: 10.1016/j.mattod.2013.11.002
- [22] **M. Ramanathan, Y.-C. Tseng, K. Ariga, S.B. Darling**, Emerging trends in metal-containing block copolymers: Synthesis, self-assembly, and nanomanufacturing applications, *Journal of Materials Chemistry C*, 1 (11) (2013) 2080–2091. DOI: 10.1039/c3tc00930k

Received 14.03.2020.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / THE AUTHOR

Кошик Виктор Сергеевич

Koshik Viktor S.

E-mail: koshikvictor@yandex.ru