

Мировоззренческие основы технологии и общества
Philosophical foundations of technology and society

УДК 001.61
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-87-95>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Определение источников знаний о технологиях микро- и нанoeлектроники

А.А. Шарапов^{1, 2, @}, Е.С. Горнев¹

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 нанoeлектроники, определить и систематизировать источники знаний в данной научно-технической области.

Методы. Использованы 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 нанoeлектроники – с точки зрения социальных, коммерческих и научно-технических эффектов в соответствующих организациях. К ключевым источникам знаний о технологиях микро- и нанoeлектроники отнесены университеты, институты РАН, отраслевые институты, заказчики, производства 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 нанoeлектроники 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 на кривой жизненного цикла технологий они соответствуют участкам появления, пика ожиданий, избавления от иллюзий, преодоления недостатков и плато продуктивности.

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

• Поступила: 17.11.2021 • Доработана: 09.12.2021 • Принята к опубликованию: 03.03.2022

Для цитирования: Шарапов А.А., Горнев Е.С. Определение источников знаний о технологиях микро- и нанoeлектроники. *Russ. Technol. J.* 2022;10(2):87–95. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-87-95>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Identification of knowledge sources for micro- and nanoelectronics technologies

Andrey A. Sharapov^{1, 2, @}, Evgeny S. Gornev¹

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

• **Submitted:** 17.11.2021 • **Revised:** 09.12.2021 • **Accepted:** 03.03.2022

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.

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 Круга 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. Включают в себя динамически изменяемые, подстраивающиеся 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.¹, знания «перемещаются» по спиралевидному циклу, в котором неявные знания «извлекаются», чтобы стать явными знаниями, а явные знания «переинтернализуются» 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 наукоемких отраслей, участвующих в многочисленных кооперациях и проектных исследованиях, а также проводящих целый ряд внутренних научно-исследовательских работ. 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 возможностей повышения надежности и получения новых функциональных свойств.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЗНАНИЯМИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

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 коллективам 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, позволят составить более точную картину доступных на российском и мировом рынке

¹ Management for Knowledge Creation, Tokyo: Nihon Keizai Shimbun-sha, 1990, (in Japanese).

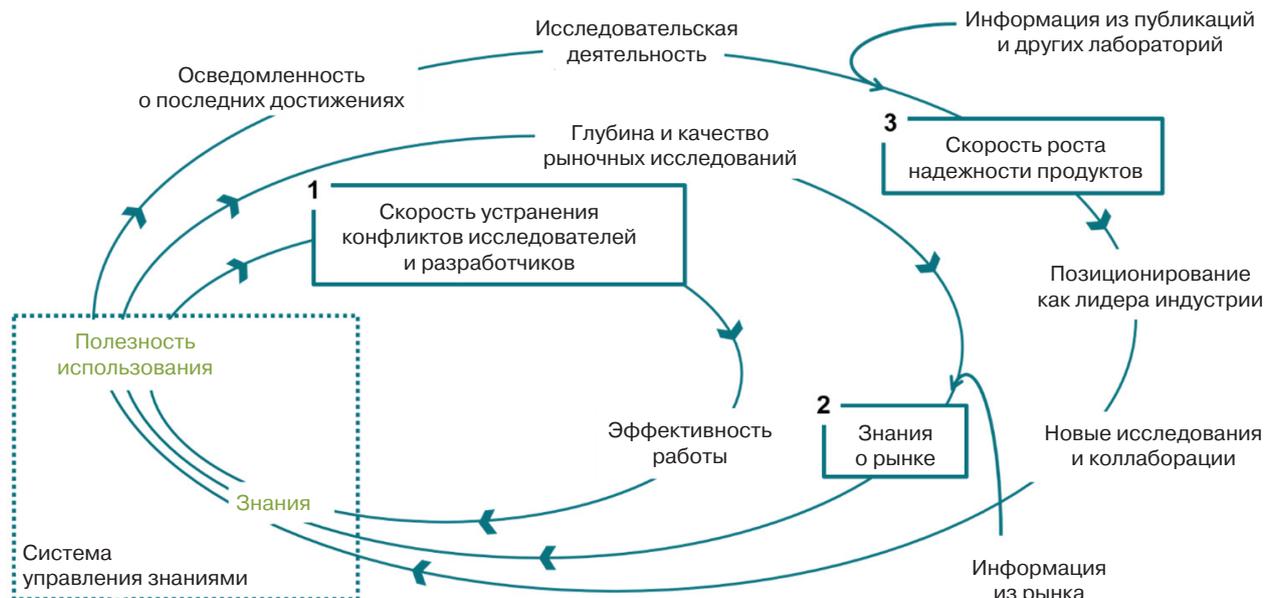


Рис. 1. Циклы положительной обратной связи с точки зрения бизнес-процессов в социальном, коммерческом и научно-техническом аспектах, которые образуются при внедрении корпоративной базы знаний по технологиям микроэлектроники

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 приводит к улучшению следующего 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 нанoeлектроника как совокупности производственных технологий находятся 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, нанofизике) 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 нанoeлектроники 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

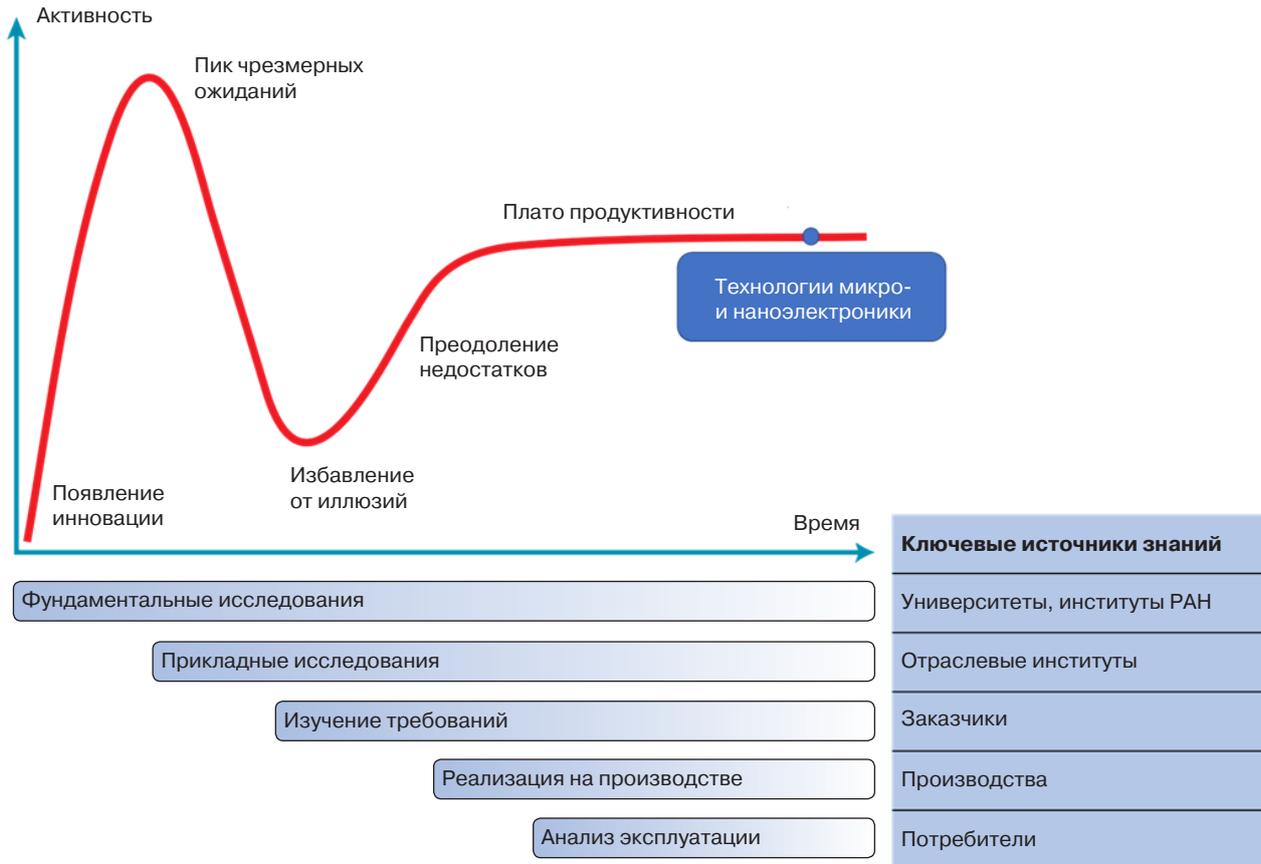


Рис. 2. Кривая жизненного цикла технологии, этапы накопления и источники знаний о технологиях микроэлектроники

привел к появлению в качестве приборов микроэлектроники 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 микроэлектронных 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 нанoeлектроники [16].

ИСТОЧНИКИ ЗНАНИЙ НА ЭТАПАХ ИНЖЕНЕРНЫХ РАБОТ ПО СОЗДАНИЮ МИКРОСХЕМ

Одним из главных направлений, стимулировавших в 1970-х гг. развитие российской микроэлектроники, 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 микроэлектроника 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, архитектура которых оптимизирована для решения определенного класса вычислительных задач с малым набором команд за счет уменьшения возможностей хранения информации.

Ключевой 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, вызванном 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 внедряют комплексные исполняемые модели в качестве единого источника новой информации. Конечной целью данного вида системного инжиниринга является создание так называемого цифрового двойника.

Цифровые двойники обеспечат 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 микросистемах 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 этапе, 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 нанoeлектроники.

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

в области микроэлектроники, представляет собой прототип информационного инструмента, который поможет 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 уточнять данную схему, добавляя направления исследований и указывая конкретные названия организаций.

Работа с потоками информации из обнаруженных источников знаний о технологиях микро- и наноэлектроники позволит в дальнейшем сформулировать

представления 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. Маринко Г.И. Современные модели и школы в управлении знаниями. *Вестник Московского университета. Серия 21: Управление (государство и общество)*. 2004;2:45–65.
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 микросистемная техника*. 2015;4(177):60–64.

REFERENCES

1. Nadtochiy Yu.B., Budovich L.S. Intellectual capital of the organization: the essence, structure, approaches to evaluation. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2018;6(2):82–95 (in Russ.). <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. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 21: Upravlenie (gosudarstvo i obshchestvo) = Moscow University Bulletin. Series 21. Public Administration*. 2004;2:45–65 (in Russ.)
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. Gornev E.S. National microelectronics: expectations and prospects. *Nanoindustrialiya = Nanoindustry*. 2018;11(6):392–398 (in Russ.). <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2018.11.6.392.398>
7. Gornev E.S., Zaitsev N.A., Ravilov M.F., Romanov I.M., Ranchin S.O., Bylinkin D.A. The analysis of the developed foreign products of microsystem techniques. *Mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and Microsystems Technology*. 2002;7:6–11 (in Russ.)
8. Krasnikov G.Ya., Gornev E.S., Matyushkin I.V. *Obshchaya teoriya tekhnologii i mikroelektronika (General Theory of Technology and Microelectronics)*. Moscow: TEKhNOSFERA; 2020. 434 p. (in Russ.)
9. Teplov G.S., Gornev E.S. Multilevel bipolar memristor model considering deviations of switching parameters in the Verilog-A language. *Russian Microelectronics*. 2019;48(3):131–142. <https://doi.org/10.1134/S1063739719030107> [Original Russian Text: Teplov G.S., Gornev E.S. Multilevel bipolar memristor model considering deviations of switching parameters in the Verilog-A language. *Mikroelektronika*. 2019;48(3):163–175 (in Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0544126919030104>]

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. Бокарев В.П., Красников Г.Я. Оценка изменения физико-химических свойств наноразмерных кристаллических материалов. *Доклады Академии наук*. 2008;420(2):186–189.
13. Просий А.Д., Ранчин С.О., Шелепин Н.А. Обеспечение качества в современном полупроводниковом производстве. *Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника*. 2015;4(160):39–43.
14. Соловьев А.В., Селецкий А.В. Недостатки отчетственных расчетно-экспериментальных методик прогнозирования надежности интегральных схем. *Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС)*. 2020;1:76–81. <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2020-1-76-81>
15. Гаврилов С.В., Железников Д.А., Заплетина М.А., Хватов В.М., Чочаев Р.Ж., Эннс В.И. Маршрут топологического синтеза для реконфигурируемых систем на кристалле специального назначения. *Микроэлектроника*. 2019;48(3):211–223. <https://doi.org/10.1134/S0544126919030050>
16. Красников Г.Я., Мещанов В.Д., Шелепин Н.А. Семейство микросхем ПЗУ информационной емкостью 4–64 Мбит для космических применений. *Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника*. 2015;2(158):4–10.
17. Колдаев И.М. Фундаментальный параметрический подход к синтезу электронных систем. *Наноиндустрия*. 2020;S96(1):265–269. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.3s.265.269>
18. Тельминов О.А., Горнев Е.С., Мошкарлова Л.А., Янович С.И., Морозов Е.Н. Оценка возможности применения нейросетевого байесовского подхода к выявлению корреляции между параметрами тестовых элементов для межоперационного контроля технологического процесса и характеристиками формируемой транзисторной структуры. *Наноиндустрия*. 2020;13(S4,99):559–560. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.4s.559.560>
19. Горнев Е.С. Методы обеспечения надежности современных СБИС. Математическое моделирование в материаловедении электронных компонентов. В сб.: *Математическое моделирование в материаловедении электронных компонентов (ММЭЖ–2020)*. Сборник материалов II международной конференции. 19–20 октября 2020 г. М.: МАКС Пресс; 2020. С. 13–21.
20. Тельминов О.А., Горнев Е.С., Черняев Н.В., Янович С.И., Мошкарлова Л.А., Шахманова М.В. Исследование возможности построения цифрового двойника интегральных схем для анализа и прогнозирования их надежности. *Наноиндустрия*. 2021;14(S7,107):694–695. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2021.14.7s.694.695>
21. Ильин С.А., Ласточкин О.В., Надин А.С., Новиков А.А., Шипицин Д.С. Конструкторско-технологическая платформа проектирования радиационно-стойких СБИСБ на базе отечественной технологии КМОП 90 нм на основе RHBD методологии. *Наноиндустрия*. 2019;S(89):254–257.
10. Krasnikov G.Ya., Zaitsev N.A., Krasnikov A.G. Current state of development in the nonvolatile memory. *Nano-i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and Microsystems Technology*. 2015;4(177):60–64 (in Russ.).
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*. 2008;420(1):96–99. <https://doi.org/10.1134/S0012501608050047> [Original Russian Text: Bokarev V.P., Krasnikov G.Ya. Estimation of the change in the physicochemical properties of Nanosized crystalline materials. *Doklady Akademii nauk*. 2008;420(2):186–189 (in Russ.).]
13. Prosiy A.D., Ranchin S.O., Shelepin N.A. Quality assurance in modern semiconductor manufacturing. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 3: Mikroelektronika = Electronic Engineering. Series 3. Microelectronics*. 2015;4(160):39–43 (in Russ.).
14. Solov'ev A.V., Seletskii A.V. Disadvantages of domestic analytical-experimental methods prediction of integrated circuits reliability. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) = Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development (MES)*. 2020;1:76–81 (in Russ.). <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2020-1-76-81>
15. Gavrilov S.V., Zheleznikov D.A., Zapletina M.A., Khvatov V.M., Chochaev R.Zh., Enns V.I. Layout synthesis design flow for special-purpose reconfigurable systems-on-a-chip. *Russian Microelectronics*. 2019;48(3):176–186. <https://doi.org/10.1134/S1063739719030053> [Original Russian Text: Gavrilov S.V., Zheleznikov D.A., Zapletina M.A., Khvatov V.M., Chochaev 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/S0544126919030050>]
16. Krasnikov G.Ya., Meshchanov V.D., Shelepin N.A. Family 4–64 Mbit ROM integrated circuits for space applications. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 3: Mikroelektronika = Electronic Engineering. Series 3. Microelectronics*. 2015;2(158):4–10 (in Russ.).
17. Koldaev I.M. The fundamental parametric approach to synthesis of electronic systems. *Nanoindustriya = Nanoindustry*. 2020;S96(1):265–269 (in Russ.). <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.3s.265.269>
18. Tel'minov O.A., Gornev E.S., Moshkarova L.A., Yanovich S.I., Morozov E.N. Evaluation of bayes neural network approach for determining transistor characteristics and operational process control correlation. *Nanoindustriya = Nanoindustry*. 2020;13(S4,99):559–560 (in Russ.) <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.4s.559.560>
19. Gornev E.S. Methods for ensuring the reliability of modern ULSI. In: *Mathematical Modeling in Materials Science of Electronic Components ICM3SEC–2020*. October 19–20, 2020, Moscow. Proceedings of the international conference. Moscow: MAKS Press; 2020. P. 13–21 (in Russ.).

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 институт (национальный исследовательский 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. Akademika Valieva, Zelenograd, Moscow, 124460 Russia). E-mail: egornev@niime.ru. Scopus Author ID 6507763230.