

## ПЛАНИРОВАНИЕ СЛЕДУЮЩЕГО ПОКОЛЕНИЯ КРЕМНИЕВОЙ ФОТОНИКИ

Ананьев Р.О.

*ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,  
Москва, e-mail: 2005roma.roman@mail.ru*

Работа посвящена исследованию достижений и перспектив развития кремниевой фотоники, а также ее роли в интеграции оптических и электронных технологий для создания высокоскоростных и энергоэффективных систем. Цель статьи заключается в анализе текущего состояния кремниевой фотоники, ее возможных применений и роли в решении задач передачи данных, а также в интеграции с микроэлектронными схемами для улучшения характеристик обработки информации. В статье рассмотрены основные компоненты кремниевой фотоники, такие как модуляторы, лазеры, фотодетекторы и усилители, а также методы их интеграции в фотонные интегральные схемы. Обсуждается, как кремниевая фотоника может улучшить существующие системы передачи данных за счет низкой потери сигнала на больших расстояниях, а также за счет использования многоканальных и гибких архитектур. В работе описаны результаты применения этих технологий в системах связи, сенсорах и квантовых вычислениях. В основе исследования лежит изучение научных публикаций, посвященных тематике кремниевой фотоники. В работе применяются ключевые методологические подходы, включающие анализ достижений в данной области и сопоставление эффективности различных систем. В заключение подчеркивается важность дальнейшего развития кремниевой фотоники для решения задач масштабируемости и улучшения производительности в различных областях, включая информационные технологии и научные исследования.

**Ключевые слова:** кремниевая фотоника, интегральные фотонные схемы, электронные интегральные схемы, модуляторы, усилители, детекторы

## ROADMAPPING THE NEXT GENERATION OF SILICON PHOTONICS

Ananayev R.O.

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, e-mail: 2005roma.roman@mail.ru*

The work is devoted to the study of the achievements and prospects of silicon photonics, as well as its role in the integration of optical and electronic technologies for the creation of high-speed and energy-efficient systems. The aim of the article is to analyze the current state of silicon photonics, its potential applications, and its role in addressing data transmission challenges, as well as its integration with microelectronic circuits to enhance information processing capabilities. The article examines the main components of silicon photonics, such as modulators, lasers, photodetectors, and amplifiers, as well as methods for their integration into photonic integrated circuits. It discusses how silicon photonics can improve existing data transmission systems through reduced signal loss over long distances and the use of multichannel and flexible architectures. The study highlights the results of applying these technologies in communication systems, sensors, and quantum computing. The research is based on the analysis of scientific publications on the subject of silicon photonics. Key methodological approaches employed in the work include the analysis of advancements in this field and the comparison of the efficiency of various systems. The conclusion emphasizes the importance of further development of silicon photonics to address scalability and performance challenges in various fields, including information technology and scientific research.

**Keywords:** silicon photonics, photonic integrated circuits, electronic integrated circuits, modulators, amplifiers, detectors

### Введение

Кремниевая фотоника развилась в основную технологию, движимую достижениями в области оптических коммуникаций. Текущая генерация привела к массовому распространению интегрированных фотонных устройств от тысяч до миллионов, в основном в виде трансиверов для передачи данных в центрах обработки данных. Продукты для множества захватывающих приложений, таких как сенсоры и вычисления, уже на горизонте [1]. Что нужно, чтобы увеличить распространение кремниевой фотоники с миллионов до миллиардов произведенных устройств? Как будет выглядеть следующая генерация кремниевой фотони-

ки? Какие общие проблемы в интеграции и производственных узких местах стоят перед приложениями кремниевой фотоники и какие новые технологии могут их решить? В статье прослеживаются тенденции развития технологии кремниевой фотоники, проводятся параллели с поколенческими определениями технологии элементарной структуры металл-оксид-полупроводника (КМОП). Выделяются ключевые проблемы, которые необходимо решить, чтобы сделать гигантские шаги в создании устройств, схем, интеграции и упаковки, совместимых с КМОП-производствами. Также определяются проблемы, критические для следующего поколения систем и прило-

жений – в области связи, обработки сигналов и сенсорики. Выявляя и обобщая такие проблемы и возможности, можно стимулировать дальнейшие исследования в области устройств, схем и систем для экосистемы кремниевой фотоники.

**Целью исследования** является определение вызовов, критически важных для следующего поколения систем и приложений в области коммуникаций, обработки сигналов и сенсирования, исследование тенденций в развитии технологий кремниевой фотоники, а также выявление ключевых проблем, решение которых необходимо для достижения значительных успехов в создании совместимых с КМОП устройств, схем.

#### **Материалы и методы исследования**

Исследование выполнено на основе библиографического поиска и детального изучения научных публикаций, посвященных кремниевой фотонике и интеграции оптических и электронных технологий. В работе использованы материалы, доступные в открытых интернет-источниках, а также данные из научных баз РИНЦ, Web of Science и Scopus. В качестве ключевых методологических подходов применены анализ достижений и динамики развития в данной области, а также сравнительный анализ эффективности различных систем.

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

На протяжении поколений разработки процессов КМОП к кремнию добавлялись различные материалы для снижения энергопотребления, улучшения производительности и уменьшения площади. К добавленным материалам относятся Al и Cu для металлических проводников, Ge для создания напряжений и реализации гетеропереходных биполярных транзисторов, а также нитрид кремния (SiN) для пассивации и диффузионных барьеров. Помимо r/n легирования для высокоскоростной модуляции, высокоскоростные фотодетекторы на основе Ge и SiN позволяют использовать более высокую оптическую мощность и поддерживает волноводы с меньшими потерями и лучшим фазовым контролем в интерферометрических устройствах.

Для радиочастотных (РЧ) устройств расстояния между активными элементами – которые имеют критические размеры в микронах – часто составляют сотни микрон, чтобы избежать РЧ-помех. Сокращение этих “пустых пространств” требует очень детального системного моделирования и многопараметрического моделирования, что будет в центре внимания для соз-

дания более компактных, дешевых и высокоплотных чипов. Пассивные компоненты в целом ограничены в сокращении размера контрастом показателя преломления и рабочей длиной волны в 1–2 мкм. Волновод не может значительно уменьшиться ниже ширины 400–500 нм. Тем не менее значительное масштабирование все еще возможно в оптических и высокоскоростных модуляторах. Техники упаковки с пассивной настройкой, такие как фотонная проволочная сварка (ФПС) [2], предлагают альтернативу. С помощью компьютерного зрения и автоматизации ФПС могут быть изготовлены в полимерной фотопленке через двухфотонное поглощение между двумя соединительными точками, что позволяет смещения до 30 мкм. Применяются простые маркеры для выравнивания соединительных точек, и они не требуют строгих расстояний или больших площадей, что обеспечивает пассивное выравнивание, низкие потери и масштабируемое количество портов.

Часто используемый показатель эффективности модуляторов на основе волноводов – это  $\alpha V\pi L$ . Для микрорезонаторных модуляторов (МРМ), которые являются очень компактными, потери становятся менее критичными [3]. Потребляемая мощность драйвера зависит от импеданса модулятора, который воспринимается драйвером. Резистивный импеданс потребляет статическую динамическую мощность, в то время как высокий импеданс потребляет в основном динамическую мощность. Электроабсорбционные модуляторы (ЭАМ) на основе GeSi, использующие эффект Франца – Келдыша, могут работать в С-диапазоне и L-диапазоне. Однако они не являются оптически широкополосными, так как используют модуляцию на краю зоны для абсорбции. Фазовращатели для настройки и переключения. Многие фотонные приложения требуют фазовращателей, которые потребляют мало или совсем не потребляют энергии и имеют низкий показатель  $\alpha V\pi L$  для конфигурации, настройки и переключения. Для некоторых приложений эти фазовращатели должны быть быстрыми, но полоса пропускания Е/О в десятки ГГц не требуется. В то время как в большинстве схем свет проходит только через один высокоскоростной модулятор, ему приходится проходить через множество низкоскоростных фазовращателей для настройки и переключения, что увеличивает общие потери мощности и  $\alpha V\pi L$ . Улучшение тепловой изоляции позволяет снизить энергопотребление более чем в 10 раз, но за счет еще большего увеличения времени отклика. Возможен даже >100-крат-

ный прирост за счет удлинения волноводов для увеличения взаимодействия с металлическими нагревателями, но это ведет к увеличению потерь.

Кремний с его косвенной зонной структурой не может эффективно генерировать оптическое усиление, необходимое для создания лазера на кремниевой фотонной интегральной схеме (ФТС). Это ограничение требует использования альтернативных материалов или методов для введения источников света на кремниевом чипе, и за последние десятилетия были разработаны различные решения. Традиционный подход предполагает соединение лазера и изолятора с помощью волокна. Однако более масштабируемые решения интегрируют материалы с усилением на основе III–V полупроводников с ФТС без необходимости использования волокон. Если лазер не переносит отражений, все равно требуется изолятор. Внешние изоляторы хорошо работают, но они громоздкие и усложняют упаковку, увеличивая стоимость. Часто удается спроектировать чипы и упаковки таким образом, чтобы обратные отражения не являлись проблемой: высокие потери в пути передачи обеспечивают барьер между внешней средой и источником света [4]. Альтернативные подходы, направленные на устранение необходимости в громоздких изоляторах, включают тщательное проектирование фотонных компонентов для уменьшения отражений до приемлемого уровня, использование активных лазеров с малым коэффициентом усиления линии, монолитную интеграцию магнитно-оптических материалов, модуляторы пространственно-временного домена или активные схемы компенсации отражений. Гибридная интеграция представляет собой практическое решение, при котором несколько чипов из различных материалов объединяются в один пакет. Технология 2.5D интеграции, которая стала коммерчески успешной, использует лазеры, известные своей высокой производительностью, которые упаковываются вместе с кремниевой фотонной микросхемой с использованием эпоксидного клея, линз и изоляторов. Другие 2.5D техники включают в себя использование торцевого сопряжения [5] или фотонной проволоочной связи [6] для ослабления требований к выравниванию. Гибридные технологии 3D позволяют уменьшить размер сборки, хотя и требуют высокой точности размещения и соединения. Монолитная интеграция с использованием прямого роста эпитаксиального материала на кремниевой пластине, особенно квантово-точечных лазеров, является долгосрочной целью. Квантовые

точки обеспечивают низкую ширину линии и меньшую чувствительность к отражениям. Эта техника также может уменьшить пороговую плотность тока и устранить потребность в подложках из материалов III–V.

Многие приложения кремниевой фотоники требуют задержек длительностью от сотен пикосекунд до наносекунд. Примеры включают микроволновую фотонику, оптические фазовые петли (ОФП), частотные дискриминаторы, схемы уменьшения ширины спектра лазера, оптические фазированные антенны (ОФА), оптическую когерентную томографию (ОКТ) и гироскопы. Многие из этих приложений также требуют настройки с точностью до десятков пикосекунд и широкополосной работы [7].

Использование неглубоко вытравленных волноводов или ультратонких волноводов, которые могли бы решить некоторые из этих проблем, часто несовместимо со стандартными технологическими процессами с толщиной 220 нм. Это делает модификацию производственных процессов без ухудшения характеристик других фотонных компонентов сложной задачей [8].

Для улучшения энергоэффективности IMDD трансиверов и масштабирования на более высокие скорости передачи данных необходимо улучшение  $-3$  дБ Е/О ширины полосы пропускания до 100 ГГц. Улучшение эффективности использования энергии (ЭИЭ) лазеров критически важно для большинства приложений, особенно для связи и вычислений. Также необходимы эффективные многоволновые источники света с достаточной мощностью в каждом диапазоне длины волны. Фотодиоды с низким уровнем шума и большой полосой усиления в диапазонах О/Л/С могут улучшить отношение сигнал/шум без значительного увеличения потребления мощности, но исторически их полоса пропускания, линейность, шум и характеристики обработки мощности препятствовали их использованию на самых высоких частотах. Усиление сигналов ФД с использованием высокоэффективных и низкошумных трансимпедансных усилителей (НТУ) остается важной задачей.

Фотонные спектрометры для биосенсоров часто требуют рабочей длины волны, несовместимой с С/Л/О диапазонами. Это становится самым значительным узким местом, так как необходимо разрабатывать, тестировать и характеризовать новые волноводы и другие фотонные компоненты. Лазеры также являются проблемой, и необходимость широкой настройки длины волны или многоволновых лазеров на этих нестандартных длинах волн представляет собой серьезные трудности. Наконец, ста-

бильность и воспроизводимость измерений имеют решающее значение для биосенсоров, и производительность фотонных интегральных схем (ФИС) и лазера должна поддерживаться, несмотря на изменения окружающей среды.

### Заключение

Можно предположить, что в следующем десятилетии можно будет наблюдать достижение следующих этапов:

– Интегрированные лазеры и полупроводниковые оптические усилители на кремниевой фотонике начнут развиваться. Будут поддерживаться как мнговолновые, так и настраиваемые лазеры.

– Дизайн, моделирование, симуляция, бесфабричное производство, упаковка и тестирование экосистемы начнут развиваться, привлекая новую группу инженеров и увеличивая доступность. Более короткие сроки изготовления будут способствовать ускорению НИОКР.

– Множество слоев SiN и Si будут поддерживаться в коммерческих фабриках, и высокоэффективные пассивные компоненты будут оптимизированы для этих слоев SiN.

– Ожидается, что тенденция развития методов инверсного дизайна приведет к созданию более компактных, высокоэффективных и надежных волноводных блоков, которые станут ключевыми компонентами для разработки технологических процессов. Эти же подходы будут способствовать повышению характеристик метаматериалов и метаповерхностей. Улучшение полосы пропускания и уменьшение площади, занимаемой связью между оптоволоконном и фотонно-интегральными схемами (ФИС), продолжится.

Активность в этой области возрастет, что сделает технологии кремниевой фотоники доступными для более широкой аудитории. Интеграция потоков проектирования фотонных схем в среду автоматизации

проектирования электроники уже началась, и по мере того, как схемы становятся более сложными, совместный дизайн фотоники и электроники станет все более важным. Сочетание масштабирования фотонных схем с их интеграцией в электронные системы повысит их программируемость и возможность конфигурирования. Это упростит разработку новых систем, использующих свойства света для реализации инновационных приложений.

### Список литературы

1. Shekhar S., Bogaerts W., Chrostowski L., Bowers J.E., Hochberg M., Soref R., Shastri B.J. Roadmapping the Next Generation of Silicon Photonics // *Nature Communications*. 2024. Vol. 15, Is. 1. P. 751. DOI: 10.1038/s41467-024-44750-0.
2. Blaicher M., Billah M.R., Kemal J., Hoose T., Marin-Palomo P., Hofmann A., Kutuvantavida Y., Kieninger C., Dietrich P., Lauermann M., Wolf S., Troppenz U., Moehrl M., Merget F., Skacel S., Witzens J., Randel S., Koos W. Hybrid multi-chip assembly of optical communication engines by in situ 3D nano-lithography // *Light: Science & Applications*. 2020. Vol. 9, Is. 71. P. 1–11. DOI: 10.1038/s41377-020-0272-5.
3. Sun J., Kumar R., Sakib M., Driscoll J., Jayatilika H., Rong H. A 128 Gb/s PAM4 silicon microring modulator with integrated thermo-optic resonance tuning // *Journal of Lightwave Technology*. 2019. Vol. 37, Is. 1. P. 110–115. DOI: 10.1109/JLT.2018.2878327.
4. Ананьев Р.О. Гидрогели для активной фотоники // *Научное обозрение. Технические науки*. 2024. № 4. С. 5–8. DOI: 10.17513/srts.1476.
5. Jin W., Yang Q., Chang L., Shen B., Wang H., Mark A., Wu L., Gao M., Feshali A., Paniccia M., Vahala K. Hertz-line-width semiconductor lasers using CMOS-ready ultra-high-Q microresonators // *Nature Photonics*. 2021. Vol. 15, Is. 1. P. 346–353. DOI: 10.1038/s41566-021-00761-7.
6. Billah M.R., Blaicher M., Hoose T., Dietrich P., Marin-Palomo P., Lindenmann N., Nestic A., Hofmann A., Troppenz U., Moehrl M., Randel S., Freude W., Koos C. Hybrid integration of silicon photonics circuits and InP lasers by photonic wire bonding // *Optica*. 2018. Vol. 5, Is. 7. P. 876–883. DOI: 10.1364/OPTICA.5.000876.
7. Ji X., Yao X., Gan Y., Mohanty A., Tadayon M.A., Hendon C.P., Lipson M. On-chip tunable photonic delay line // *APL Photonics*. 2019. Vol. 4, Is. 9. P. 1–8. DOI: 10.1063/1.5111164.
8. Xiang C., Jin W., Terra O., Dong B., Wang H., Wu L., Guo J., Morin T.J., Hughes E., Peters J., Ji Q., Feshali A., Paniccia M., Vahala K.J., Bowers J.E. 3D integration enables ultralow-noise isolator-free lasers in silicon photonics // *Nature*. 2023. Vol. 620, Is. 1. P. 78–85. DOI: 10.1038/s41586-023-06251-w.