

Кремниевая и арсенид галлий-алюминиевая технология: мировые тенденции в области кремниево-фотонной технологии

Часть 1

Валерий Сведе-Швец, Владислав Сведе-Швец, Максим Зиновьев (Москва)

Многие эксперты сходятся в своих прогнозах на том, что кризис электронной планарной технологии в мощных и быстрых микропроцессорных системах не за горами. Одним из интересных и перспективных направлений в этой области является кремниево-фотонная технология, позволяющая избавиться от ряда принципиальных недостатков и ограничений, свойственных устройствам с электрическими каналами связи. В открывающемся цикле статей рассматриваются особенности и принципы построения оптических и гибридных вычислительных систем.

В настоящее время не наблюдается существенного прироста тактовой частоты сверхбольших интегральных схем (СБИС) процессорных кристаллов. Вопрос повышения их производительности решается оптимизацией многоядерной архитектуры при тех же тактовых частотах. Похоже, что кремниевая планарная технология исчерпала себя и помимо распараллеливания задач на несколько ядер необходимы поиски новых направлений. Сегодня в развитии процессоров по кремниевой технологии, систем на их основе, и, соответственно, программного обеспечения выделяются три приоритетных направления:

- энергетика – энергия дорогая, транзисторы практически ничего не стоят;
- память – системную производительность сдерживает память, операции выполняются быстро;
- команды – допустимы длинные и короткие команды, но выполнять-

ся они должны параллельно на разных ядрах.

При реализации этих направлений можно допустить существование двух альтернативных схем. Первая – фоннеймановская. Она предполагает, что вычислительным процессом управляет поток команд, а данные хранятся в памяти. Вторая схема основывается на том, что процессом вычислений управляют входные потоки данных, которые на входе системы попадают в подготовленную вычислительную инфраструктуру, обладающую естественным параллелизмом.

С точки зрения реализации первая схема гораздо проще. Кроме того, она универсальна, программы компилируются и записываются в память. Вторая схема требует создания специальной аппаратной конфигурации, необходимой для выполнения определённой задачи. В ней, например, программирование может осуществляться посредством коммутации, а далее устройство управления, в соответствии с заданной программой, координирует работу остальных устройств. На рисунке 1 представлена структура такой перспективной вычислительной машины – антимашины.

Антисимметрия между машиной и антимашинной наблюдается во всём, за исключением того, что антимашинна допускает параллелизм внутренних циклов, а это означает, что в ней решается проблема параллельной обработки данных. В антимашине доступ

к памяти обеспечивается не по адресу команды или фрагмента данных, записанному в соответствующий регистр, а посредством универсального генератора адресов (Generic Address Generator, GAG). Его преимущество в том, что он позволяет передавать блоки и потоки данных. В то же время компиляция, посредством которой создаётся специализированная под определённую задачу система, заключается в объединении нужного количества настроенных процессоров данных в общий массив (Data Process Array, DPA), на котором выполняются реконфигурируемые алгоритмы Flowware.

Методология GAG непоследовательна, а потому обладает такими достоинствами, как возможность работы с двухмерными адресами. Это даёт неоспоримые преимущества при работе с видеоданными и при выполнении параллельных вычислений. Счётчик данных – альтернатива счётчику команд в машине фон Неймана, а его содержимым управляет Flowware. Для новой методологии придумано и новое название – Twin Paradigm. Оно отражает симбиоз вычислительных ядер двух классов: обычных центральных процессоров, построенных по фоннеймановской схеме, и процессоров данных, реализующих антимашину.

Многопроцессорные системы, как один из способов решения проблемы повышения производительности, не получили широкого применения, так как требовали дорогостоящих и сложных в производстве многопроцессорных материнских плат. Для повышения производительности процессора требуются изменения в его аппаратной части. Например, можно повысить тактовую частоту или усложнить логическую и аппаратную составляющие.

Сегодня внутренняя тактовая частота процессора составляет около 3 ГГц, внешняя – частота системной шины – 800 МГц. В настоящее время

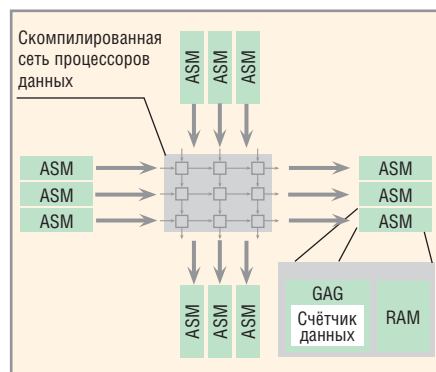


Рис. 1. Структура перспективной вычислительной машины – антимашины

освоен 12-нм техпроцесс. Многие аналитики утверждают, что этот техпроцесс будет последним в планарной технологии. Даже 10-нм техпроцесс не даёт ощутимого прироста производительности СБИС процессорного кристалла. Следовательно, требуется преодоление ограничений кремниевой планарной технологии и переход к организации СБИС процессорного кристалла на трёхмерную электронную структуру. Но и с переходом СБИС на трёхмерные электронные структуры не решаются фундаментальные системные ограничения, связанные с пропускной возможностью электрических каналов связи.

Микроэлектронная технология четвёртого поколения повысила частоту работы логических элементов, увеличила интеграцию схем на кристалле, частично перенесла электрические связи, ранее располагавшиеся на печатной плате, и, как следствие, повысила производительность различных устройств. Но она не решила общую для всех перечисленных поколений проблему – проблему соединений. Связь как была, так и осталась электрической.

Сегодня для того, чтобы обеспечить внешние соединения с интегральной схемой на кристалле, необходимо использовать электрические связи на уровне корпуса, которые насчитывают уже более 1000 электрических выводов. Этот рост обусловлен увеличением числа линий сигнальных интерфейсов на кристалле, а также необходимостью многократных связей по питанию и «земле». При этом тактовая частота внутри кристалла превышает значение тактовой частоты вне кристалла в 4–10 раз. Проблема электрических связей опять перенесена на многослойную печатную плату. Таким образом, проблема связей остаётся центральной и в современных микропроцессорах четвёртого поколения.

Довольно эффективной оказалась технология повышения производительности путём одновременной обработки нескольких потоков команд в многоядерном процессоре. Кристалл многоядерного процессора содержит несколько вычислительных ядер, поэтому для повышения производительности такого процессора программа должна задействовать все ядра.

При этом изменений в аппаратной части процессора не требуется. Вместо этого достаточно провести доработку существующей технологии с помощью программных средств. Данная технология оказалась достаточно универсальной и дешёвой в реализации.

Производители процессоров заявляют, что в скором времени на рынке можно будет увидеть процессоры с сотнями вычислительных ядер (см. рис. 2). Очевидно, что весь потенциал многоядерной архитектуры раскрывается только при наличии соответствующего программного обеспечения. Таким образом, сферы производства компьютерного «железа» и программного обеспечения очень тесно связаны между собой.

Тем не менее, при создании многоядерных процессоров возникли следующие проблемы:

- высокое электропотребление;
- низкая скорость ввода-вывода;
- электрические связи расположены в плоскости кристалла;
- ввод-вывод информации осуществляется по каналам с большим числом электрических контактов;

Новое поколение GaN-транзисторов

WolfSpeed

<p>CGHV14250 Диапазон частот: 1200–1400 МГц Мощность: 250 Вт Коэффициент усиления: 18 дБ</p>	<p>CGHV14500 Диапазон частот: 1200–1400 МГц Мощность: 500 Вт Коэффициент усиления: 17 дБ</p>	<p>CGHV35150 Диапазон частот: 2900–3500 МГц Мощность: 150 Вт Коэффициент усиления: 13,5 дБ</p>
--	--	--

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР ПРОДУКЦИИ WOLFSPPEED

ProCHIP
POWERED BY ProSOFT

Активный компонент вашего бизнеса

ТЕЛ.: (495) 232-2522 / ФАКС: (495) 234-0640 / INFO@PROCHIP.RU / WWW.PROCHIP.RU

Реклама

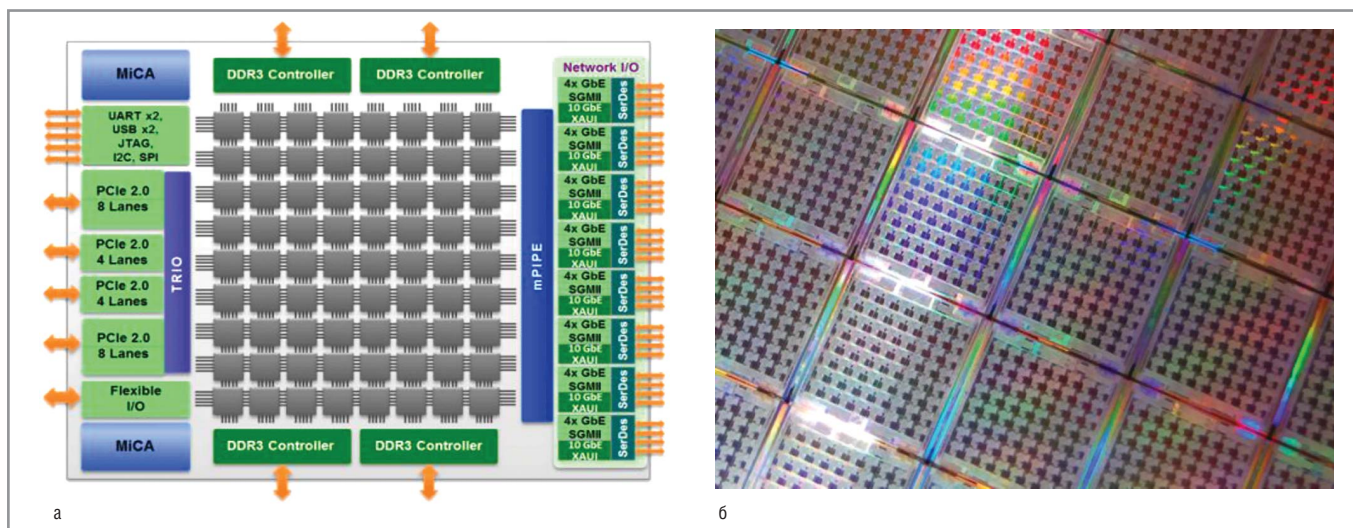


Рис. 2. Процессор Telera: а – структурная схема многоядерной архитектуры; б – снимок

- контакты расположены по периферии полупроводникового кристалла;
- высокая степень сложности чипа;
- низкий процент выхода продукции, высокая себестоимость (так, при производстве 8-ядерного процессора IBM Cell пригодными являются только 20% производимых кристаллов).

В силу всех перечисленных недостатков кремниевая планарная технология не является оптимальной для создания варианта перспективной вычислительной машины – антимашины. Требуется комплексный подход к построению новых трёхмерных (3D) архитектур кристаллов СБИС с многоканальными оптическими и электрическими связями. С развитием современной микроэлектроники сформировались два новых технологических направления: оптоэлектроника и нанотехнологии. Нанотехнологии находятся ещё на начальном этапе развития, а оптоэлектроника уже достигла заметных успехов в ряде областей, продемонстрировав черты самостоятельного приборостроения.

Кремниво-фотонная технология в совокупности с трёхмерной пространственно-временной платформой «ООО ОЭС» [1] позволяет:

- реализовывать ввод-вывод информации как по электрическим, так и по оптическим каналам;
- располагать высокоплотные оптические сигналы, которые направлены перпендикулярно плоскости полупроводникового кристалла, по всей его поверхности;
- формировать многоядерные процессоры с многоканальными скоростными оптическими, цифроаналоговы-

- ми каналами ввода-вывода и индивидуальным управлением;
- формировать 3D многоканальные электронно-фотонные гибридные интегральные многокристалльные схемы и модули с многоканальными многоядерными процессорами;
- создавать 3D-вычислители с многоядерной потоковой параллельной архитектурой.

Объёмные электронно-фотонные устройства имеют ряд отличий от других электронных устройств. Кремниевая и арсенид-галлиевая технологии позволяют совмещать кристаллы с оптическими каналами и имеют следующие достоинства:

- высокую информационную ёмкость оптического канала, обусловленную высокой частотой световых колебаний (около 10^{15} Гц), что на 3–4 порядка больше, чем в обычном радиотехническом диапазоне;
- узкую направленность светового излучения, обеспеченную малой угловой расходимостью луча (меньше одной минуты), что позволяет концентрировать электромагнитную энергию в заданной области пространства (при этом лазерный луч может быть направлен на фоточувствительную площадку микронных размеров);
- возможность двойной (временной и пространственной) модуляции светового луча с независимой модуляцией части луча, что позволяет производить параллельную обработку информации и создавать высокопроизводительные информационно-вычислительные комплексы;
- так как источник оптического излучения и приёмник в кремниво-

фотонных приборах не связаны друг с другом электрически, а фотоны электрически нейтральны, то они никак не влияют друг на друга;

- информация оптически передаётся только в одном направлении – от источника к приёмнику, а каналы, по которым распространяется оптическое излучение, не взаимодействуют друг с другом и практически не чувствительны к электромагнитным помехам – отсюда их высокая помехозащищённость.

Архитектура перспективной вычислительной машины (антимашины), по мнению авторов, может быть реализована с помощью 3D фотон-электронных модулей, имеющих как многоканальные планарные электрические, так и многоканальные 3D оптические каналы обмена информации и алгоритмы пространственно-временной обработки информации.

ОПТИЧЕСКИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ СОЕДИНЕНИЯ И ИХ ПРЕИМУЩЕСТВА

Оптические пространственные соединения в архитектурах вычислительных устройств и систем имеют ряд преимуществ по сравнению с электрическими:

- отсутствие электрического проводника, что позволяет осуществлять эффективные пространственные соединения кристалл–кристалл, плата–плата;
- отсутствие взаимного влияния при пересечении лучей света в пространстве;
- несколько каналов с высокой пропускной способностью могут сосуществовать в одном пространстве;

- параллельная природа светового потока и способность к объединению обеспечивают возможность создания гибких параллельных архитектур;
- отсутствие возможности перехватывать информацию, поскольку оптическая система ничего не излучает в окружающую среду.

Все эти преимущества достигаются благодаря тому, что в качестве носителя информации используются не электроны, а фотоны.

Реализация пространственных оптических соединений на уровнях плата-плата и кристалл-кристалл требуют разработки компонентов эффективного оптоэлектронного интерфейса, обеспечивающего параллельный ввод-вывод в интегральной схеме. При создании таких интерфейсов были опробованы различные подходы. В частности – монтаж по периметру кристалла лазерных диодов и детекторов для передачи и приёма информации. Однако в этом случае существует ограничение по количеству входов-выходов, которые можно организовать по периметру кристалла. Эта проблема может быть решена, если для организации

ввода-вывода информации использовать поверхность всего кристалла.

Монолитное выращивание полупроводниковых лазеров, детекторов и электронных схем обработки в одном кристалле позволяет создать высокоскоростные, компактные оптоэлектронные интегральные схемы (ОЭИС) с позиционной точностью, определяемой технологией литографии, и потенциально небольшой себестоимостью. Несмотря на то, что уже созданы некоторые макетные образцы ОЭИС, эта технология все ещё находится на начальной стадии развития и связанные с ней проблемы производства и надёжности ещё только предстоит решить.

Более реалистичным считается гибридный подход, использующий непосредственный монтаж созданных оптоэлектронных компонентов на Si или GaAs. На данный момент гибридные решения рассматриваются как единственно возможные для создания систем с пространственными оптическими соединениями, пока монолитные ОЭИС не станут технологически и экономически доступными.

Увеличение скорости передачи информации за счёт высокой пропускной способности и малых задержек сигнала в оптических соединениях позволяет повысить «массовость» MPP-систем (Massively Parallel Processing – системы с массовым параллелизмом). То есть значительно увеличить количество параллельно взаимодействующих процессорных узлов. В системах MPP с оптическими соединениями, построенных с использованием высокоскоростных скалярных микропроцессоров, возможно получить производительность, значительно превышающую производительность MPP-систем с обычными электрическими соединениями.

Хотя оптические соединения в сетевых архитектурах MPP-систем ещё не получили промышленного применения, есть два основных способа их построения:

- посредством волоконно-оптических линий связи (ВОЛС);
- посредством соединений в свободном пространстве.

В первой группе осуществляется электронная коммутация информационных потоков в узлах сети, а во вто-



Мощные светодиоды



Мощные светодиоды



Сверхъяркие SMD-светодиоды



Светодиодные модули

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР ПРОДУКЦИИ SEMILEDs



ProCHIP
POWERED BY PROSOFT

Активный компонент вашего бизнеса

ТЕЛ.: (495) 232-2522 / ФАКС: (495) 234-0640 / INFO@PROCHIP.RU / WWW.PROCHIP.RU



Реклама

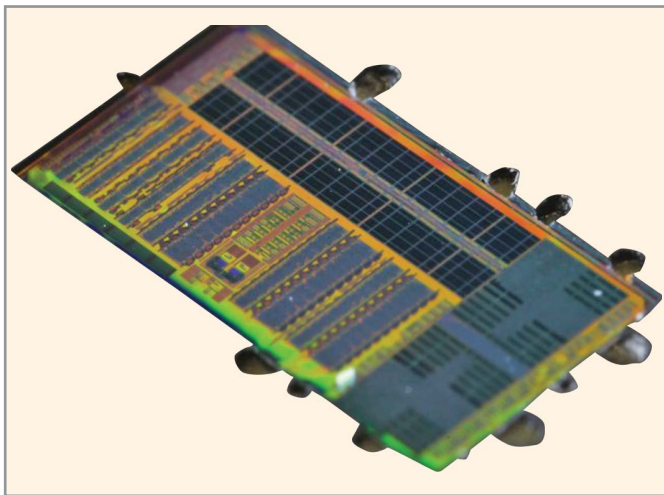


Рис. 3. Фотонный микропроцессор на основе архитектуры RISC-V

рой – оптическая. Для промышленной реализации в настоящее время наиболее пригодны соединения посредством ВОЛС, поскольку они не используют дополнительных оптических элементов коммутации – призм, линз и др. Однако возможности этих соединений для создания сетевых архитектур ограничены некоторыми топологическими проблемами. Несмотря на это, такие соединения всё же снимают ряд свойственных электронике ограничений, обеспечивая снижение накладных расходов при передаче больших массивов данных.

Соединения в свободном пространстве связывают с новым типом кристаллов – матрицами умных пикселей (Smart Pixel Arrays, SPA). Применение таких матриц для объединения элементов MPP-структур возможно либо с использованием объединительных плат, либо непосредственно в трёхмерных системах.

Объединительные платы представляют собой десятки тысяч оптических каналов SPA-матриц, расположенных по краям электронных печатных плат, для передачи данных. Главным недостатком таких систем является наличие промежуточного электронного трафика по электрическим выводам периферии печатных плат, что значительно ограничивает пропускную способность.

Трёхмерные системы, где взаимодействие элементов MPP осуществляется по всей площади SPA-СБИС, характеризуются отсутствием паразитного электронного трафика. Препятствиями для появления таких систем является отсутствие у западных производителей технологии, обеспечивающей «прозрачность» SPA-СБИС, т.е. возможность при-

ёма входного оптического сигнала на одной плоскости SPA-СБИС с выдачей выходного оптического сигнала на противоположной плоскости SPA-СБИС.

В настоящее время широко используются волоконно-оптические линии связи, оптическая и голографическая памяти большой ёмкости, сенсоры изображения и другие устройства. Однако все они являются одноканальными системами оптической передачи информации. Как было сказано ранее, оптические соединения имеют преимущества по сравнению с электрическими. В связи с этим, одной из перспективных задач оптоэлектроники является создание многоканальных 3D оптически связанных электронных устройств на уровне кристалл-кристалл, кристалл–плата, плата–плата.

Развитие оптоэлектроники за рубежом идёт по двум основным направлениям формирования каналов обмена информацией:

- создание объединительных плат с множеством оптических каналов и терабитной пропускной способностью;
- разработка объёмных оптоэлектронных устройств с матрицами умных пикселей (SPA-матрицы).

По мнению ведущих экспертов, второе направление является наиболее перспективным, поскольку оно реализует многоканальную оптическую связь кристаллов между собой. В настоящее время в данной области достигнуты определённые успехи.

Японская компания NEC совместно с Fujitsu и Hitachi разработала оптоэлектронный модуль межчиповых соединений для обмена данными между несколькими процессорами. Ведутся работы над тестированием оп-

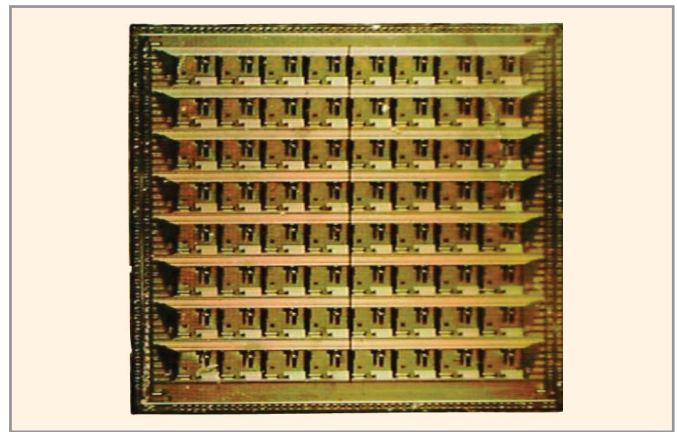


Рис. 4. 3D функциональная СБИС с фотонными линиями связи, процессором коммутации и процессором БПФ с матричной организацией пикселей 8 × 8

электронных модулей с 48 каналами и пропускной способностью 10 Гбит/с с возможностью передачи данных на расстояние до нескольких метров без потери скорости.

Успехи разработчиков кремниевой фотоники корпорации Intel позволят изготавливать интегральные чипы и уже в ближайшее время применять не только электрические, но и оптические сигналы в компьютерных устройствах. Высокопроизводительное оптоэлектронное устройство, содержащее 12-канальный оптический интерфейс, состоит из лазеров VCSEL (лазеры вертикального излучения) и параллельного КМОП оптического трансивера, смонтированных в стандартном корпусе.

Корпорация IBM разработала оптоэлектронный модуль – опточип, который представляет собой многоэлементную трёхмерную сборку, изготовленную методом планарного монтажа с 32-канальным оптическим интерфейсом и пропускной способностью 10 Гбит на канал. Помимо оптической шины данных, специалисты IBM разработали оптический приёмо-передающий модуль с 24 передатчиками и 24 приёмниками. Каждый канал работает со скоростью 12,5 Гбит/с.

Израильская фирма Lenslet создала первый в мире коммерческий оптический процессор DSP (Digital Signal Processor). Процессор Enlight 256 – это гибридный оптический процессор, в три раза превосходящий по производительности лучшие в мире электронные DSP. Ядро этого процессора – оптическое, а входная и выходная информация представляется в электронном виде. Ядро состоит из 256 VCSEL лазеров, пространственного модулятора

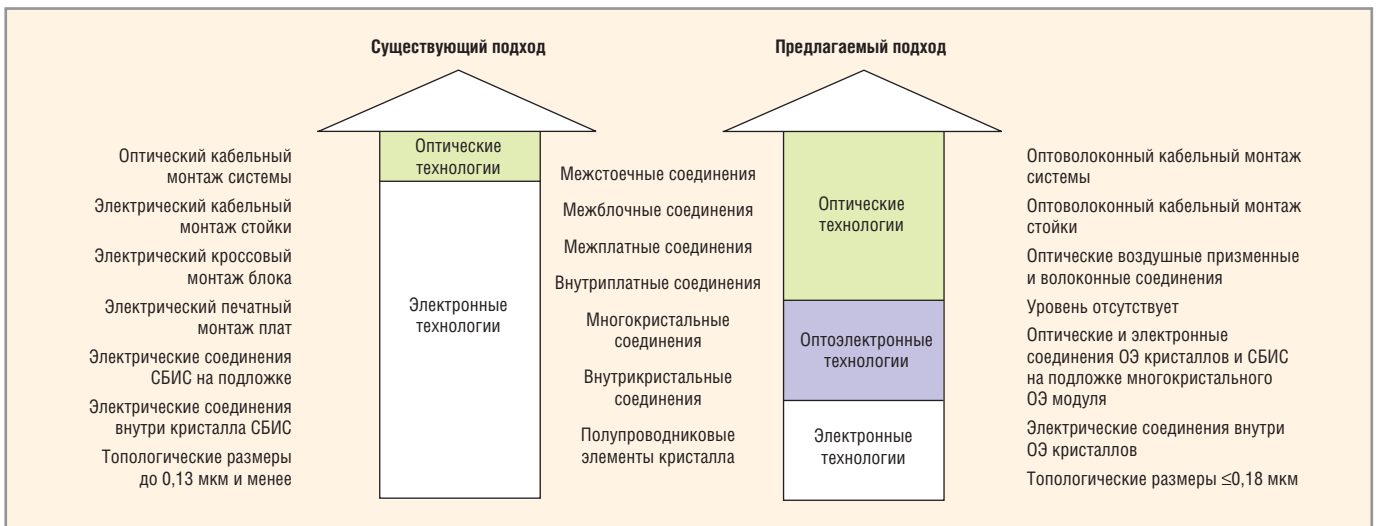


Рис. 5. Технологии соединений

света, набора линз и приёмников. Производительность процессора составляет 8 трлн операций в секунду: за один такт (8 нс) процессор осуществляет операцию умножения 256-байтного оптического сигнала (вектора) на матрицу 256 × 256.

Исследователи из Университета штата Колорадо в Боулдере совместно с коллегами из Калифорнийского университета в Беркли и Массачусетского технологического института представили процессор, который построен на основе архитектуры RISC-V. Размер кристалла составляет 6 × 3 мм. Чип обладает двумя вычислительными ядрами, 1 МБ памяти SRAM и 850 световыми портами ввода-вывода (см. рис. 3).

Российское предприятие ООО «ОЭС» разработало кремниво-фотонную объёмную технологию для многоканальных оптических и электрических соединений, что позволило реализовать их на уровнях чип-чип, плата-плата и распределённая объектная связь, включая компоненты эффективного аналогового-цифрового оптоэлектронного интерфейса, обеспечивающего параллельный ввод-вывод информации на уровне интегральной схемы. Результаты проведённых работ опубликованы в [2].

Кристалл процессора коммутации и процессора быстрого преобразования Фурье (БПФ) с матричной организацией пикселей 8 × 8 и 14 × 14, с 128 и 392 световыми портами ввода-вывода, соответственно, и функциональной ориентацией представлен на рисунке 4.

Характерной особенностью фотоники является возможность передачи данных на разные расстояния – от долей миллиметра до нескольких километров

при одинаковых энергетических затратах. Для обеспечения пропускной способности на уровне 1 Тбит/с требуется всего 1,3 Вт энергии. Использование света с различной длиной волны позволит организовать передачи нескольких параллельных потоков данных по одному каналу, что может увеличить и без того немалую пропускную способность оптического канала.

Принципы построения оптоэлектронных элементов и устройств

Достижения современной оптоэлектроники позволяют перейти к разработке кремниво-фотонной объёмной технологии в области многоканальных оптических и электрических соединений различного уровня: чип-чип, плата-плата, распределённая объектная связь. Такие подходы могут применяться, если при организации ввода-вывода информации используется поверхность всего кристалла.

На рисунке 5 показаны существующий и перспективный уровни технологий соединений. В кремниво-фотонной и арсенид галлий-алюминиевой технологиях многоканальные оптические и электрические каналы реализуют фотон-электрон-фотонные связи непосредственно на поверхности полупроводниковых кристаллов.

Новые технологии позволяют воплощать принципы объёмной многоканальной связи и создавать функциональные 3D матричные фотон-электрон-фотонные модули для устройств обработки информации, связи, коммутации и строить высокопроизводительные информационно-вычислительные и радиолокационные систе-

мы со множеством каналов быстрого обмена информацией.

Научно-технические наработки предприятия ООО «ОЭС» могут способствовать развитию интегральной оптоэлектроники в области кремниво-фотонной технологии. В частности, на базе этой технологии могут быть разработаны изделия существенным образом увеличивающие возможности планарной микроэлектроники и позволяющие перейти к выпуску интегральных изделий 3D-архитектуры с многоканальными оптическими и электрическими связями. В настоящее время предприятием ООО «ОЭС» разработан ряд перспективных изделий с использованием кремниво-фотонной технологии, не имеющей аналогов в мире, что, в свою очередь, позволяет создавать перспективные интегральные оптоэлектронные приборы с использованием отечественной электронной компонентной базы.

В следующей части статьи будет представлена концепция построения трёхмерных матричных фотон-электрон-фотонных модулей и изделий на их основе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Агрич Ю.В.* Быстродействующий аналого-цифровой преобразователь и способ его калибровки. Патент РФ № 2341017. 10.04.2008. Пр. 29.09.2006.
2. *Сведе-Швец В.Н., Сведе-Швец В.В.* Комплекс принципов и аппаратно-программных средств ввода, преобразования, обработки, хранения, коммутации и передачи пространственно-временной многоканальной информации с 3D-архитектурой. Приложение к журналу «Информационные технологии». 2008. №3.

