Определение источников знаний о технологиях микро- и наноэлектроники

А.А. Шарапов 1, 2, ©, Е.С. Горнев 1

1 АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», Москва, Зеленоград, 124460 Россия
2 Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Московская область, Долгопрудный, 141701 Россия
© Автор для переписки, e-mail: andrey.sharapov@phystech.edu

Резюме

Цели. В течение последних десятилетий разработано множество моделей управления знаниями. Однако использование данных моделей для создания информационной системы в интересах исследовательских предприятий микроэлектроники не представляется возможным, поскольку они не учитывают динамику и характер развития технологий, а также специфику деятельности организаций в разных видах работ по генерации знаний. Цель работы – выявить направления актуальности разработки системы управления знаниями о технологиях микро- и наноэлектроники, определить и систематизировать источники знаний в данной научно-технической области.

Методы. Использован метод анализа взаимосвязи бизнес-показателей компаний с последующей визуализацией в виде циклической диаграммы причин, метод анализа заинтересованных сторон.

Результаты. Сформулированы три направления актуальности разработки системы управления знаниями в наукоемкой области технологий микро- и наноэлектроники – с точки зрения социальных, коммерческих и научно-технических эффектов в соответствующих организациях. К ключевым источникам знаний о технологиях микро- и наноэлектроники отнесены университеты, институты РАН, отраслевые институты, заказчики, производители и потребители. Обоснована важность рассмотрения цифровых двойников электронных компонент как перспективного источника знаний в данной области.

Выводы. Анализ кривой жизненного цикла технологии на примере области микро- и наноэлектроники позволяет соотнести отдельные этапы данного жизненного цикла с конкретными видами работ, в ходе выполнения которых происходит выработка новых знаний. В качестве видов работ выделены фундаментальные и прикладные исследования, изучение требований, реализация на производстве и анализ эксплуатации. Для отрасли микроэлектроники кривая жизненного цикла технологий они соответствуют участкам появления, пика ожиданий, избавления от иллюзий, преодоления недостатков и плато продуктивности.

Ключевые слова: знания, управление знаниями, наноиндустрия, цифровой двойник

© А.А. Шарапов, Е.С. Горнев, 2022
Identification of knowledge sources for micro- and nanoelectronics technologies

Andrey A. Sharapov 1, 2, @, Evgeny S. Gornev 1

1 Molecular Electronics Research Institute, Moscow, Zelenograd, 124460 Russia
2 Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow oblast, Dolgoprudny, 141701 Russia
@ Corresponding author, e-mail: andrey.sharapov@phystech.edu

Abstract

Objectives. Over the past few decades, multiple knowledge management models have been developed by many research groups studying the innovation process in companies. However, these knowledge and information management models are rather general, and do not consider the dynamics and variability of technology development. This implies involving specific organizations in different types of knowledge generation activities. The paper aims to reveal the importance of a knowledge management system in micro- and nanoelectronics technologies as well as identify and systematize the sources of knowledge in the scientific and technical field.

Methods. In this paper, the method for analyzing the relationship between key business indicators of the companies is applied. The results are then represented in a causal loop diagram. The stakeholder analysis method is also used here.

Results. Three relevant trends in developing the knowledge management system for knowledge-intensive enterprises involved in micro- and nanoelectronics technologies are identified with respect to the social, commercial, and scientific and technical aspects in research organizations. The key sources of knowledge on micro- and nanoelectronics technologies include universities, institutions of the Russian Academy of Sciences, industry-specific institutions, customers, manufacturers, and consumers. Also, the authors consider digital twins to be a promising source of knowledge on micro- and nanoelectronics technologies.

Conclusions. The analysis of the technology life cycle curve using the example of micro- and nanoelectronics allows correlating single stages of this life cycle with specific activities during which new knowledge is generated. These activities include fundamental and applied research, requirements management, implementation in manufacturing, and operation analysis. For microelectronics, they correspond to the areas of emergence, peak of inflated expectations, trough of disillusionment, slope of enlightenment, and plateau of productivity on the technology life cycle curve.

Keywords: knowledge, knowledge management, nanoindustry, digital twin

For citation: Sharapov A.A., Gornev E.S. Identification of knowledge sources for micro- and nanoelectronics technologies. Russ. Technol. J. 2022;10(2):87–95. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-87-95

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned. The authors declare no conflicts of interest.

RESEARCH ARTICLE

Identification of knowledge sources for micro- and nanoelectronics technologies

ВВЕДЕНИЕ

Неотъемлемая часть фундаментальных и прикладных изысканий в современных научно-исследовательских организациях — это пополнение и использование общего объема профессиональных знаний. Согласно [1] такие знания можно рассматривать как часть интеллектуального капитала организации, а, следовательно, как предмет управления. В работах [2, 3] приведены некоторые из наиболее известных моделей управления знаниями: модель Чу принятия решений на основе осмысления информации, модель Хедлунда на основе переноса и трансформации знания, модель индивидуальных и коллективных знаний фон Крога и Рооса и другие. В целом все они основываются на следующем разделении двух типов знаний в зависимости от состояния оформленности (способности быть сохраненными и передаваемыми):

1) формализованные (явные) — находящиеся в конкретной форме. Например, в виде записей на естественном языке, в двоичном коде, в виде...
инструкции на языке программирования и др. Явные знания систематизированы, могут быть упакованы в форму услуги (например, онлайн-курсы или программы повышения квалификации) или продукта (пособия, видео, конспекты и др.) и переданы в ходе процесса преподавания;
2) неформализованные (неявные), обычно хранимые в разуме конкретных людей. Включая в себя динамически изменяемые, подстраиваемыеся понимания, коллективные знания, экспертизу в смысле «ноу-хау». Передаются такие знания посредством тренингов и наставничества. Этот тип знаний был предложен Майклом Полани в 1958 г. [4].

Согласно модели SECI (англ. Socialization, Externalization, Combination, and Internalization), предложенной Икудзиро Нонака в 1990 г., знания «перемещаются» по спиралевидному циклу, в котором неявные знания «извлекаются», чтобы стать явными знаниями, а явные знания «переинтернализируются» в неявные знания. Таким образом, информация проходит четыре стадии — социализацию, экстернализацию, комбинацию, интернализацию, и именно в ходе многочисленных переходов между формализованным и неформализованным состоянием рождается новое знание.

Эти определения полностью подходят для использования в контексте управления знаниями в сфере технологий микро- и наноэлектроники. Однако в силу общности ни одна из описанных моделей не может быть напрямую применена для описания процесса пополнения интеллектуального капитала в организациях конкретных научно-исследовательских проектов. Разработку модельного описания процесса управления знаниями целесообразно начать с определения их источников.

### СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ЗНАНИЯМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОРГАНИЗАЦИЙ

Сопоставляя вышеуказанные модели, можно выделить основные компоненты процесса управления знаниями организаций — сбор (получение), передача (обеспечение доступа и трансфер), применение, защита и хранение [5].

Стоит подчеркнуть, что эти действия играют определяющую роль в эффективности работы предприятий такой наукоемкой отрасли, как микроэлектроника, в которой соединяются наномасштабная физика, твердотельная электроника, квантовая теория, химия и другие области науки [6]. При этом в ходе изучения российских предприятий, занимающихся разработками в области технологий микро- и наноэлектроники, не обнаружено систем управления знаниями, обладающих полным набором ключевых компонент. В то же время отдельные процессы (например, накопление информации в виде комплектов проектной документации) на протяжении десятилетий успешно реализуются отдельными подразделениями.

Внедрение системного подхода к управлению знаниями в области технологий микро- и наноэлектроники позволит:
1) отслеживать направления исследований и развития технологий в области микроэлектроники для корректного позиционирования в отрасли и принятия решений по участию в совместных проектах [7];
2) контролировать скорость продвижения исследований на этапе прикладных исследований для того, чтобы не пропустить смену трендов;
3) оценивать степень зрелости новых решений с точки зрения возможности повышения надежности и получения новых функциональных свойств.

### АКТУАЛЬНОСТЬ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЗНАНИЯМИ МИКРОЭЛЕКТРОННИКИ

Создание, наполнение информационной базы и управление знаниями по технологиям микро- и наноэлектроники актуально для научно-исследовательских предприятий данного направления с точки зрения трех аспектов: социального, коммерческого и научно-технического. Так, за счет обмена информацией, научные результаты, генерируемые исследовательскими подразделениями, с большей вероятностью найдут применение в разработках конструкторских отделов. В то же время проблемы, которые формулируются техническими специалистами в ходе разработки и требуют проведения научных исследований, благодаря единой информационной системе станут известными научным коллективом предприятий. Таким образом, коммуникационно связывая исследователей и разработчиков микроэлектронных технологий, возможно добиться ускорения в решении общих задач всего предприятия, в частности, увеличить объем знаний. Кроме того, накопленные знания обеспечат возможность проводить более детальный анализ как коммерчески доступных продуктов и технологий, так и научных достижений, позволяют составить более точную картину доступных на российском и мировом рынке
микроэлектронных технологий. Формально данные направления можно объединить термином «инновационно-технологическая разведка» или «скаутинг». Корректируя направления развития продуктов, а также теоретических и экспериментальных изысканий, в конечном счете можно добиться новых результатов, востребованных на внешних площадках. Решение проблем разработки и производства с помощью дополнительных исследований приведет к повышению надежности изделий за счет улучшения технологий микроэлектроники.

На рис. 1 направления актуальности схематично представлены в виде трех контуров положительной обратной связи – увеличение одного показателя при движении по часовой стрелке.

**СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ЗНАНИЙ О МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ**

Используя понятие кривой жизненного цикла технологий, введенное в употребление компанией Гартнер в 1995 г., можно считать, что микро- и наноэлектроника как совокупность производственных технологий находится на «плато продуктивности» [8]. Это означает, что знаний, накопленных в этих сферах, достаточно для организации коммерческих микроэлектронных производств. Вместе с тем, открытия в смежных областях (материаловедении, оптике, нанофизике) делают возможными новые улучшения основной технологии микроэлектроники, каждое из которых проходит весь жизненный цикл от появления до широкого внедрения.

На рис. 2 представлено предложение авторов хронологически сопоставить стадии жизненного цикла технологии кривой Гартнера и источников знаний, выявленных в результате классификации контрагентов на рынке технологий микро- и наноэлектроники по направлениям деятельности.

Накопление знаний происходит на всех стадиях жизненного цикла технологии. При этом после успешного завершения каждой стадии к работам в данной области подключаются новые организации, которые становятся новыми источниками знаний. Для удобства рассмотрения выделим два типа работ, результатом которых может быть выработка новых знаний:

1) исследовательские – фундаментальные и прикладные;
2) инженерные – работа с требованиями, производство и эксплуатация.

**ИСТОЧНИКИ ЗНАНИЙ НА ЭТАПЕ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Первый этап – **фундаментальные исследования**, включающие изучение физических процессов, определение возможностей и допустимых границ. Ключевые участники, выполняющие основную работу по накоплению знаний на данном этапе, – это академические институты, университеты.

В качестве примера физического принципа, в течение десятилетий находящегося на этапе фундаментальных изысканий, можно привести принцип кулоновской блокады на основе двух туннельных переходов. В настоящее время этот принцип пока не
привел к появлению в качестве приборов микролэктронники одноэлектронного транзистора и других нетрадиционных транзисторных структур.

Следующий уровень – прикладные исследования, которые заключаются в попытках реализовать в приборах физические принципы, тщательно изученные на предыдущем этапе. На данной стадии по состоянию на 2021 г. находятся мемристоры и схемы памяти на основе сегнетоэлектриков [9, 10], а также активные и пассивные элементы фотонных интегральных схем, изготовленные с применением микролэктронных технологий [11]. Если технология достигает стадии зрелого исследования, то возможен переход к опытно-конструкторским работам, которые должны привести к созданию опытных образцов.

В частности, для перехода на новые материалы [12] необходимо провести масштабный комплекс испытаний, чтобы убедиться, что при внесении изменений не произошло ухудшения характеристик конечных устройств, в первую очередь, с точки зрения надежности [13, 14]. Это крайне важно для применения в военной сфере [15] и критично для необслуживаемых космических систем, выполненных с помощью технологий микро- и наноэлектроники [16].

ИСТОЧНИКИ ЗНАНИЙ НА ЭТАПАХ ИНЖЕНЕРНЫХ РАБОТ ПО СОЗДАНИЮ МИКРОСХЕМ

Одним из главных направлений, стимулировавших в 1970-х гг. развитие российской микролэктронники, была миниатюризация уже разработанных схем путем реализации их в виде микросистемных блоков. Использование интегральных схем (ИС) для заказных систем с заранее сформулированными функциональными требованиями и требованиями по надежности стало очередным шагом на этом пути. С тех пор и по настоящее время микролэктронника остается элементной базой информатики.

Современные методики проектирования приборов на основе требований включают широкое использование автоматизации. Возможным дополнением к существующим алгоритмам проектирования может стать применение на начальном этапе разработки фундаментального параметрического синтеза, который позволит подбирать более эффективные проектные решения за счет выбора принципа определения параметров внешней среды [17]. Знания о таких принципах являются результатом фундаментальных и прикладных исследований.
С изменяющимися требованиями к разработке вычислительной техники связано еще одно направление знаний по технологиям микроэлектроники. Развитие таких направлений, как нейросетевые алгоритмы [18], искусственный интеллект, приводит к появлению процессоров специального назначения, архитектуры которых оптимизирована для решения определенного класса вычислительных задач с малым набором команд за счет уменьшения возможностей хранения информации.

Ключевым источник знаний по технологиям связан с их реализацией в рамках конкретных производств. В ходе развития отрасли решаются вопросы обеспечения чистоты технологических сред – сначала на уровне частиц на площадь, затем микрочастиц на объем, а теперь актуальным является вопрос устранения молекулярно-воздушных загрязнений. Достигнут большой прогресс в решении проблемы ранних отказов за счет внедрения технологических испытаний и доработок конструкции [19].

Другой источник знаний связан с вопросами, которые появляются на этапе эксплуатации уже выпущенных микросхем. Некоторые аспекты относятся к возможностям расширения границ применения и увеличения функционала путем доработки программного обеспечения (ПО). Кроме того, анализируются случаи отказов микросхем, в частности, пробоев, которые выражаются в необратимом изменении свойств систем, вызванным локальными разогревами.

**ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЗНАНИЙ**

Сравнительно недавняя тенденция в науке и технике – формирование области под названием «системный инжиниринг на основе моделей» (англ. model-based systems engineering, MBSE). В рамках этого направления технологические компании вносят комплексные исполненные модели в качестве единого источника новой информации. Конечной целью данного вида системного инжиниринга является создание так называемого цифрового двойника.

Цифровые двойники обеспечивают возможность моделирования полупроводниковых приборов и конечных электронных систем как на аппаратном, так и на программном уровне [20]. Особую значимость будет иметь учет условий окружающей среды, оказывающей разнообразное воздействие на оборудование и ПО: влияние внешних электрических и магнитных полей, акустических волн, проникновение высокоэнергетических частиц и т.д. [21]. Моделирование физических процессов в интегральных схемах и микросхемах позволяет оценить влияние различных внутренних и внешних факторов на соответствующие температурные и электрические параметры, определяющие надежность и помехозащищенность компонентной базы.

По сравнению с моделями системных уровней цифровой двойник полупроводникового компонента отражает поведение системы не только на определенном уровне, а в течение всего жизненного цикла. В него входят следующие этапы: (1) описание концепции, составление технического задания (ТЗ); (2) проработка архитектуры; (3) разработка логики ИС; (4) разработка топологии ИС; (5) верификация; (6) утверждение фотошаблонов; (7) производство фотошаблонов; (8) валидация; (9) разработка маршрутной карты; (10) производство; (11) корпусирование; (12) тестирование; (13) испытания; (14) сертификация; (15) запуск серии; (16) эксплуатация.

Реализация цифрового двойника подразумевает синхронный сбор и анализ данных со всех стадий и от всех участников процесса создания конкретного полупроводникового устройства, начиная с дизайн-центров и заканчивая производственной площадкой и пользователем. Фактически необходимо создание системы управления данными, которые появляются в ходе разработки и технологической подготовки производства, а также процессами появления и преобразования этих данных. В единой системе станет возможным управление проектом разработки, учет сроков, стоимости, ресурсов и метрики качества конечных изделий [22], и, при необходимости, полный мониторинг конкретных эксплуатирующихся компонентов вплоть до момента формирования структур в составе ИС с помощью технологий микро- и наноэлектроники.

Можно сделать вывод, что цифровые двойники электронных систем как единые источники новой информации могут стать дополнительным источником знаний по технологиям микро- и наноэлектроники. Однако на текущий момент нет сведений о существовании полноценных цифровых двойников микросхем, поэтому в нашей схеме источников знаний о технологиях микро- и наноэлектроники такой ресурс отсутствует.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В заключении подчеркнем, что существующие модели управления знаниями могут успешно использоваться для описания процессов лишь в рамках отдельных наукоемких предприятий. В силу заметного отличия видов исследований в микроэлектронике, реализуемых разными организациями (при этом плотно сотрудничающими для решения общих научно-технических задач), проведенная в данной работе систематизация является полезной. Предложенное разделение агентов, работающих
Согласно микроэлектронике, представляет собой прототип информационного инструмента, который помогает коллективам, реализующим проекты в данном секторе экономики, определять круг потенциально заинтересованных партнеров в соответствии с этапами развития технологии по кривой жизненного цикла. При необходимости можно уточнить данную схему, добавив направления исследований и указывая конкретные названия организаций.

Работа с потоками информации из обнаруженных источников знаний о технологиях микро- и наноэлектроники позволит в дальнейшем сформулировать предложения об оптимальной структуре базы знаний на предприятии, а также о средствах доступа, использования и управления содержащимися в ней сведениями. Кроме того, станет возможным определение подхода к отбору найденной в доступных источниках информации для автоматизированного пополнения базы знаний.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors’ contribution. All authors equally contributed to the research work.

Список литературы

1. Надточий Ю.Б., Будович Л.С. Интеллектуальный капитал организации: сущность, структура, подходы к оценке. Российский технологический журнал. 2018;6(2):82–95. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-2-82-95

2. Mohajan H.K. The impact of knowledge management models for the development of organizations. J. Environ. Treat. Tech. 2017;5(1):12–33.

3. Marinko G.I. Modern models and schools in knowledge management. J. Environ. Treat. Tech. 2017;5(1):12–33.

4. Polanyi M. Personal knowledge: towards a post-critical philosophy. Chicago: University of Chicago Press; 1958. 464 p.

5. Lytras M.D., Pouloudi A. Project management as a knowledge management primer: the learning infrastructure in knowledge-intensive organizations: projects as knowledge transformations and beyond. The Learning Organization. 2003;10(4):237–250. https://doi.org/10.1108/09696470310476007

6. Горнев Е.С. Отечественная микроэлектроника: ожидания и перспективы. Наноиндустрия. 2018;11(6):392–398. https://doi.org/10.22184/1993-8578.2018.11.6.392.398

7. Горнев Е.С., Зайцев Н.А., Равилов М.Ф., Романов И.М., Ранчин С.О., Былинкин Д.А. Анализ разработанных зарубежных изделий микросистемной техники. Микросистемная техника. 2002;7:6–11.

8. Красников Г.Я., Горнев Е.С., Матюшкин И.В. Общая теория технологий и микроэлектроника. М.: ТЕХНОСФЕРА; 2020. 434 с.

9. Теплов Г.С., Горнев Е.С. Модель на языке Verilog-A многоуровневого биполярного мемристора с учетом девиаций параметров переключения. Микроэлектроника. 2019;48(3):163–175. https://doi.org/10.1134/S0544126919030104

10. Красников Г.Я., Зайцев Н.А., Красников А.Г. Современное состояние разработок в области энергонезависимой памяти. Нано- и микроэлектронная техника. 2015;4(177):60–64.

1. Надточий Ю.Б., Будович Л.С. Интеллектуальный капитал организации: сущность, структура, подходы к оценке. Общая теория технологий и микроэлектроника. 2018;6(2):82–95. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-2-82-95

2. Mohajan H.K. The impact of knowledge management models for the development of organizations. J. Environ. Treat. Tech. 2017;5(1):12–33.

3. Marinko G.I. Modern models and schools in knowledge management. J. Environ. Treat. Tech. 2017;5(1):12–33.

4. Polanyi M. Personal knowledge: towards a post-critical philosophy. Chicago: University of Chicago Press; 1958. 464 p.

5. Lytras M.D., Pouloudi A. Project management as a knowledge management primer: the learning infrastructure in knowledge-intensive organizations: projects as knowledge transformations and beyond. The Learning Organization. 2003;10(4):237–250. https://doi.org/10.1108/09696470310476007

6. Горнев Е.С. Национальная микросистемная техника: ожидания и перспективы. Наноиндустрия. 2018;11(6):392–398. https://doi.org/10.22184/1993-8578.2018.11.6.392.398

7. Горнев Е.С., Зайцев Н.А., Равилов М.Ф., Романов И.М., Ранчин С.О., Былинкин Д.А. Анализ разработанных зарубежных изделий микросистемной техники. Микросистемная техника. 2002;7:6–11.

8. Красников Г.Я., Горнев Е.С., Матюшкин И.В. Общая теория технологий и микроэлектроника. М.: ТЕХНОСФЕРА; 2020. 434 с.

9. Теплов Г.С., Горнев Е.С. Модель на языке Verilog-A многоуровневого биполярного мемристора с учетом девиаций параметров переключения. Микроэлектроника. 2019;48(3):163–175. https://doi.org/10.1134/S0544126919030104

10. Красников Г.Я., Зайцев Н.А., Красников А.Г. Современное состояние разработок в области энергонезависимой памяти. Нано- и микроэлектронная техника. 2015;4(177):60–64.
11. Sharapov A.A., Shamin E.S., Skuratov I.D., Gornev E.S. Grounds and problem statement for software complex for photolithography optimization for minimization of losses in optical structures of photonic integrated circuits. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020;939:012070. https://doi.org/10.1088/1757-899X/939/1/012070

12. Bokarev V.P., Krasnikov G.Ya. Estimation of the change in the physicochemical properties of Nanosized crystalline materials. Doklady Physical Chemistry. 2020;420(1):96–99. https://doi.org/10.1134/S00125016080805047

13. Krasnikov G.Ya., Zaitsev N.A., Krasnikov A.G. Current state of development in the nonvolatile memory. Nano- и микросистемная техника = Nano- and Microsystems Technology. 2015;4(177):60–64 (in Russ.).

14. Krasnikov G.Ya., Meshchanov V.D., Shelepin N.A. The fundamental parametric approach for determining transistor characteristics. Микроэлектроника. 2015;4(160):39–43.

15. Gavrilov S.V., Zheleznikov D.A., Zapletina M.A., Khvatov V.M., Chechaev R.Zh., Enns V.I. Estimation of the change in the physicochemical properties of Nanosized crystalline materials. Doklady Akademii nauk. 2008;420(2):186–189.

16. Prosin A.D., Ranchin S.O., Shelepina N.A. Quality assurance in modern semiconductor manufacturing. Elektronnaya technika. Серия 3: Микроэлектроника. 2015;4(160):39–43.

17. Bokarev V.P., Krasnikov G.Ya. Current state of development in modern semiconductor manufacturing. Elektronnaya technika. Серия 3: Микроэлектроника. 2015;4(160):39–43.

18. Tel'minov O.A., Zheleznikov D.A., Zapletina M.A., Khvatov V.M., Chechaev R.Zh., Enns V.I. Layout synthesis design flow for special-purpose reconfigurable systems-on-a-chip. Russian Microelectronics. 2019;48(3):211–223. https://doi.org/10.1134/S0544126919010040

19. Gavrilov S.V., Zheleznikov D.A., Zapletina M.A., Khvatov V.M., Chechaev R.Zh., Enns V.I. Layout synthesis design flow for special-purpose reconfigurable systems-on-a-chip. Mikroelektronika. 2019;48(3):211–223 (in Russ.). https://doi.org/10.1134/S0544126919010040

20. Gor'nev E.S. Methods of ensuring the reliability of modern ULSI. In: Mathematical Modeling in Materials Science of Electronic Components ICMSEC–2020. October 19–20, 2020, Moscow. Proceedings of the international conference. Moscow: MAKS Press; 2020. P. 13–21 (in Russ.).
Определение источников знаний о технологиях микро- и наноэлектроники

А.А. Шарапов, Е.С. Горнев

22. Шарапов А.А., Баранов Г.В. Сравнительный анализ методик оценки количественных характеристик шероховатости наноразмерных структур. Труды МФТИ. 2018;10(2,38):72–79.

20. Tel’minov O.A., Gornev E.S., Chernyaev N.V., Yanovich S.I., Moshkarova L.A., Shakhmanova M.V. Research on the possibility of constructing a digital twin of integrated circuits for analyzing and predicting their reliability. Nanoindustriya = Nanoindustry. 2021;14(S7,107):694–695 (in Russ.). https://doi.org/10.22184/1993-8578.2021.14.7s.694.695

21. Il’in S.A., Lastochkin O.V., Nadin A.S., Novikov A.A., Shipitsin D.S. Design platform for CMOS RHBD 90 nm technology. Nanoindustriya = Nanoindustry. 2019;S(89):254–257 (in Russ.).

22. Sharapov A.A., Baranov G.V. Comparative analysis of nanoscale roughness measurement methods. Trudy MFTI. 2018;10(2,38):72–79 (in Russ.).

Об авторах

Шарапов Андрей Анатольевич, научный сотрудник АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (124460, Россия, Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6/1); аспирант Физтех-школы электроники, фотоники и молекулярной физики и магистрант кафедры системного инжиниринга Высшей школы системного инжиниринга ФГАОУ ВО «Московский физико-технический университет» (141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9). E-mail: andrey.sharapov@phystech.edu. ResearcherID ABC-7256-2021, https://orcid.org/0000-0001-9945-3875

Горнев Евгений Сергеевич, член-корреспондент РАН, д.т.н., профессор, заместитель руководителя приоритетного технологического направления по электронным технологиям, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (124460, Россия, Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6/1). E-mail: egornev@niime.ru. Scopus Author ID 6507763230.

About the authors

Andrey A. Sharapov, Research Scientist, Molecular Electronics Research Institute (6/1, ul. Akademika Valieva, Zelenograd, Moscow, 124460 Russia); Postgraduate Student, Phystech School of Electronics, Photonics and Molecular Physics, and Master Student, Higher School of Systems Engineering, Moscow Institute of Physics and Technology (9, Institutskii per., Dolgoprudny, Moscow oblast, 141701 Russia). E-mail: andrey.sharapov@phystech.edu. ResearcherID ABC-7256-2021, https://orcid.org/0000-0001-9945-3875

Evgeny S. Gornev, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Deputy Head of the Priority Technological Area for Electronic Technologies, Molecular Electronics Research Institute (6/1, ul. Akademia Valieva, Zelenograd, Moscow, 124460 Russia). E-mail: egornev@niime.ru. Scopus Author ID 6507763230.