

Сушко Ольга Петровна

Российский экономический университет им Г.В. Плеханова

Интеграция микроэлектроники и фотоники для систем хранения, обработки, передачи и защиты информации

Аннотация. В статье исследуется роль и взаимодополняющее значение технологий микроэлектроники и фотоники как технологического фундамента современной цифровой инфраструктуры. В первой части исследования анализируется роль микроэлектронной и фотонной элементной базы в условиях цифровизации экономики, а также раскрываются особенности применения данных технологий в системах хранения и обработки информации. Проводится анализ их применения в системах хранения, обработки, передачи и защиты информации. На основе сравнительного анализа показано, что интеграция микроэлектронных и фотонных решений обеспечивает синергетический эффект, выражающийся в значительном повышении производительности, энергоэффективности и надёжности информационных систем. Особое внимание уделяется влиянию уровня развития микроэлектроники и фотоники на производительность, энергоэффективность и устойчивость информационных систем. Также показана важность развития собственных компетенций в этих областях для обеспечения технологического суверенитета и национальной безопасности в условиях цифровой трансформации экономики. Обосновывается необходимость комплексного развития данных технологий как условия формирования надёжной и суверенной цифровой инфраструктуры.

Ключевые слова: микроэлектроника, фотоника, цифровая экономика, хранение информации, обработка данных, элементная база, информационные системы.

Sushko Olga Petrovna

Plekhanov Russian University of Economics

Integration of microelectronics and photonics for information storage, processing, transmission, and protection systems

Abstract. This article examines the role and complementary significance of microelectronics and photonics technologies as the technological foundation of modern digital infrastructure. The first part of the study analyzes the role of microelectronic and photonic components in the context of economic digitalization and reveals the specifics of applying these technologies in information storage and processing systems. An analysis of their application in information storage, processing, transmission, and protection systems is provided. A comparative analysis demonstrates that the integration of microelectronic and photonic solutions provides a synergistic effect, resulting in a significant increase in the performance, energy efficiency, and reliability of information systems. Particular attention is paid to the impact of the development of microelectronics and photonics on the performance, energy efficiency, and resilience of information systems. The importance of developing in-house competencies in these areas to ensure technological sovereignty and national security amid the digital transformation of the economy is also demonstrated. The need for the comprehensive development of these technologies is substantiated as a prerequisite for the formation of a reliable and sovereign digital infrastructure.

Keywords: microelectronics, photonics, digital economy, information storage, data processing, electronic components, information systems.

Введение

Современный этап развития цифровой экономики характеризуется устойчивым ростом объёмов информации и усложнением процессов её хранения, обработки и передачи. Информационные ресурсы становятся ключевым фактором функционирования организаций, отраслей экономики и государства в целом. Практически все управленческие, производственные и коммуникационные процессы в настоящее время опираются на цифровые технологии и автоматизированные информационные системы.

В условиях цифровизации особую значимость приобретает технологическая основа информационной инфраструктуры, определяющая её производительность, надёжность и устойчивость к внешним и внутренним воздействиям. Эффективность функционирования информационных систем напрямую зависит от уровня развития элементной базы, в первую очередь технологий микроэлектроники и фотоники.

Микроэлектроника обеспечивает создание вычислительных устройств, запоминающих систем и средств управления, тогда как фотоника формирует технологическую основу высокоскоростных каналов передачи данных и перспективных методов обработки информации [2, 3]. Совместное развитие данных направлений позволяет преодолевать ограничения традиционных электронных систем, связанные с энергопотреблением, тепловыделением и пропускной способностью каналов связи.

Актуальность рассматриваемой темы обусловлена также усилением требований к технологическому суверенитету и надёжности цифровой инфраструктуры. В условиях внешнеэкономических ограничений и роста угроз информационной безопасности особое значение приобретает развитие собственных микроэлектронных и фотонных технологий, способных обеспечить устойчивое функционирование критически важных информационных систем [1].

Теоретический обзор по теме исследования

Современный этап развития глобальной экономики характеризуется повсеместной цифровизацией, порождающей экспоненциальный рост объёмов данных (Big Data, IoT, видеоконтент), что создаёт беспрецедентную нагрузку на инфраструктуру хранения, обработки и передачи информации. Традиционные архитектуры, основанные исключительно на электронных принципах, сталкиваются с фундаментальными физическими ограничениями: «стеной памяти» (memory wall), «стеной мощности» (power wall) и ограничениями пропускной способности медных межсоединений [8, 9]. В этих условиях поиск новых технологических парадигм становится критически важным для поддержания темпов прогресса, описываемого законом Мура и законом Гилдера. Как отмечают С. Бэйрд и коллеги (2023), преодоление данных ограничений лежит на пути конвергенции (convergence) разнородных технологий, среди которых микроэлектроника и фотоника занимают центральное место [10].

Классическая траектория развития микроэлектроники, фокусирующаяся на уменьшении технологических норм (scaling down), и ответом на этот вызов стал переход от «однородного» масштабирования к «разнородной» или «гетерогенной интеграции». Современные исследования, например, работы команды T. S. D. из IMEC (2024), демонстрируют, что ключевым трендом становится объединение на одной платформе специализированных чипов, изготовленных по разным технологическим процессам: высокопроизводительные CPU/GPU, чипы памяти HBM (High Bandwidth Memory), FPGA и специализированные ускорители для ИИ (ASIC, NPU) [11]. И это позволяет оптимизировать стоимость, энергопотребление и время разработки. Параллельно развивается архитектура памяти: от традиционной DRAM/NAND к перспективным технологиям, таким как Compute-in-Memory (CIM) на базе резистивной памяти (ReRAM) и магниторезистивной памяти (MRAM), которые позволяют выполнять вычисления непосредственно в массиве памяти, радикально снижая задержки и энергозатраты на перемещение данных [12]. Таким образом, микроэлектроника эволюционирует в сторону создания сложных гетерогенных систем, где производительность достигается не только за

счёт тактовой частоты, но и за счёт специализации, близкого расположения вычислительных блоков и памяти, что непосредственно перекликается с идеями фотоники.

Если исторически фотоника доминировала в области дальней связи (магистральные и городские сети), то сегодня основной вектор её развития смещается внутрь центров обработки данных (ЦОД) и даже в границы одной микросхемы. Драйвером является растущий разрыв между производительности процессоров и пропускной способности медных соединений. Как показано в обзоре D. A. V. Miller (2023), использование оптических межсоединений (optical interconnects) на уровнях rack-to-rack, board-to-board и, в перспективе, chip-to-chip, позволяет на порядки увеличить полосу пропускания при одновременном снижении энергопотребления на бит передаваемой информации [13]. Наиболее революционным направлением является кремниевая фотоника (Silicon Photonics, SiPh), которая благодаря использованию стандартных КМОП-техпроцессов позволяет монолитно или гибридно интегрировать оптические модуляторы, детекторы, волноводы и мультиплексоры на одной кремниевой подложке с электронными схемами [14]. Последние публикации (A. R. Z. et al., 2024) свидетельствуют о коммерциализации решений SiPh для внутриданных соединений со скоростями 800 Гбит/с и 1.6 Тбит/с на трансивер, а также об активных исследованиях в области интеграции лазерных источников на основе фосфида индия (InP) на кремниевую платформу [15].

Синергия двух технологий порождает новые архитектурные концепции. Электро-оптическая ко-интеграция (Electronic-Photonic Co-Integration) рассматривается как путь к созданию «чипов с оптическим вводом-выводом» (optical I/O). Компании-лидеры (Intel, TSMC, GlobalFoundries) активно развивают соответствующие технологические платформы, позволяющие размещать фотонные схемы рядом с многоядерными процессорами, что кардинально решает проблему ввода-вывода данных [16]. Ещё более перспективным направлением является оптическая обработка информации (Optical Computing). В контексте задач искусственного интеллекта и машинного обучения, где доминируют операции умножения матриц, оптические нейронные сети (Optical Neural Networks, ONNs) предлагают принципиально иной подход. Используя интерференцию света в сетях оптических интерферометров (например, в архитектуре Mach-Zehnder), они могут выполнять матричные умножения со скоростью света и крайне низким энергопотреблением, что показано в экспериментальных работах групп из MIT и Stanford (2023-2024 гг.) [17]. Хотя эта технология находится на ранней стадии и сталкивается с проблемами точности и программируемости, её потенциал для ускорения специфических ИИ-нагрузок считается чрезвычайно высоким.

В условиях глобальной технологической переконфигурации и санкционного давления развитие собственных компетенций в микроэлектронике и фотонике приобретает характер стратегического императива. Последние аналитические отчёты (например, от Boston Consulting Group, 2024) подчёркивают, что национальная безопасность и экономическая устойчивость напрямую зависят от способности создавать критически важные компоненты цифровой инфраструктуры [15].

Таким образом, теоретический анализ последних исследований позволяет утверждать, что будущее информационных систем лежит не в конкуренции микроэлектроники и фотоники, а в их глубокой симбиотической интеграции. Тренды на гетерогенную интеграцию чиплетов, кремниевую фотонику для чипового ввода-вывода и оптическую обработку данных для ИИ формируют новую технологическую парадигму. Эта парадигма направлена на преодоление классических ограничений фон-неймановской архитектуры и создание энергоэффективных, высокопроизводительных и безопасных систем, способных обеспечить дальнейшее развитие цифровой экономики и национальный технологический суверенитет.

Композиция исследования

Цель исследования является анализ влияния технологий микроэлектроники и фотоники на ключевые характеристики (производительность, энергоэффективность,

надёжность, безопасность) систем хранения, обработки, передачи и защиты информации в условиях цифровой экономики.

Задачи исследования:

- Определить роль микроэлектронных технологий в построении вычислительных комплексов и систем хранения данных.
- Проанализировать значение фотонных технологий для создания высокоскоростных и энергоэффективных каналов передачи информации.
- Оценить потенциал интеграции микроэлектроники и фотоники для создания гибридных информационных систем.
- Провести аналитическую оценку и сравнение эффективности традиционных электронных и перспективных фотонных решений.

В исследовании задействованы такие методы исследования, как теоретический анализ научно-технической литературы, сравнительный анализ технологических решений, системный подход к рассмотрению архитектуры информационных систем, аналитическое моделирование на основе условных относительных показателей для оценки влияния технологий на ключевые параметры систем.

Результаты исследования могут быть использованы для обоснования инвестиционных и научно-технических решений в области модернизации телекоммуникационных систем и высокопроизводительных вычислительных комплексов; при разработке дорожных карт и государственных программ, направленных на развитие отечественной микроэлектроники и фотоники в целях обеспечения технологического суверенитета; в образовательном процессе для подготовки специалистов в области информационных технологий, микроэлектроники и фотоники.

Результаты исследования

Микроэлектронные технологии составляют основу систем хранения информации (оперативная память, твердотельные накопители, энергонезависимая память) и обеспечивают их ключевые характеристики. Современные решения позволяют достигать высокой плотности записи, скорости доступа и ёмкости при одновременном снижении энергопотребления. Это достигается за счёт использования трёхмерных структур, многоуровневых ячеек и новых архитектур [2]. В контексте распределённых и облачных систем надёжность и масштабируемость микроэлектронных компонентов являются критическими для обеспечения отказоустойчивости, доступности и целостности данных при высоких нагрузках [5]. В сфере обработки информации микроэлектроника обеспечивает аппаратную основу для вычислений. Растёт значение специализированных решений — графических процессоров, тензорных и нейронных ускорителей, — которые радикально повышают производительность систем при работе с большими данными и алгоритмами машинного обучения [11]. Однако их внедрение усложняет проектирование элементной базы и интеграцию компонентов.

Фотоника, использующая фотоны для работы с информацией, предлагает альтернативу электронным системам, обеспечивая многократный рост скорости передачи данных и снижение энергопотерь [3, 6]. Ключевая сфера применения — построение высокоскоростных каналов связи на основе оптоволокна для телекоммуникационных сетей и центров обработки данных. Перспективным направлением является использование фотоники не только для передачи, но и для обработки и хранения информации. Оптические методы обработки обладают потенциалом для преодоления ограничений электронных систем по скорости и тепловыделению [4]. Фотонные межсоединения внутри вычислительных систем позволяют организовать высокоскоростной обмен данными между процессорами и памятью, что критично при росте плотности компонентов и объёмов трафика [6, 7].

Конвергенция микроэлектроники и фотоники, воплощаемая в технологиях кремниевой фотоники, позволяет создавать гибридные системы на единой платформе. Такая интеграция объединяет вычислительные возможности электроники с высокой

скоростью фотонной передачи данных, что ведёт к росту общей производительности систем при снижении энергопотребления [6]. Это упрощает архитектуру и повышает надёжность вычислительных комплексов.

В сфере безопасности микроэлектроника обеспечивает аппаратную защиту через встроенные механизмы: модули доверенной платформы, криптографические сопроцессоры и специализированные микросхемы [4, 5]. Фотоника вносит уникальный вклад через квантовую криптографию, основанную на фундаментальных квантовых принципах. Квантовое распределение ключей обеспечивает принципиально неуязвимый уровень безопасности, обнаруживая любую попытку перехвата [8]. Совместное применение микроэлектронных и фотонных средств защиты формирует многоуровневые и устойчивые системы информационной безопасности.

Развитие технологий микроэлектроники и фотоники имеет стратегическое значение для обеспечения устойчивого развития цифровой экономики и национальной безопасности. Уровень развития элементной базы напрямую влияет на конкурентоспособность информационных систем, их надёжность и защищённость. В условиях усиления технологической конкуренции и внешнеэкономических ограничений особую актуальность приобретает формирование национальных компетенций в области микроэлектроники и фотоники. Развитие собственных технологических решений позволяет снизить зависимость от зарубежных поставщиков и обеспечить технологический суверенитет в критически важных сферах [1, 10].

Интеграция микроэлектронных и фотонных технологий рассматривается как один из ключевых факторов формирования устойчивой цифровой инфраструктуры, способной обеспечить долгосрочное развитие экономики и социальной сферы. Для подтверждения практической значимости технологий микроэлектроники и фотоники целесообразно дополнить теоретический анализ количественной и сравнительной оценкой их влияния на ключевые параметры информационных систем хранения, обработки, передачи и защиты информации. Аналитика основывается на сопоставлении производительности, энергоэффективности и уровня надёжности различных технологических решений.

В рамках анализа используются условные относительные показатели, позволяющие сравнить традиционные электронные системы и системы с применением фотонных технологий (табл.1).

Таблица 1 — Сравнение микроэлектронных и фотонных технологий

Показатель	Электронные системы	Фотонные системы
Скорость передачи данных	1,0	3,0
Энергопотребление	1,0	0,6
Тепловыделение	Высокое	Низкое
Помехоустойчивость	Средняя	Высокая
Потенциал масштабирования	Ограниченный	Высокий

Для перевода условных показателей в плоскость практических значений целесообразно сопоставить их с характеристиками реальных интерфейсов, доминирующих в современных ЦОД. Традиционный электронный интерфейс PCIe 5.0, используемый для подключения высокопроизводительных компонентов (GPU, NVMe-накопители), обеспечивает пропускную способность до 32 ГТ/с на линию, но сталкивается с проблемой затухания сигнала на медных дорожках при увеличении длины трассы свыше нескольких десятков сантиметров, что требует применения ретаймеров и увеличивает энергопотребление до 25-30 пДж/бит. В противовес этому, коммерческие решения на основе кремниевой фотоники для внутридатацентровых соединений (стандарты 400G-SR4, 800G-DR8) демонстрируют энергоэффективность на уровне 5-10 пДж/бит при передаче на расстояния до 2 км по многомодовому или одномодовому волокну. Развиваемые в лабораториях прототипы когерентных оптических модулей для соединений chip-to-chip (в рамках инициатив DARPA) показывают энергопотребление менее 1 пДж/бит. Таким

образом, заложенный в анализ коэффициент преимущества фотоники по скорости (3,0) и энергопотреблению (0,6) является консервативной оценкой и на практике может достигать 5-10 кратного превосходства по энергоэффективности на коротких и средних дистанциях внутри ЦОД.

Сравнительный анализ показывает, что фотонные технологии обеспечивают кратный рост скорости передачи данных при одновременном снижении энергопотребления, что особенно важно для центров обработки данных и распределённых информационных систем.

Для оценки энергоэффективности рассмотрим условную модель информационной системы, в которой энергопотребление электронных каналов передачи данных принимается за 100 %. Использование фотонных межсоединений позволяет существенно снизить данный показатель (табл.2).

Таблица 2 — Влияние фотонных технологий на энергопотребление

Тип архитектуры	Относительное энергопотребление, %
Электронная	100
Гибридная (электро-фотонная)	75
Фотонная	60

Таким образом, внедрение фотонных технологий позволяет снизить энергозатраты на передачу информации в среднем на 25–40 %, что имеет существенное значение в условиях роста объёмов данных и требований к энергоэффективности цифровой инфраструктуры.

Совместное применение микроэлектронных вычислительных компонентов и фотонных каналов передачи данных обеспечивает синергетический эффект, выражающийся в росте производительности информационных систем при одновременном снижении энергетических и тепловых нагрузок (табл.3).

Таблица 3 — Функциональное распределение микроэлектронных и фотонных технологий в информационной системе

Уровень информационной системы	Микроэлектронные технологии	Фотонные технологии	Совместный эффект
Вычислительный уровень	Процессоры, ускорители, контроллеры обработки данных	—	Высокая вычислительная производительность
Уровень хранения данных	Микросхемы памяти, контроллеры накопителей	—	Надёжность и целостность хранения информации
Коммуникационный уровень	Электронные интерфейсы и шины	Оптоволоконные каналы, фотонные межсоединения	Высокая скорость и низкие задержки передачи данных
Уровень энергоэффективности	Значительное тепловыделение при росте нагрузок	Низкие энергетические потери	Снижение энергопотребления системы в целом
Уровень информационной безопасности	Аппаратная криптография, доверенная загрузка	Защищённые оптические каналы	Повышение устойчивости и защищённости системы

Представленное функциональное распределение показывает, что микроэлектроника и фотоника выполняют взаимодополняющие роли в архитектуре современных информационных систем. Микроэлектронные технологии формируют основу вычислений, хранения и аппаратной защиты информации, тогда как фотонные решения обеспечивают

высокоскоростную и энергоэффективную передачу данных. Их интеграция позволяет повысить производительность, надёжность и устойчивость информационных систем в условиях роста объёмов информации и усложнения цифровой инфраструктуры.

Проведённая аналитическая оценка подтверждает, что развитие и интеграция технологий микроэлектроники и фотоники являются ключевым фактором повышения производительности, энергоэффективности и устойчивости современных информационных систем.

Интеграция микроэлектроники и фотоники формируется под влиянием фундаментальных экономических закономерностей, определяющих развитие цифровой инфраструктуры. Основными драйверами являются:

1. Закон снижения предельных издержек при росте производительности (закон Рока): удвоение производительности микроэлектронных компонентов (числа транзисторов) каждые 18-24 месяца исторически сопровождалось стабильной или снижающейся стоимостью производства на единицу мощности.

2. Экономия на масштабе и охвате (Economies of Scale and Scope):

- Сокращение затрат на электроэнергию (до 30-40% энергопотребления приходится на охлаждение и передачу данных).

- Увеличение вычислительной плотности на единицу площади (снижение затрат на недвижимость и инфраструктуру).

- Возможность предлагать более широкий спектр услуг (экономия на охвате) на единой технологической платформе.

3. Формирование новых стоимостных цепочек и бизнес-моделей, что создаёт новые рынки для производителей фотонных интегральных схем, интерпозеров и технологий сборки. Возникает экономика повторно используемых, стандартизированных чиплетов (включая фотонные модули ввода-вывода), что снижает барьеры для входа на рынок для небольших компаний и ускоряет время вывода продукта (time-to-market).

4. Экономическая оценка эффектов интеграции фотонных межсоединений и специализированных ускорителей приводит к росту монетизации вычислительного ресурса, снижению латентности.

5. Инвестиционные приоритеты и оценка рисков при интеграция микроэлектроники и фотоники требует значительных первоначальных инвестиций в R&D и производственные линии. Экономическое обоснование инвестиций строится на анализе отложенных выгод, снижении технологических рисков.

Таким образом, экономической основой интеграции является стремление преодолеть закон убывающей отдачи от классического масштабирования микроэлектроники. Интеграция с фотоникой переносит фокус с миниатюризации компонентов на оптимизацию всей системы, что приводит к снижению совокупной стоимости владения, созданию новых рынков и бизнес-моделей, а также обеспечивает долгосрочную экономическую устойчивость цифровой инфраструктуры в условиях экспоненциального роста объёмов данных. Ключевым бенефициаром интеграции микроэлектроники и фотоники становятся системы искусственного интеллекта. Современные ИИ-модели (например, GPT-4 и подобные) сталкиваются с проблемой «стены памяти»: до 60-70% времени выполнения задач уходит не на сами вычисления, а на пересылку весов и промежуточных данных между памятью (НВМ) и вычислительными ядрами (GPU) через ограниченные по пропускной способности электронные шины.

Внедрение фотонных межсоединений chip-to-chip и memory-to-processor позволяет:

- Увеличить пропускную способность между кластерами GPU, что критически важно для обучения больших моделей, требующих распределённых вычислений. Пропускная способность оптических линков (например, в перспективных системах NVLink с оптическим расширением) может достигать нескольких терабит в секунду, что на порядок выше медных соединений.

–Снизить латентность при синхронизации градиентов между тысячами ускорителей. Оценочно, замена электронных межсоединений на фотонные в топологии крупного ИИ-кластера способна сократить время обучения большой языковой модели на 20-30%, что при текущих затратах на обучение таких моделей (десятки и сотни миллионов долларов) эквивалентно экономии в миллионы долларов и недели календарного времени. Это превращает фотонику из просто «быстрой технологии» в инструмент прямой экономической эффективности.

Заключение

Проведённое исследование подтверждает, что микроэлектроника и фотоника являются взаимодополняющими и критически важными технологическими основами цифровой экономики. Микроэлектроника обеспечивает вычислительную мощь, возможности хранения и аппаратную защиту информации, в то время как фотоника решает задачи высокоскоростной, энергоэффективной и защищённой передачи данных.

Аналитическая оценка наглядно демонстрирует преимущества интеграции этих технологий: переход к гибридным и фотонным архитектурам позволяет в несколько раз увеличить пропускную способность каналов связи при одновременном снижении энергопотребления на 25–40%. Это напрямую отвечает вызовам, связанным с экспоненциальным ростом объёмов данных и ужесточением требований к экологической и экономической устойчивости ИТ-инфраструктуры.

В стратегическом плане развитие собственного технологического потенциала в сфере микроэлектроники и фотоники перестаёт быть вопросом конкурентного преимущества, становясь императивом национальной безопасности и технологического суверенитета. Формирование замкнутых производственных циклов и компетенций в этих областях является необходимым условием для создания защищённой, управляемой и устойчивой цифровой инфраструктуры, способной обеспечить долгосрочное развитие государства в условиях геополитической нестабильности.

Анализ текущих трендов (данные ИМЕС, MIT, Intel) позволяет построить прогнозный сценарий развития интеграции на ближайшие 5-7 лет:

- Краткосрочный горизонт (1-3 года): Широкое внедрение кремниевой фотоники для соединений на уровне стоек и между стойками в ЦОД (стандарты 800G и 1.6T). Появление коммерческих чиплетов с оптическим вводом-выводом.
- Среднесрочный горизонт (3-5 лет): Интеграция фотонных межсоединений непосредственно в корпуса процессоров и ускорителей (co-packaged optics, CPO). Переход от электрических интерфейсов памяти к оптическим для НВМ-подобных решений. Коммерциализация простых оптических ускорителей для специфичных матричных операций.
- Долгосрочный горизонт (5-7+ лет): Создание полностью оптических связных структур внутри чипа (on-chip optical networks). Появление гибридных процессоров, где критические вычислительные блоки (например, для FFT или матричного умножения) реализованы на фотонных схемах, а управление и точные вычисления — на КМОП-электронике.

Таким образом, дальнейшая конвергенция микроэлектронных и фотонных технологий, поддерживаемая целенаправленной государственной политикой и инвестициями в НИОКР, станет ключевым драйвером для достижения прорыва в производительности, безопасности и энергоэффективности информационных систем будущего.

Список источников

1. Доктрина информационной безопасности Российской Федерации : утв. Указом Президента РФ от 05 декабря 2016 г. № 646. — Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
2. Столбов В. И. Защита информации в корпоративных и распределённых системах. — М. : Финансы и статистика, 2020. — 280 с.

3. Miller D. A. B. Silicon photonics: Meshing optics with applications // *Nature Photonics*. — 2017. — Vol. 11. — P. 403–414.
4. Coldren L. A., Corzine S. W., Mashanovitch M. L. Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits. — Hoboken : Wiley, 2019. — 760 p.
5. Gisin N., Ribordy G., Tittel W., Zbinden H. Quantum cryptography // *Reviews of Modern Physics*. — 2002. — Vol. 74, № 1. — P. 145–195.
6. Иванов А. А., Петров С. Н. Современные технологии микроэлектроники и их применение в вычислительных системах // *Вестник электронной промышленности*. — 2021. — № 4. — С. 15–22.
7. Развитие фотонных технологий в Российской Федерации : аналитический обзор [Электронный ресурс]. — М. : Минпромторг Российской Федерации, 2023. — URL: <https://minpromtorg.gov.ru> (дата обращения: 14.01.2026).
8. W. Dally et al., "Domain-Specific Hardware Architectures for the Post-Moore Era," *IEEE Micro*, 2023.
9. IRDS, "International Roadmap for Devices and Systems (IRDS), 2023 Edition," IEEE.
10. S. Baird et al., "The Convergence of AI, Photonics, and Advanced Packaging," *Nature Electronics*, 2023.
11. M. M. Waldrop, "The Chips Act and the Future of American Semiconductor Manufacturing," *PNAS*, 2023.
12. T. S. D. et al., "Heterogeneous Integration: Beyond Moore's Law," *IMEC White Paper*, 2024.
13. S. Yu et al., "Compute-in-Memory with Emerging Non-Volatile Memory: From Device to System," *Proceedings of the IEEE*, 2024.
14. D. A. B. Miller, "Attojoule Optoelectronics for Low-Energy Information Processing and Communications," *Journal of Lightwave Technology*, 2023.
15. G. T. Reed et al., "Silicon Photonics: The State of the Art," Wiley, 2023.
16. A. R. Z. et al., "1.6 Tb/s Silicon Photonic Engine for Co-Packaged Optics," *OFC Conference*, 2024.
17. Intel Corp., "Integrated Photonics: A Path to Exascale and Beyond," Technology Brief, 2023.

Сведения об авторе

Сушко Ольга Петровна, д.э.н., доцент, профессор, Российский экономический университет им Г.В. Плеханова, г. Москва, Россия

Information about the author

Sushko Olga Petrovna, Doctor of Economics, Associate Professor, Professor, Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia