

ОПТИЧЕСКАЯ ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ В СУПЕР-ЭВМ И МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМАХ

ЧАСТЬ 1



А.С. АХМАНОВ, Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН

О.Е. НАНИЙ, физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

В.Я. ПАНЧЕНКО, Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН

Введение

Современные микропроцессорные системы создаются путем объединения большого числа сверхбольших интегральных схем (СБИС), выполняющих различные функции (микропроцессоры, схемы памяти, схемы управления и коммутации, управления вводом-выводом и др.), в один модуль с помощью металлических проводников на печатной плате и соединения модулей посредством кросс-плат. При этом данные между СБИС на печатных платах и по кросс-платам передаются электрическими сигналами. Быстродействие микропроцессорной системы в целом зависит от быстродействия и степени интеграции входящих в ее состав СБИС, а также от скорости обмена данными между СБИС. Оценки показывают, что потребность в суммарной скорости обмена информацией в системах обработки данных следующего поколения, таких как серверы и маршрутизаторы Интернет, вскоре превысят 1 Тбит/с [1].

Таким образом, коммуникационная среда, объединяющая процессоры, память и системы ввода-вывода, является одним из ключевых элементов супер-ЭВМ. Коммуникационные среды, основанные на медных соединениях существенно ограничены по быстродействию и параллелизму вследствие физических ограничений электрических линий [2, 3].

«Оптика» уже успешно заменила «медь» в системах передачи информации на большие и средние расстояния, и у специалистов нет сомнений в том, что оптические коммуникации будут все шире применяться при передаче информации на все меньшие расстояния (рис. 1).

Следовательно, назрела необходимость рассмотреть вопрос о том, как скоро и в соединениях какого типа произойдет замена электрических соединений оптическими, а также какие именно оптические технологии будут востребованы при передаче информации внутри высокопроизводительных систем обработки информации.

Таким образом, в вычислительных системах на основе кросс-панелей* используются следующие виды соединений:

* В русскоязычной литературе используются два синонимичных термина: кросс-панель и кросс-плата, соответствующие англоязычному термину back-plane.

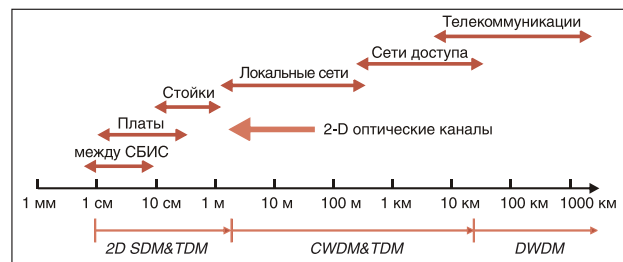


Рис.1. Масштаб и используемые технологии при обмене информацией между информационными системами и их компонентами

- между СБИС в пределах одного модуля (типичное расстояние 30 см);
- между модулями в кросс-панели (типичное расстояние от 70 см до 1 м);
- между блоками в стойке (от 1 до 5 м);
- между стойками (до 100 м).

Безусловно, сначала оптические соединения займут доминирующее положение в соединениях между стойками.

Сегодня решения на основе оптических соединений преобладают для дальностей более 100 м и скоростей не менее 2,5 Гбит/с. Способность очень коротких оптических соединений (менее 10 м) вытеснить современные электрические соединения зависит от потребления мощности, плотности расположения каналов и, что наиболее важно, от стоимости решений. По плотности распо-

ложения каналов оптические решения существенно превосходят электрические уже сейчас, поэтому, как только канальная скорость в соединениях достигнет 10 Гбит/с (по оценкам компании IBM, это произойдет в 2010–2011 г. [4, 5]), оптические соединения станут предпочтительнее электрических даже для самых коротких соединений. Внедрение оптических соединений для обмена информацией внутри компьютерных систем между блоками, платами и внутри плат требует более внимательного изучения. В настоящей работе дан анализ физических и экономических ограничений как традиционных электрических соединений так и оптических соединений различных типов.

1. Электрические соединения и ограничения их возможностей

Из анализа архитектур и пропускной способности современных электрических шин передачи данных в супер-ЭВМ и микропроцессорных системах можно сделать следующие выводы.

Шины с параллельной архитектурой работают на тактовых частотах до 500 МГц при передаче обычных сигналов по медным проводникам. Частота может быть поднята до 1 ГГц для низковольтных дифференциальных сигналов. Для шин характерны следующие три типа задержек: задержки блокирования, задержки соединения и задержки разъединения. длительность задержек можно уменьшить, но полностью избавиться от них невозможно. Пропускная способность шины увеличивается с разрядностью, однако создание шин высокой разрядности – дорогостоящая технология, применяемая только в суперкомпьютерных системах. Пропускная способность параллельной шины уменьшается с ростом ее длины и числа подключенных устройств, поэтому параллельную шину с электрическими проводниками трудно масштабировать. По указанным причинам в настоящее время наблюдается постепенный переход на шины с последовательной коммутацией архитектурой. В таких шинах скорость последовательной передачи по одному дифференциальному каналу достигает 2–3 Гбит/с, и пропускная способность шины наращивается путем увеличения числа

каналов (как правило, до 32). Конструкция шины усложняется за счет наличия быстродействующих коммутаторов. В связанных архитектурах с коммутацией приходится иметь дело с другим набором задержек: задержками маршрутизации, коммутации и передачи данных. Основное преимущество структур с коммутацией соединений – масштабируемость. Они могут связывать сотни процессоров и узлов ввода-вывода, чего нельзя сказать о параллельных шинах. Это и делает их особенно привлекательными для применения в коммуникационных системах со множеством узлов ввода-вывода и коммуникационных процессоров.

Основное ограничение пропускной способности связано с физическими ограничениями при распространении электрических им-

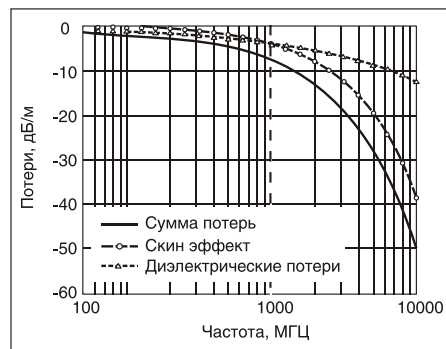


Рис. 2. Суммарные потери и составляющие потерь в электрических соединениях. На гигагерцовых частотах доминируют диэлектрические потери, однако по мере увеличения частоты растут потери, связанные со скин-эффектом

пульсов по проводникам.

В электрических линиях передачи наблюдаются затухание сигналов, искажение формы импульсов и взаимные наводки между соседними линиями. Кроме этого, требуется согласование импедансов линии и подключенных к ней конечных устройств. Все эти проблемы существенно усложняются при увеличении частоты передаваемого сигнала в область более 1 ГГц. Быстрый рост суммарных потерь в электрических соединениях иллюстрирует рис. 2.

Проблемы физических и технических ограничений электрических линий передачи решаются путем применения все более сложных и дорогостоящих технологий

электрических межсоединений. Существенные трудности начинаются с частот около 500 МГц для параллельных шин и от 2 до 3 ГГц для последовательных шин. Существуют физические и технологические подходы, позволяющие увеличивать полосу пропускания электрических линий передачи. Линии, работающие на частотах выше 2 ГГц, создаются по принципу низковольтных дифференциальных линий. Это позволяет улучшить отношение сигнал/шум и уменьшить тепловыделение. Разрабатываются и применяются быстродействующие схемы адаптированной коррекции полосы (equalizing). Можно использовать сложное многоуровневое кодирование данных (как в модемах) и таким образом приблизиться к пределам по скорости передачи информации, определяемым теоремами Шеннона и Найквиста. Линию передачи можно разделить на короткие участки и применить быстродействующие схемы повторителей сигналов.

Вероятно, благодаря совокупности этих технологий, а также появлению новых материалов с низкими диэлектрическими потерями, в ближайшие несколько лет удастся увеличить скорость передачи данных по электрическим линиям на печатных платах до 10 Гбит/с, но при этом каждые новые 2 Гбит/с потребуют изменения технологии.

Физический предел для электрических линий на печатных платах длиной от 30 до 50 см – это скорость передачи 20 Гбит/с. Им определяется предельная пропускная способность кросс-панели (backplane) в серверах и супер-ЭВМ на уровне 1 Тбит/с. Дальнейший рост полосы требует перехода на принципиально другие методы передачи сигналов (рис. 3).

2. Преимущества оптических соединений

Проблема скорости обмена информацией в межсоединениях в перспективе может быть решена при помощи оптических методов передачи данных, которые существенно превосходят электрические по производительности, плотности расположения каналов (возможностям параллельной передачи) и потребляемой мощности.

Идея применения оптических каналов связи в микропроцессорных системах впервые была предложена в 1984 г. в работах [6, 7]. С тех пор в различных лабораториях

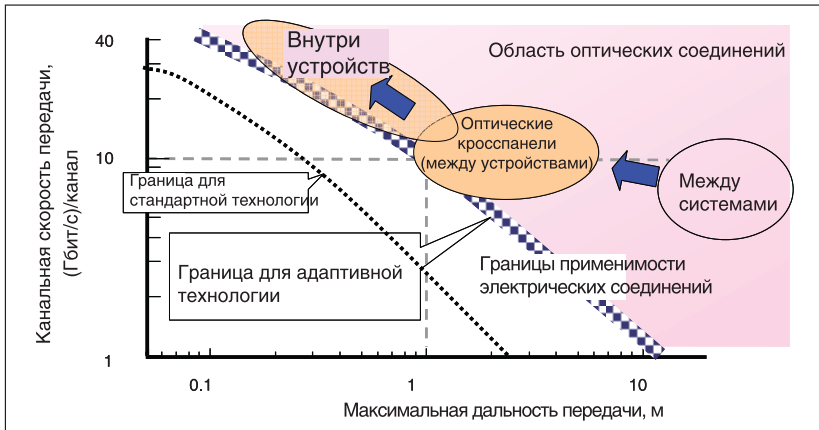


Рис. 3. Ограничение производительности электрических соединений. Фиолетовым цветом показана область использования оптических соединений

и университетах было выполнено большое число научных исследований по созданию элементов для оптической связи на малых расстояниях, а также изготовлены экспериментальные оптические шины, работающие на разных принципах (оптические пучки в свободном пространстве, волоконные шлейфы, системы волноводов на платах и др.) [8–15].

Широкие полосы оптических систем связи определяются прежде всего высокой несущей частотой оптического излучения – излучение с длиной волны 1 мкм (в вакууме) соответствует частоте 300 ТГц. Уже коммерчески доступны скорости передачи информации 2,5; 10; 40 Гбит/с по одному оптическому каналу. В научных лабораториях достигнута скорость передачи информации 320 Гбит/с по одному спектральному каналу. Современные коммерческие системы с применением спектрального разделения информационных каналов DWDM поддерживают скорость передачи до 1,6 Тбит/с. Системы ближайшего будущего будут иметь емкость до 12 Тбит/с по одномодовому волокну при передаче на расстояния до 1000 км, но исследования показывают, что физический предел пропускной способности оптического волокна (ОВ) составляет около 100 Тбит/с.

Характерным параметром, по которому можно оценить возможности и сравнить различные технологии передачи данных, является произведение скорости передачи на максимальную длину линии. Этот параметр особенно удобен для характеристики оптических линий, так как ширина полосы в ОВ

или оптическом планарном волноводе определяется межмодовой дисперсией, хроматической дисперсией и затуханием и обратно пропорциональна длине канала*. Для электрической линии связи полоса обратно пропорциональна квадрату длины линии. Типичный диапазон, в котором изменяется этот параметр для многомодовых оптических волокон, – от 5 Мбит-км/с (для недоро-

гих полимерных волокон) до 1 Гбит-км/с (для современных кварцевых волокон). Для одномодовых волокон этот параметр на три порядка лучше: он может достигать 1000 Гбит-км/с и более. Поэтому к настоящему времени оптические технологии передачи данных при скорости передачи 10 Гбит/с и выше на расстояние более 10 м имеют существенные технические и экономические преимущества по сравнению с электрическими линиями (см. рис. 3). Эффективность и целесообразность внедрения оптической связи в системах с характерными размерами от метров до сантиметров (от 100 до 1 см) активно исследуется в настоящее время. Речь идет о межсоединениях внутри компьютерных систем, между блоками и на печатных платах, т.е. о замене электрических шин оптическими. При этом предполагается создание нескольких поколений гибридных электрических и оптических соединений (рис. 4). Основные преимущества оптических технологий связи для высокоскоростной передачи информации в супер-ЭВМ и микропроцессорных системах следующие:

- существенное уменьшение задержек (оптические сигналы распространяются со ско-

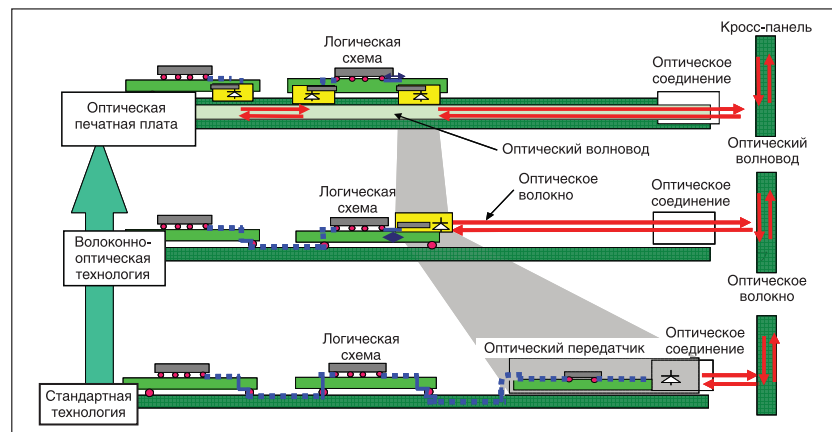


Рис. 4. Эволюция систем оптических и электрических соединений между элементами вычислительных машин через кросс-панель. Сегодня уже используются оптические соединения на основе многомодовых кабелей. Ожидается переход на использование полимерных волноводов по мере развития технологии их производства

* В длинных многомодовых волоконных линиях ширина полосы обратно пропорциональна корню квадратному из длины. Аналогичная корневая зависимость от длины характерна для одномодовых линий, полоса которых ограничена влиянием поляризационной модовой дисперсии.

ростью света);

- ширина полосы среды практически не ограничена – до 100 ТГц. Скорость передачи по одному каналу определяется полосами источника света и приемника (в

настоящее время до 40 ГГц);

- для увеличения информационной емкости канала можно использовать методы мультиплексирования (TDM и WDM);
- фотоны не взаимодействуют друг с другом, и можно минимизировать взаимные наводки соседних линий и внешние воздействия;
- меньше проблем с рассеиваемой в тепло мощностью, тепловыделение не увеличивается с длиной соединений;
- нет проблем с согласованием импедансов линий и нагрузок;
- нет ограничений для архитектуры, связанных с двумерностью разводки;
- при помощи оптических технологий можно реализовать трехмерные глобальные межсоединения большого числа СБИС;
- оптическую связь можно применять на всех уровнях иерархии межсоединений в супер-ЭВМ и микропроцессорных системах. Существенное преимущество оптических линий связи состоит в том, что для увеличения скорости передачи не требуется принципиально изменять архитектуру линий, как это делается для электрических соединений. Система оптических межсоединений одинаково работает как на скоростях 1 Гбит/с, так и на 40 Гбит/с, если улучшена технология источников и приемников. Частота модуляции в этом интервале практически не влияет на характеристики передачи сигнала в оптической системе. Поэтому разрабатывать новую архитектуру для перехода к следующему поколению скоростей не потребуется. Технология оптических соединений очень значительно превосходит технологию электрических соединений по производительности и плотности расположения каналов. Однако необходимость использования дополнительных элементов – оптических приемопередатчиков (трансиверов) приводит к усложнению конструкции и неизбежному росту стоимости и потребляемой мощности. Выбор между оптической и электрической технологиями, таким образом, сводится к анализу последних двух параметров.

3. Особенности оптических систем связи для коротких расстояний

Оптическая связь на коротких расстояниях требует разработки новых методов и технологий, при этом технологии, используемые в телекоммуникационных системах на больших расстояниях, не всегда применимы на малых.

Оптическая линия связи состоит из трех главных элементов: передатчика, передающей среды и приемника.

Передающая среда – это оптическое волокно, планарный оптический волновод или свободное пространство. Основные характеристики передающей среды – оптические потери и ширина полосы.

В качестве **оптических передатчиков** в оптических линиях связи применяются светодиоды или полупроводниковые лазеры, при этом в быстродействующих системах полупроводниковые лазеры существенно превосходят светодиоды по многим параметрам. Основными характеристиками полупроводникового лазера являются: длина волны, ширина спектра, выходная мощность, порог генерации по току и эффективность.

Полупроводниковые лазеры для приложений в оптической связи изготавливаются из материалов группы АЗВ5. Структуры на основе AlGaAs применяются в коротковолновой области (850 нм), структуры на основе InGaAsP – в длинноволновой области (1310; 1550 нм). По типу структуры полупроводниковые лазеры делятся на две группы:

- лазеры с торцевым выводом излучения и резонатором типа Фабри–Перо или распределенной обратной связью (DFB-лазеры). Этот тип лазеров обычно применяется в системах дальней связи;
- лазеры с вертикальным резонатором и выводом излучения перпендикулярно поверхности полупроводниковой структуры (ВИЛ или VCSEL). В последние годы в технологии производства этого типа лазеров наблюдается очень быстрый прогресс. Их основное преимущество перед торцевыми лазерами состоит в том, что их очень удобно делать в виде линеек или матриц, поэтому в настоящее время они применяются в быстродействующих системах связи с параллельными каналами на коротких расстояниях.

Приемники излучения предназначены для преобразования оптического сигнала обратно в электрический. Как правило, применяются фотодиоды, работающие на принципе р-п-перехода.

Существуют две основные категории фотодетекторов: pin-диоды (positive, intrinsic, negative) и лавинные диоды (avalanche photodiode, APD). К основным параметрам фотодетекторов относятся: время отклика (быстродействие), чувствительность, ли-

нейность, шум и емкость. Чувствительность pin-фотодиодов лежит в диапазоне от 0,8 до 1,0 А/Вт, быстродействие достигает 40 ГГц. Выходной ток обычно несколько микроампер, поэтому требуются трансимпедансные усилители для усиления тока до уровня миллиампер.

Лавинные фотодиоды мощнее и соответственно чувствительнее, но требуют большего напряжения питания, они значительно дороже.

В системах оптической передачи информации на большие (100 км) и средние (от 1 до 10 км) расстояния полупроводниковые лазеры с драйверами и фотодиоды с усилителями компонуются в приемопередающие модули (трансиверы) со стандартными оптическими разъемами для подсоединения оптического волокна.

Когда расстояние сокращается от километров до метров и сантиметров, на первый план выходят проблемы с площадью, занимаемой оптоэлектронными приборами (источники, приемники, трансиверы) разводкой оптических сигналов (волноводы, согласующая оптика), рассеиваемой в тепло мощностью (тепловыделением), интеграцией оптоэлектронных компонентов с логическими компонентами (СБИС). Кроме того, существенно изменяется доля стоимости отдельных элементов в стоимости линии связи в целом. В коротких линиях доля стоимости приемопередающих элементов (трансиверов) становится слишком высокой.

Совокупность этих факторов не позволяет использовать технологии оптических телекоммуникаций, например лавинные фотодиоды, DFB-лазеры с торцевым выходом излучения, некоторые типы модуляторов. Для коротких линий связи больше подходят лазеры с вертикальным резонатором (VCSELs), модуляторы на основе электрооптического поглощения в квантовых гетероструктурах и pin-фотодиоды.

Для оптических систем связи на короткие расстояния требуется разработка новых методов и технологий, к которым в первую очередь относятся:

- технологии более плотной упаковки и интеграции;
- методы разводки оптических сигналов с большим числом каналов, высокой плотностью их упаковки и возможностью разветвления оптического сигнала по нескольким устройствам.

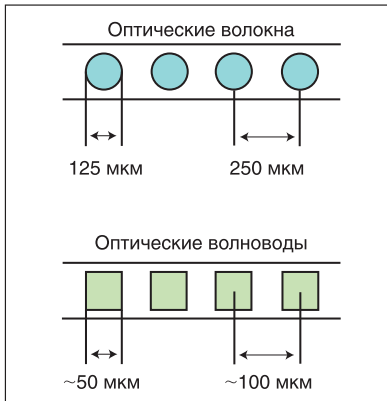


Рис. 5. Волноводные структуры, используемые для создания оптических соединений

Важнейшим элементом системы оптических межсоединений является собственно организация передачи светового сигнала от источников света к приемникам (передающая среда). Основные параметры передающей среды: эффективность передачи энергии, плотность межсоединений и полоса частот. В зависимости от размеров и топологии системы, от метода сборки и требуемой точности сборки будет определяться цена конструкции. Предложено достаточно большое количество оптических направляющих систем, но до настоящего времени нет общей точки зрения относительно наиболее перспективных технологий оптической разводки сигналов. Для организации обмена информацией между чипами можно использовать оптические соединения на основе волноводных структур (оптические волокна, канальные волноводы на печатных платах) или соединения через свободное пространство. Волноводные структуры для создания оптических соединений представлены на рис. 5.

4. Технологии на основе оптических волокон

Главный довод в пользу технологии разводки, основанной на оптических волокнах (ОВ), состоит в развитии производстве ОВ и изделий на базе ОВ. Кроме того, в сравнении с волноводами волокна вносят очень малые потери. Существует множество подходов к использованию устоявшейся технологии

ОВ. В частности используются отдельные волокна, ленточные оптические кабели, двумерные волоконные сборки, волоконно-оптические жгуты разнообразных типов.

Однако главный недостаток оптических соединений, в особенности на основе волокна, состоит в высокой стоимости. Основные усилия поэтому направлены на снижение стоимости и повышение плотности расположения волокон.

Хотя обычно в оптических модулях применяются микролинзы для ввода излучения, в целях экономии во внутрисистемных соединениях крайне желателен ввод напрямую, без линз. Схема распространенного варианта безлинзового ввода излучения в волокно приведена на рис. 6.

Для ввода излучения лазеров с вертикальным резонатором используется зеркало, повернутое на угол 45 град, интегрированное с волноком. Для повышения эффективности применяется волокно с большим контрастом показателей преломления.

Однако сложные комбинации волокон не позволяют организовать массовое автоматическое производство, а требуется кропотливая сборка из отдельных волокон. Вообще, при сравнении двух технологий – на основе оптических волокон и на основе интегральной оптики (волноводы на печатных платах) – можно легко заметить аналогию с двумя технологиями электрических соединений: на основе медных проводов и на печатных платах. Это говорит о том, что будущее – за соединениями на основе оптических волноводов.

5. Технологии оптических канальных волноводов на печатных платах

Оптические волноводные структуры служат для канализации и передачи световых потоков между элементами различных оптоэлектронных и интеграль-

но-оптических устройств. Как правило, по одному волноводу передается один световой канал. В зависимости от приложений волноводы могут формироваться на поверхности или в толще печатной платы. В последнем случае может быть сформировано несколько слоев канальных волноводов (рис. 8).

Волноводы могут быть одномодовыми и многомодовыми. У одномодовых меньше поперечное сечение, поэтому они позволяют организовать межсоединение высокой плотности, но в этом случае требования к механике и юстировке между источниками света и волноводами, а также между волноводами и приемниками значительно возрастают. Кроме того, одно-

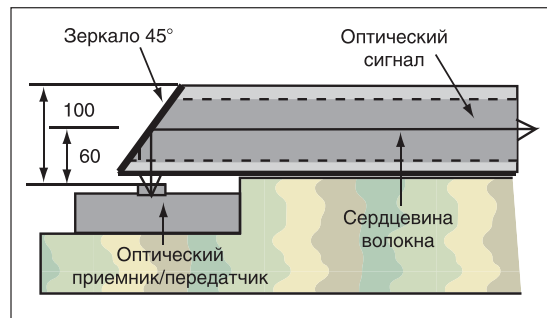


Рис. 6. Устройство ввода излучения в многомодовое волокно

модовые волноводы могут представлять практический интерес только для передачи когерентного излучения. А это ограничивает число подходящих передатчиков. Многомодовые волноводы можно использовать как с когерентными, так и с некогерентными оптическими передатчиками.

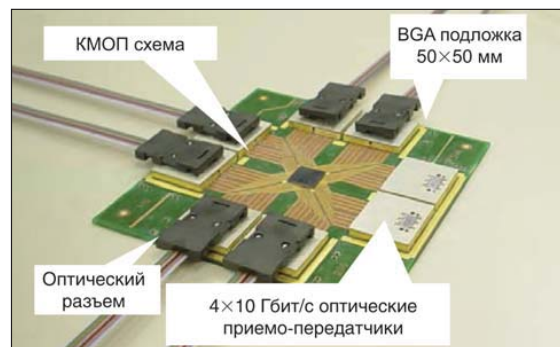


Рис. 7. Пример практической реализации оптического соединения с управляющей микросхемой

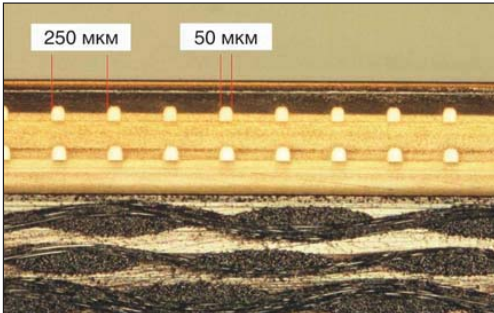


Рис. 8. Печатная плата с двумя полимерными волноводными слоями. Сердцевины волноводов имеют квадратное сечение с длиной стороны 50 мкм. Расстояние между волноводами по горизонтали 250 мкм

Детальные исследования материалов для полимерных волноводов, технологий их создания и применений проведены в ИПЛИТ РАН [16].

Для передачи оптических сигналов по печатным платам фирма IBM разработала технологию, основанную на полимерных многомодовых волноводах размера 50×50 мкм [17]. Стоимость производства таких волноводов может быть достаточно низкой, и требования к точности юстировки существенно ниже, чем для одномодовых волноводов. При этом для коротких расстояний при внутрисистемной связи модовая дисперсия не ограничивает скорости передачи сигналов до ожидаемого уровня 20 Гбит/с. На рис. 8 приведен фотоснимок печатной платы с двумя полимерными волноводными слоями. Сердцевина волноводов имеет квадратное сечение со сторонами 50 мкм, расстояние между волноводами по горизон-

тали равно 250 мкм, а затухание на длине волны 850 мкм равно 0,05 дБ/см. Также была разработана печатная плата с четырьмя слоями полимерных волноводов.

Выравнивание оптических устройств относительно полимерных волноводов – важная часть технологии оптических соединений. Фирмой IBM разработана технология пассивного выравнивания любых оптических элементов относительно волноводов. Она основана на обычных технологиях печатных плат и тем самым обеспечивает экономичное решение.

Для того чтобы решение в целом оказалось экономичным, ввод/вывод излучения от трансивера в волновод должен осуществляться механически, без прецизионных элементов и юстировки. Поскольку из экономических соображений предусматрива-

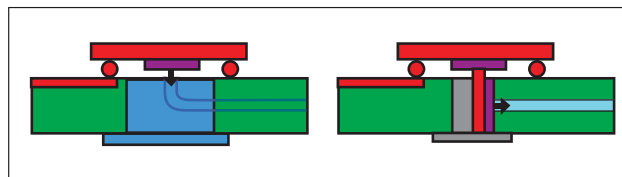


Рис. 9. Сборки приемо-передатчиков (трансиверов) на печатной плате: поворот на 90 град. осуществляется оптическими методами (слева) и электрическими (справа)

ется использование лазеров с вертикальным резонатором (ВИЛ), необходимо осуществить поворот на 90 град либо оптического излучения, либо электрического сигнала. Два возможных варианта, предлагаемых компаниями IBM, показаны на рис. 9.

Для ввода/вывода оптического излучения в волноводы с поворотом на 90 град может использоваться зеркало, наклоненное на 45 град, так же как и при волоконной технологии (см. рис. 6). По такой технологии был собран и испытан прототип системы обмена информацией между СБИС на печатной плате (рис. 10).

Важное достоинство волноводов – совместимость с техноло-

гией электрических печатных плат, которая допускает эволюционный переход на новую технологию. Такой переход не требует радикального изменения принципов построения систем обработки информации.

6. Соединения через свободное пространство

Множество подходов в классе оптических соединений через свободное пространство можно классифицировать, например, по тому как изображение одного набора каналов формируется на другом наборе каналов. Изображение всех каналов некоторого набора может быть сформировано одной апертурой (макрооптика), либо изображения кластеров каналов могут быть сформированы несколькими апертурами меньшего размера (миниоптика), либо изображение каждого канала может быть сформировано индивидуальными апертурами (микрооптика). Дополнительно можно использовать любые

комбинации этих трех вариантов (гибридная оптика). Микрооптические системы формирования изображений очень ограничены по дальности (несколько сантиметров в зависимости от диаметра объективов). С другой стороны, недостатком макроопти-

ки является искажение изображения на периферии (на краях и в углах наборов каналов). Поэтому наиболее перспективными представляются гибридные системы макро- и микрооптики.

Принципиальная особенность оптических систем передачи – это возможность массового параллелизма. Методы формирования и передачи изображений в свободном пространстве позволяют создавать трехмерные схемы передачи с очень большим числом параллельных каналов – 103 и более.

Примером такой разработки стала система, созданная в McGill University (Монреаль, Канада) [18]. В этой работе реализованы оптоэлектронные СБИС с 1080 источниками (ВИЛ-лазерами) и 1080 приемниками (рpn-диоды) и передачей оптических сигналов между ними в свободном

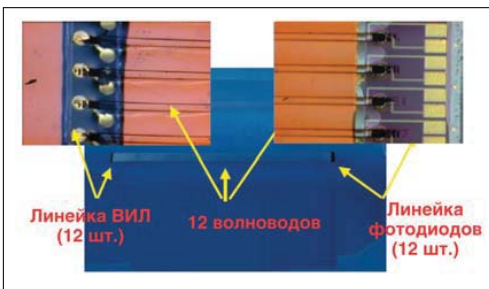


Рис. 10. Полностью собранная система обмена информацией по 12 волноводам на печатной плате [17]

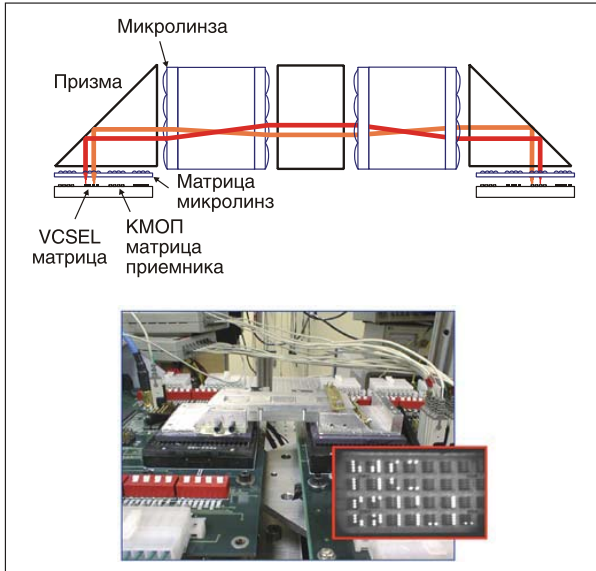


Рис. 11. Многоканальная (540 каналов) оптическая система передачи данных между СБИС

пространстве – всего 540 параллельных дуплексных каналов. Схема демонстрационного модуля показана на рис. 11. В модуле использованы матрицы ВЛЛ-лазеров и фотодиодов с числом элементов 34×35 . Матрицы гибридно интегрированы с КМОП-микросхемами драйверов и усилителей методом пайки перевернутого кристалла. Основные параметры матрицы приемников производства компании BAЕ Systems: активная область 50 мкм, расстояние между приемниками в матрице 125 мкм, чувствительность 0,3 А/Вт, емкость 500 фФ, темновой ток 6 нА. Матрицы лазеров ВЛЛ изготовлены компанией EMCore Corp.: активная область 10 мкм, расстояние между лазерами в матрице 125 мкм, пороговый ток 1,4 мА при напряжении 1,6 В, эффективность 0,3 Вт/А, емкость 500 фФ, внутреннее сопротивление 70 Ом. Скорость передачи в одном канале составляет до 250 Мбит/с. В этой работе, а также в работе [19] (University of Illinois и Sandia National Laboratories, США) продемонстрированы системы с максимальным на сегодняшний день числом параллельных оптических каналов с использованием двумерных матриц ВЛЛ и приемников (1080 и

4096 элементов). В виде многоканальных двумерных матриц также могут быть изготовлены массивы электропоглощающих модуляторов и приемников (4000 элементов) [20]. Но скорости передачи в одном канале таких систем не очень высоки (от 50 до 250 Мбит/с), и, кроме того, технически системы очень сложны, содержат большое число микрооптических элементов и потому реализованы только в экспериментальных демонстрационных образцах.

Одно из потенциальных преимуществ соединений через свободное пространство заключается в малом затухании при распространении в воздухе (несколько дБ/км). Присутствуют также потери на отражение от границ приемников и передатчиков, но

их можно понизить при помощи антиотражающих покрытий. Еще одно потенциальное преимущество таких систем – возможность использования двумерных массивов, обеспечивающая высокую плотность расположения каналов. Оптика свободного пространства не ограничена плотностью расположения передающих каналов и определяется плотностью расположения лазеров с вертикальными резонаторами в массиве. Можно предположить, что ограничения плотности будут связаны с электрическими контактами лазеров и с обеспечением теплоотвода. Основная проблема при использовании метода свободного пространства – необходимость обеспечить положение матрицы приемников с точностью до долей расстояния между элементами излучателей. В случае если расстояние между излучателями мало, а расстояние между источниками и приемниками большое, то оптико-механическая задача становится достаточно сложной, особенно если конструкция должна работать в широком диапазоне температур. При использовании метода свободного пространства может применяться как когерентное, так и некогерентное излучение. Но в случае использования когерентного излучения, оп-

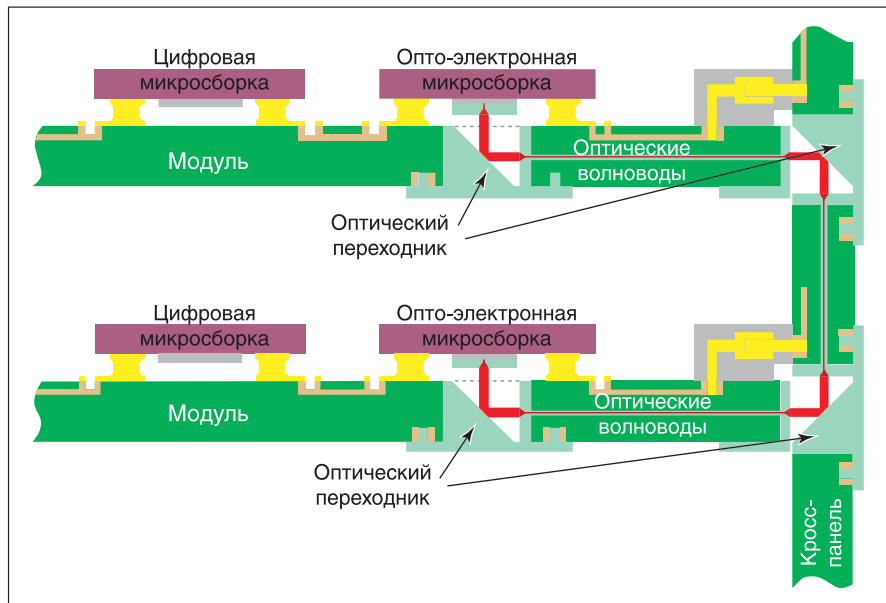


Рис. 12. Схема организации оптического соединения между модулями, использующая волноводы на печатных платах и ввод/вывод излучения на основе технологии свободного пространства [4]

тическая система проще, так как для нее пригодна оптика с меньшими числовыми апертурами. Таким образом, главная проблема соединений через свободное пространство – прецизионная юстировка и выравнивание, необходимые на протяжении всего соединения, а не только в местах стыковки, как в случае волноводных структур. Это ограничивает длину соединений в известных прототипах величиной от нескольких сантиметров до нескольких десятков сантиметров.

Поэтому можно сделать вывод, что в соединениях между платами и между СБИС на плате при расстояниях более нескольких сантиметров предпочтительна волноводная технология. Соединения через свободное пространство могут служить в качестве коннекторов для соединения трансиверов с волноводами и волноводов на разных платах между собой. Пример такого гибридного соединения с разводкой по волноводам и по свободному пространству в соединителях приведен на рис. 12.

Авторы благодарят академика В.Б. Бетелина за поддержку работы и зав. лабораторией ИПЛИТ РАН В.И. Соколова за сотрудничество и полезные обсуждения.

Литература

1. Needs and prospects for ultrahigh-speed optical communication systems // NEDO. Japan, 2005.
2. Miller D.A.B., Ozaktas M. Limit to the bit-rate capacity of electrical interconnects from the aspect ratio of the system architecture // J. Parall. Distrib. Comput. Spec. Iss. Parall. Comput. with Opt. Interconnects. 1997. Vol. 41. P. 4552.
3. Miller D.A.B. Rationale and challenges for optical interconnects to electronic chips // Proc. IEEE. 2000. Vol. 88, No. 6. P. 728.
4. Berger C., Offrein B., Schmatz M. Challenges for the introduction of the board-level optical interconnect technology into product level development roadmaps // Proc SPIE. 2006. P. 6124.
5. Benner A., Ignatowski M., Kash J. et al. Exploitation of optical interconnects in future server architectures // IBM J. Res. Develop. 2005. Vol. 49. P. 755.
6. Goodman J.W., Leonberger F.J., Kung S.-Y., Athale R.A. Optical interconnections for VLSI systems // Proc. IEEE. 1984. Vol. 72. P. 850.
7. Goodman J.W. Fan-in and fan-out with optical interconnections // Opt. Acta. 1985. Vol. 32. P. 1489.
8. Camp L.J., Sharma R., Feldman M.R. Guided-wave and free-space optical interconnects for parallel-processing systems: A comparison // Appl. Opt. 1994. Vol. 33. P. 6168.
9. Fan C., Mansoorian B., Vanblerkom D.A. et al. Digital free-space optical interconnections: A comparison of transmitter technologies // Appl. Opt. 1995. Vol. 34, No. 17. P. 3103.
10. Tooley F.A.P. Challenges in optically interconnecting electronics // IEEE J. Select. Topics Quantum Electron. 1996. Vol. 2. P. 3.
11. Ozaktas H.M. Toward an optimal foundation architecture for optoelectronic computing. 1. Regularly interconnected devices planes // Appl. Opt. 1997. Vol. 36. P. 5682.
12. Ozaktas H.M. Toward an optimal foundation architecture for optoelectronic computing. 2. Physical construction and application platforms // Appl. Opt. 1997. Vol. 36. P. 5697.
13. Yayla G.I., Marchand P.J., Esener S.C. Speed and energy analysis of digital interconnections: Comparison of on-chip, off-chip, and free-space technologies // Appl. Opt. 1998. Vol. 37. P. 205.
14. Krishnamoorthy A.V. Applications of optoelectronic - VLSI technologies // Int. J. Optoelectron. 1998. Vol. 12. P. 155.
15. Berglind E., Thylen L., Jaskorzynska B., Svensson C. A comparison of dissipated power and signal-to-noise ratios in electrical and optical interconnects // J. Lightwave Technol. 1999. Vol. 17. P. 68.
16. Sokolov V.I., Mishakov G.V., Panchenko V.Ya., Tsvetkov M.Yu. Routs to polymer-based photonics. // Proc. Intern. Conf. ILLA/LTL 2006. Bulgaria, Plovdiv, 2006. P. 146.
17. <http://www.ibm.com> .
18. Venditti M.B., Laprise E., Faucher J. et al. Design and test of an optoelectronic-VLSI chip with 540-element receiver-transmitter arrays using differential optical signaling // IEEE J. Select. Topics Quantum Electron. 2003. Vol. 9, No. 2. P. 361.
19. Geib K.M., Choquette K.D., Serkland D.K. et al. Fabrication and performance of two-dimensional matrix addressable arrays of integrated vertical-cavity lasers and resonant cavity photodetectors // IEEE J. Select. Topics Quantum Electron. 2002. Vol. 8. P. 943.
20. Lentine A.L., Goossen K.W., Walker J.A. et al. High-speed optoelectronic VLSI switching chip with 4000 optical I/O based on flip-chip bonding of MQW modulators and detectors to silicon CMOS // IEEE J. Select. Topics Quantum Electron. 1996. Vol. 2. P. 77.



Журнал Lightwave Russian Edition приглашает специалистов стать авторами обзорно-аналитических статей

Принимаются статьи по всем областям волоконно-оптической связи

Главное требование к рукописям – интересный и актуальный материал.
Рукописи проходят обязательное рецензирование. К публикации принимаются статьи,
получившие положительный отзыв рецензента.
Требования к рукописям см. на сайте журнала www.lightwave-russia.com