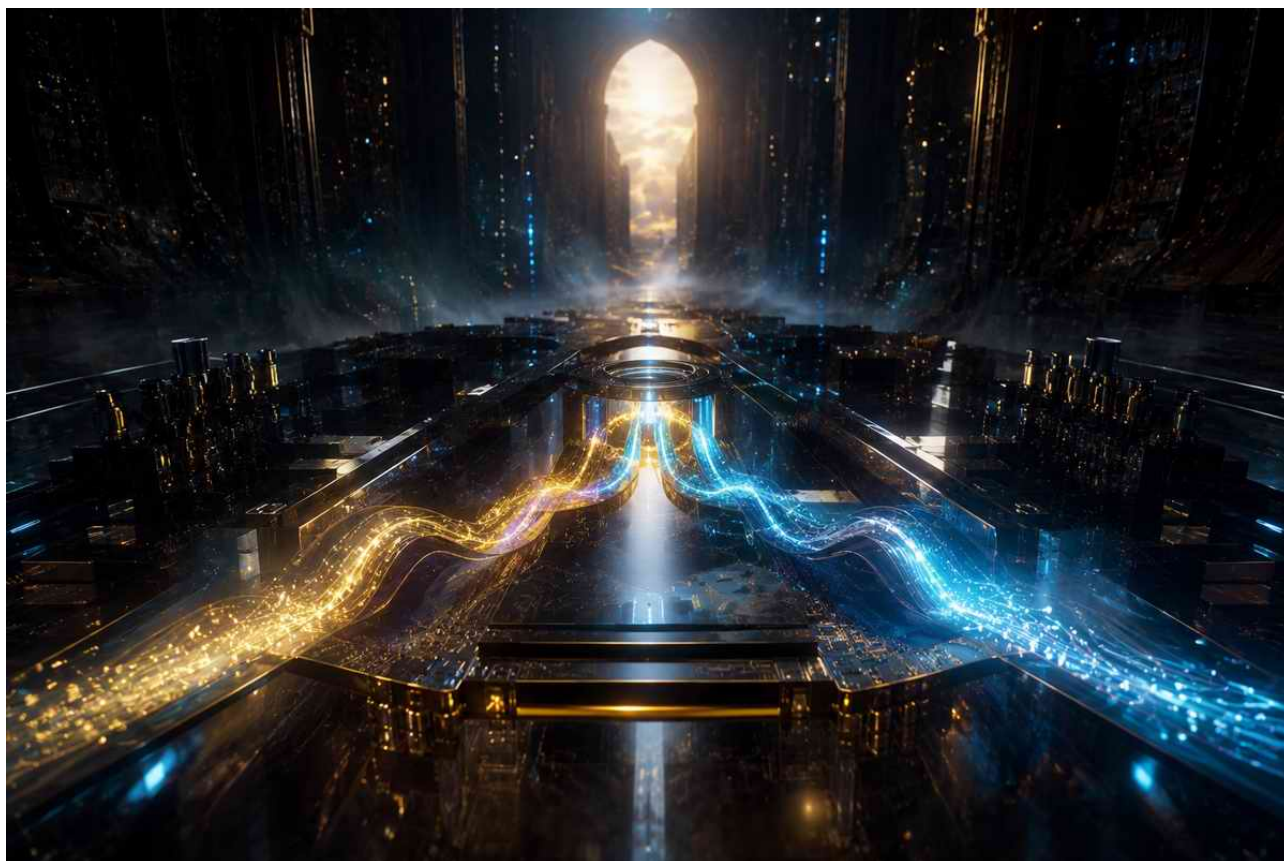


Ученые научились замедлять свет по команде: создан фотонный чип нового поколения для ИИ и сверхбыстрых вычислений



Дата публикации: 18.07.2026

Развитие искусственного интеллекта стремительно увеличивает нагрузку на современные вычислительные системы. Крупные языковые модели, нейросети нового поколения и облачные сервисы ежедневно обрабатывают колоссальные объемы информации, требуя все большей вычислительной мощности. Однако традиционные электронные процессоры постепенно приближаются к своим физическим пределам. Именно поэтому ученые во всем мире активно развивают фотонные вычисления — технологию, в которой вместо электронов информацию передают и обрабатывают фотоны, то есть частицы света.

Одной из главных проблем подобных систем долгое время оставалась невозможность эффективно управлять светом после его распространения внутри чипа. В отличие от электрического сигнала, который сравнительно легко задержать или временно сохранить, свет распространяется практически мгновенно, что значительно осложняет создание памяти, буферов и механизмов синхронизации, необходимых для сложных вычислений.

Теперь исследовательская группа из Сеульского национального университета совместно с Сеульским университетом представила решение этой фундаментальной задачи. Ученые разработали программируемую фотонную интегральную схему, позволяющую изменять скорость распространения световых импульсов непосредственно во время работы устройства. Результаты исследования были опубликованы в научном журнале Advanced Science.

Разработка представляет собой новый тип фотонного процессора, способного гибко управлять временными характеристиками световых сигналов без изменения физической конструкции устройства. Это означает, что один и тот же чип может выполнять сразу несколько функций, которые раньше требовали создания отдельных специализированных компонентов.

Фотонные интегральные схемы считаются одним из наиболее перспективных направлений современной микроэлектроники. Если в обычных процессорах вычисления происходят благодаря движению электронов по транзисторам, то в фотонных устройствах информацию передают световые импульсы внутри миниатюрных оптических волноводов. Поскольку фотоны практически не нагревают материал и распространяются значительно быстрее электрических сигналов, такие системы потенциально способны обеспечить многократное увеличение производительности при существенном снижении энергопотребления.

Именно поэтому крупнейшие мировые компании уже инвестируют миллиарды долларов в развитие кремниевой фотоники. Подобные технологии рассматриваются как основа будущих серверов искусственного интеллекта, высокоскоростных сетей связи, суперкомпьютеров и квантовых вычислительных платформ.

Главной особенностью новой разработки стала возможность динамически изменять задержку прохождения световых импульсов. Ранее большинство подобных фотонных схем имело фиксированные параметры, определяемые еще на этапе изготовления. Если инженерам требовалось изменить время задержки сигнала или рабочий диапазон частот, приходилось проектировать совершенно новый чип.

Авторы исследования предложили принципиально иной подход. Они усовершенствовали архитектуру системы, основанной на эффекте прозрачности, индуцированной связанными резонаторами (CRIT). Это хорошо известное в современной фотонике явление позволяет определенным частотам света проходить практически без потерь, одновременно замедляя распространение оптических импульсов.

В новой конструкции исследователи объединили два режима работы оптических резонаторов — так называемые яркий и темный режимы — в единую управляемую систему и дополнили ее двумя программируемыми петлевыми соединителями. Благодаря этому появилась возможность изменять характеристики распространения света уже после изготовления устройства.

Проще говоря, инженеры научились своеобразно "перестраивать" маршрут светового сигнала внутри микросхемы подобно тому, как современные программируемые процессоры перенастраивают выполнение вычислительных операций.

Особенно важно, что новая схема позволяет управлять сразу несколькими характеристиками светового сигнала. Исследователи смогли изменять время задержки, форму передаваемого импульса, ширину полосы пропускания, спектральные характеристики и даже выполнять преобразование частоты света без использования дополнительных специализированных компонентов.

Подобная универсальность особенно ценна для современных дата-центров. В крупных вычислительных системах огромное количество информации должно поступать одновременно в тысячи процессоров. Даже небольшие различия во времени прихода сигналов могут снижать общую производительность вычислений. Возможность программно синхронизировать световые импульсы значительно повышает эффективность всей вычислительной инфраструктуры.

Работа устройства была подтверждена с помощью численного моделирования. Расчеты показали, что скорость распространения оптических импульсов можно изменять непосредственно во время функционирования схемы без заметного ухудшения качества передачи информации. Это открывает возможность создания адаптивных фотонных вычислительных систем, способных самостоятельно перестраиваться под текущую вычислительную нагрузку.

Дополнительно исследователи выполнили трехмерное электромагнитное моделирование и показали, что предложенная конструкция может быть изготовлена на основе нитрида кремния (Si_3N_4). Сегодня этот материал считается одной из наиболее перспективных платформ интегральной фотоники благодаря минимальным потерям света, высокой стабильности и совместимости с существующими технологиями производства микросхем.

Отдельное внимание авторы уделили практической надежности устройства. Во время моделирования были учтены реальные производственные факторы, способные влиять на работу фотонных схем, включая потери материала, изменения характеристик резонаторов, обратное рассеяние света, фазовые ошибки, колебания коэффициентов связи между элементами и тепловые

перекрестные помехи. Даже с учетом этих факторов новая архитектура сохраняла стабильную работу и демонстрировала высокую эффективность.

Разработка открывает возможности для создания целого поколения универсальных фотонных процессоров. Один программируемый чип сможет выполнять функции, которые сегодня распределены между несколькими специализированными устройствами. Среди них — синхронизация сигналов, линии регулируемой задержки, оптические буферы, спектральная обработка, коммутация потоков данных и преобразование частоты.

Для искусственного интеллекта подобные технологии имеют особое значение. Современные модели требуют постоянного обмена огромными массивами информации между вычислительными узлами. Значительная часть энергии расходуется не на сами вычисления, а на передачу данных. Использование программируемых фотонных схем позволяет существенно уменьшить эти потери и повысить общую энергоэффективность вычислительных комплексов.

Еще одним перспективным направлением станет развитие сетей связи следующего поколения. Возможность гибко управлять параметрами световых сигналов непосредственно внутри одного чипа позволит создавать более компактные и дешевые телекоммуникационные устройства с высокой пропускной способностью.

Кроме того, технология представляет большой интерес для автономного транспорта, высокоточных сенсорных систем, научных измерительных комплексов и квантовых компьютеров, где требуется максимально точное управление оптическими сигналами и минимальные задержки обработки информации.

Авторы исследования считают, что предложенный ими принцип проектирования может применяться не только в системах CRIT, но и во многих других типах фотонных устройств на основе оптических резонаторов. Это значительно расширяет перспективы практического использования новой технологии и делает ее потенциальной платформой для будущих программируемых фотонных вычислителей.

Таким образом, ученым удалось решить одну из наиболее сложных задач современной интегральной фотоники — научиться программно управлять скоростью распространения света внутри микросхемы. Если технология успешно пройдет этап экспериментальной реализации и последующей коммерциализации, в ближайшие годы она может стать основой нового поколения энергоэффективных процессоров, сверхбыстрых систем

искусственного интеллекта и высокопроизводительных центров обработки данных, где вычисления будут выполняться уже не электронами, а потоками света.

Ссылка: «Полностью программируемый медленный свет на основе спинорного представления обобщенной прозрачности, индуцированной связанными резонаторами» DOI: [10.1002/adv.76378](https://doi.org/10.1002/adv.76378).