



# ОПТИЧЕСКИЕ МЕЖСОЕДИНЕНИЯ В ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ

М.Белкин, д.т.н., А.Сизов, д.ф.-м.н. / rector@mirea.ru

**П**рименение оптоэлектронного подхода для формирования соединительных линий в интегральных схемах (ИС) на кремниевых подложках представляет значительный интерес. В этой связи в работе рассмотрены наиболее близкие к практической реализации технологии и методы межсоединений в таких ИС, анализируются потенциальные преимущества и проблемы оптоэлектронного подхода.

Поводом для постановки работы послужили значительные отличия в оценке возможности реализации высококачественных межсоединений в монолитных ИС на базе существующих электрических линий по их геометрии и уровню масштабирования. В частности, на базе изучения физико-технических пределов медных проводников предсказывается, что ИС будет неработоспособна при шаге металлизации 22 нм [1]. С другой стороны, в результате изучения электрических соединительных линий с сосредоточенными и распределенными параметрами [2] делается вывод, что при их взаимной оптимизации с приемопередающими узлами нет необходимости переходить к оптическим межсоединениям, по крайней мере, до уровня масштабирования 8 нм, что, согласно прогнозу ITRS-2011, будет достигнуто после 2024 года. Вместе с тем авторы всех рассмотренных исследований и обзоров сходятся во мнении, что оптические межсоединения наиболее перспективны для данных целей. В соответствии с этим, принято решение о проведении собственной оценки.

## МЕЖСОЕДИНЕНИЯ В ГИБРИДНЫХ И МОНОЛИТНЫХ ИС

С помощью оптоэлектронного подхода можно решить многие физические проблемы межсоединений, в том числе обеспечить прецизионное распределение хранимых сигналов, расширить зону действия централизованной системы синхронизации внутри и между кристаллами, увеличить полосу пропускания и плотность "длинных" соединительных линий, уменьшить потребляемую мощность [3]. При проектировании

современных высокоскоростных и сверхвысокочастотных ИС оптические интерфейсы могут значительно упростить решение широкого спектра задач, таких как перекрестные помехи, изолирование потенциалов, отражение волн, согласование импедансов, влияние индуктивности выводов. Для реализации оптических межсоединений, в принципе, не требуются прорывы на физическом уровне, однако существуют серьезные технические и технологические проблемы. Серьезным барьером являются также экономические трудности, хотя и в этом направлении намечались определенные достижения [4].

В целом цифровая обработка информации требует наличия нелинейного устройства, схем для выполнения логических функций и хранения, межсоединений для переноса информации. Продолжающееся экспоненциальное сокращение характерных размеров кристаллов ИС, известное как закон Мура [1], приводит к постоянному повышению уровня интеграции при сокращении стоимости электронных приборов. Эта эволюция смещает баланс между выполняющими отдельные операции ИС и линиями для их соединения в цифровых системах обработки информации, причем корректное масштабирование последних приобретает все большее значение.

Проблема соединительных линий имеет давнюю историю. Например, практически во всех современных телекоммуникационных сетях из-за чрезмерно больших потерь на высоких частотах в проводных электрических линиях передачи связь между узловыми станциями и удаленными объектами осуществляется посредством волоконно-оптических кабелей. Проблема актуальна



и для компьютерных систем, поскольку электрические шины, связывающие их функциональные узлы, как правило, работают с существенно меньшей скоростью по сравнению с тактовыми частотами отдельных ИС. Проблема масштабирования межсоединений специально отмечалась в дорожных картах Ассоциации полупроводниковой промышленности США (SIA) еще 15 лет назад [5]. Согласно им уже в обозримом будущем глобальные межсоединения станут серьезным препятствием на пути развития не только ИС в гибридном исполнении, но и для распределения сигналов внутри больших интегральных схем (БИС).

Предложены различные подходы, в той или иной степени разрешающие проблему межсоединений. С практической точки зрения, наиболее интересными считаются:

- изменение принципов построения ИС для минимизации длины межсоединений;
- проектирование ИС с учетом общей топологии сети соединительных линий;
- улучшение качества передачи сигналов по соединительным линиям, например, за счет схем выравнивания [6–8];
- изменение физических принципов реализации межсоединений.

Первые три подхода отдельно либо в сочетании позволяют снизить остроту проблемы, и только четвертый подход может обеспечить ее кардинальное решение. Следует подчеркнуть, что отмеченные выше трудности электрических межсоединений нельзя свести лишь к пропорциональному уменьшению емкости линий передачи, поскольку одновременно возникает целый набор проблем, например, изолирование электрических потенциалов, точность синхронизации, простота проектирования ИС. Последняя может оказаться наиболее важной. В частности, электрическая шина данных, спроектированная на верхнюю рабочую частоту 1 ГГц,



А. Сигов, ректор МИРЭА, академик РАН



М. Белкин, заведующий объединенной научно-исследовательской лабораторией "Сверхвысокочастотные и опто-электронные устройства", факультет электроники МИРЭА, д.т.н.

вследствие влияния дополнительных потерь и паразитных эффектов (индуктивность длинной линии, переходные помехи близко расположенных линий, отражения от их концов и неоднородностей) скорее всего не обеспечит требуемого качества передачи сигналов даже при повышении рабочей частоты на 20%. В отличие от этого, характеристики оптической линии, разработанной на ту же верхнюю частоту, останутся неизменными при значительном повышении рабочей частоты, поскольку по существу она никак не влияет на распространение оптического сигнала.

Помимо оптического исследуются и другие физические подходы к улучшению электрических межсоединений, включая охлаждение кристаллов ИС или всей микросборки (для уменьшения активных потерь в линиях), применение сверхпроводящих линий передачи, нанопроводов, карбоновых нанотрубок, графеновых нанолент [9]. Охлаждение до температур, ниже комнатной, уже реализовано в некоторых компьютерах. Технологический уровень также допускает использование криогенного охлаждения. Однако понижение температуры связано со значительным повышением энергетических затрат и общих

размеров устройств, что должно привести к ухудшению их экономических и массогабаритных характеристик. Сверхпроводящие материалы пока не работают при комнатной температуре, и использование сверхпроводников также потребует охлаждения, например, до температуры жидкого азота. Таким образом, для реализации данного подхода должны быть разработаны новые реально высокотемпературные материалы.

Улучшение теплоотвода может быть также обеспечено за счет применения многослойных подложек или печатных плат с промежуточными металлическими слоями. Уже освоено производство



семислойных подложек и разрабатываются платы с большим числом металлических слоев. Однако это приводит к значительному увеличению стоимости изготовления. Кроме того, пока не ясна применимость данного подхода для разработки высокоскоростных ИС с развитой периферией, поскольку металлические слои существенно увеличивают паразитную емкость соединительных линий.

Также при проектировании функциональных узлов ИС можно рассмотреть совместное использование внешней (например, с помощью отдельного кристалла) и внутренней электрических разводок. В общем, оптимизация позволит облегчить проблему межсоединений, однако не решит ее кардинально даже в многослойной структуре.

Еще одно интересное решение – трехмерный монтаж кристаллов в монолитной либо гибридной микросборке с вертикальными межсоединениями (этажерочная конструкция). Подход перспективен с точки зрения улучшения массогабаритных характеристик ИС, поскольку площадь микросборки не увеличивается. Однако пока нет четкого решения задачи эффективного теплоотвода, так как нет существенного увеличения рассеивающей тепло поверхности. Недостаток, связанный с увеличением рассеиваемой мощности, может до некоторой степени быть скомпенсирован за счет использования более коротких соединительных линий. Тем не менее, такие трехмерные конструкции не позволяют серьезно снизить ограничения по масштабированию межсоединений. Кроме того, они не обеспечивают решение проблемы повышения качества передаваемых по соединительным линиям сигналов (изоляция электрических потенциалов, точность синхронизации, простота топологии ИС и микросборки). Таким образом, решения, основанные на сохранении физического принципа межсоединений, не позволяют кардинально разрешить их проблемы, исходя из потребностей повышения скорости формирования и обработки информации и уровня интеграции. Как следствие, требуется принципиально иной подход.

Хотя оптоэлектронный подход к реализации высококачественных и высокоскоростных межсоединений в ИС считается одним из наиболее перспективных [11], его практическая реализация связана с необходимостью решения большого объема научно-технических и технологических задач. Наиболее важная из них относится к разработке новых методов, позволяющих создать между кристаллами в микросборке либо в пределах полупроводникового кристалла в ИС оптические

интерфейсы и среду передачи с высокой пространственной плотностью линий. В каждом полупроводниковом кристалле должны быть сформированы, по крайней мере, сотни или, более вероятно, тысячи оптических каналов передачи сигналов. Без решения этой задачи большинство соединительных линий между кристаллами и относительно длинных межсоединений внутри кристалла еще долго будут оставаться электрическими.

Кроме того, современные оптическая и оптоэлектронная технологии, гораздо более сложные по сравнению с электрической, развиты исключительно для дальней электросвязи. Наиболее важные различия состоят в необходимости обеспечить сверхмалое энергопотребление, минимальное время готовности к работе, малые физические размеры, способность интеграции с кремниевой электроникой, являющейся основной массовой технологией производства ИС [9]. Такие ограничения не требуются в существующих телекоммуникационных системах. Подходы для построения линий большой протяженности, скорее всего, не будут жизнеспособными для межсоединений высокой плотности с длиной, не превышающей несколько сантиметров. Потребуется, например, распределенный принцип построения. Тем не менее, исследованные возможности оптической и оптоэлектронной технологий применительно к межсоединениям в ИС позволяют считать данный подход перспективным.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПРЕИМУЩЕСТВ ОПТИЧЕСКИХ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ

Серьезное изучение проблемы оптических межсоединений в ИС началось в конце прошлого столетия. Поэтому сейчас известно относительно большое число примеров, в основном описывающих результаты лабораторных разработок высокоскоростных соединений между кремниевыми ИС высокого уровня интеграции. Анализ их позволяет классифицировать основные преимущества оптоэлектронного подхода. В частности, их можно грубо разделить на следующие категории: геометрические (уменьшение размеров линий), дизайнерские (упрощение топологии ИС), параметрические (улучшение прозрачности канала передачи, электромагнитной совместимости БИС), производственные (развитость оптических технологий).

## ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА

Они в основном связаны с возможностью преодоления физических ограничений, свойственных



электрическим линиям передачи. Наибольшее значение имеет аспектное соотношение. Этот параметр можно определить как отношение длины линии передачи к ее поперечному сечению с учетом распространения электромагнитного поля. Все электрические линии обладают резистивностью и емкостью, которые являются причиной увеличения длительности фронтов передаваемого цифрового сигнала. С повышением скорости передачи это приводит к увеличению вероятности недостоверного приема информации, выражающейся в повышении основного параметра качества цифровой системы передачи: коэффициента ошибок.

Пояснить проблему можно с помощью простой RC-модели двухпроводной линии, геометрия которой показана на рис.1, где  $l$  – длина линии,  $A$  – ее эффективное сечение с учетом распространения электрического поля, определяющего минимально допустимое расстояние между двумя близко расположенными линиями. Опыт показывает корректность такой простой модели для исследования линий передачи с малой площадью поперечного сечения.

В модели емкость между проводниками и землей  $C$  заряжается через объемное сопротивление проводников  $R$ . Обозначим погонную емкость (емкость на единицу длины) линии как  $C_1$ , а погонное сопротивление (сопротивление на единицу длины) линии как  $R_1$ . Тогда общая постоянная времени линии

$$\tau = R_1 C_1 l^2. \quad (1)$$

Для моделирования масштабируемости линии по всем трем направлениям введен линейный коэффициент  $s$ . Тогда уменьшение поперечного сечения линии вызовет изменение погонного объемного сопротивления  $R_1/s^2$ , а погонная емкость линии останется той же, поскольку определяется ее геометрией, а не размерами, т.е.:

$$\tau_1 = (R_1/s^2) C_1 (ls)^2 = R_1 C_1 l^2. \quad (2)$$

Из (1) и (2) можно сделать вывод, что масштабирование размеров линии передачи не приводит к изменению ее постоянной времени. Этот вывод указывает, по крайней мере, на три проблемы, связанные с масштабированием в ходе проектирования высокоскоростных ИС на базе электрических межсоединений:

- уменьшение размеров кристалла ИС, как правило, приводит к повышению быстродействия активных элементов, но не влияет на

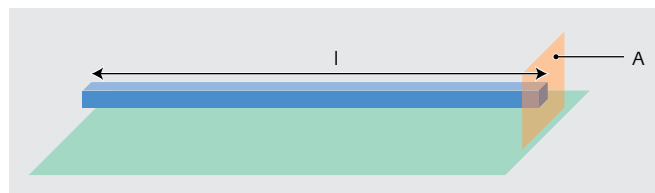


Рис. 1. Геометрия моделируемой электрической линии передачи

увеличение полосы пропускания соединительных линий;

- общее время задержки прохождения сигнала преимущественно определяется задержкой в межсоединениях;
- проблема уменьшения задержки в межсоединениях не может быть решена за счет миниатюризации узла.

Важно отметить, что изучаемую проблему, в принципе, нельзя решить с помощью оптимизации топологии схемы соединительных линий, поскольку сближение проводников вызывает увеличение емкости, а разнесение приводит к увеличению активного сопротивления вследствие роста эффективного поперечного сечения.

Обобщение полученного результата на линии передачи цифровых сигналов дает: полное активное сопротивление  $R$  электрической линии длиной  $l$  пропорционально  $l/A$ , полная емкость для данной геометрии пропорциональна длине линии и не зависит от ее поперечного сечения, т.е. RC – постоянная времени – пропорциональна  $l^2/A$ . Если упрощенно считать, что скорость передачи  $V$ , бит/с, которую можно обеспечить в линии без перекрытия соседних бит импульсной последовательности, обратно пропорциональна произведению RC, получается:  $V \sim A/l^2$ .

Таким образом, следуя определению аспектного соотношения линии, можно считать, что предельная скорость передачи в линии обратно пропорциональна этому параметру и длине. Важно, что при таком определении поперечного сечения  $A$  не имеет значения, используется ли одна высокоскоростная линия с большим поперечным сечением либо множество параллельных низкоскоростных линий, общее сечение которых соответствует  $A$ . Тогда данное рассмотрение справедливо в случае исследования глобальной схемы электрической разводки ИС. Кроме того, если принять во внимание проводимость медных проводников и типичную емкость между двумя проводниками, можно определить связь предельной скорости передачи и аспектного соотношения RC-линии [8]:





$$B \cong 10^{16} \frac{A}{l^2}. \quad (3)$$

Для высоких скоростей передачи более корректна LC-модель электрической линии, в которой фронт импульса ограничивается зависящим от верхней частоты передаваемого спектра сопротивлением вследствие скин-эффекта. С учетом этого [8]:

$$B \cong 10^{15} \frac{A}{l^2}. \quad (4)$$

Проведем количественную оценку предельной скорости передачи, задавшись типичными для гибридной ИС значениями эффективного сечения  $0,01 \text{ мм}^2$  и длины  $10 \text{ мм}$ . Из (4) она получается:  $B = 100 \text{ Гбит/с}$ .

Поскольку вышеприведенная оценка проводилась на базе элементарной модели длинной линии, полученное значение можно считать верхней границей применимости электрических межсоединений. Тем не менее, даже такие высокие скорости актуальны в связи с принятием стандарта IEEE P802.3ba, нормирующего параметры канала передачи со скоростью  $100 \text{ Гбит/с}$  в соединительных линиях между кристаллами ИС и между кристаллом и модулем [10].

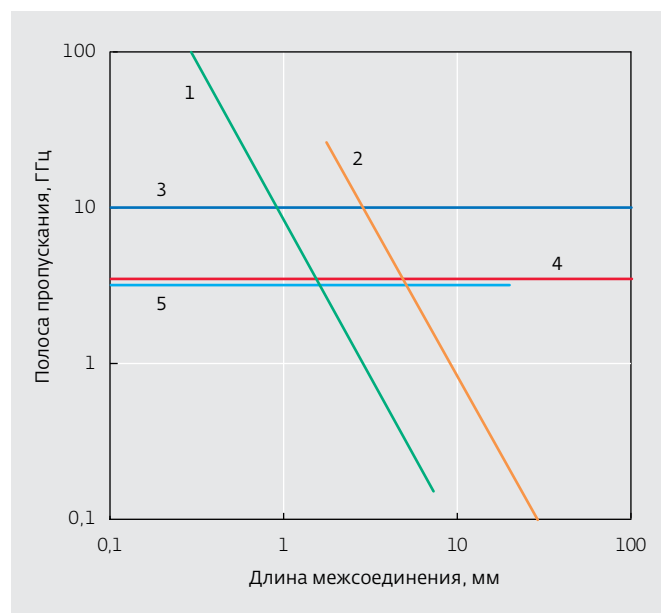


Рис.2. Связь полосы пропускания (тактовой частоты) и длины межсоединения в кристалле (результаты расчета): 1 – межсоединение в ИС на базе меди сечением  $1 \times 1 \text{ мкм}^2$  (уточненная LC-модель); 2 – то же межсоединение (уточненная RC-модель); 3 – тактовая частота  $10 \text{ ГГц}$ ; 4 – тактовая частота  $3,5 \text{ ГГц}$ ; 5 – межсоединение сечением  $1 \times 1 \text{ мкм}^2$  при использовании репитера

Более корректные выводы можно сделать при комплексной оценке системы передачи с учетом специфики применения рассматриваемых межсоединений [2]. В частности, при их анализе внутри кристалла ИС необходимо учитывать следующее.

- Для повышения качества передаваемых сигналов в современных БИС приходится использовать "репитеры", обеспечивающие расширение полосы "длинных" соединительных линий. Это приводит к существенному увеличению энергопотребления и усложнению топологии многослойной ИС вследствие большого числа переходных отверстий для связи их с такими линиями и разводки шины питания.
- Помимо полосы пропускания важным параметром линии передачи является групповая скорость распространения сигнала, поскольку архитектуру БИС предпочтительно строить на базе синхронного взаимодействия функциональных узлов. В этом случае трудно обеспечить стабильность работы ИС, если время распространения сигнала по линии превышает его тактовый период.
- Функционирование линии внутри кристалла почти во всех случаях можно описать с помощью рассмотренной выше RC-модели.

Полученные на основе подхода, описанного в [11], результаты анализа зависимости полосы пропускания и времени задержки от длины соединительной линии внутри кристалла современной ИС с учетом данных замечаний представлены на рис.2 и 3.

На рис.2 обозначены результаты расчета межсоединения внутри кристалла ИС на базе медного проводника эффективным сечением  $1 \times 1 \text{ мкм}^2$  с помощью уточненной LC-модели и того же межсоединения с помощью уточненной RC-модели согласно (3). Также на рисунке отмечены линия тактовой частоты  $f_T = 10 \text{ ГГц}$ , линия тактовой частоты  $f_T = 3,5 \text{ ГГц}$  и результаты расчета того же межсоединения при использовании репитера. Из рисунка можно получить более реалистичные оценки предельной полосы пропускания (скорости передачи) при использовании электрических межсоединений, принимая расчеты по LC- и RC-моделям в качестве нижней и верхней границ оценочного интервала. При тактовой частоте  $10 \text{ ГГц}$  предельная длина межсоединения составляет  $0,8\text{--}3 \text{ мм}$ , а при  $3,5 \text{ ГГц}$  –  $1,5\text{--}5 \text{ мм}$ . В соответствии с третьим замечанием более реалистичной границей длины межсоединения, при которой обеспечиваются преимущества оптоэлектронного подхода, можно



считать величину, близкую к верхнему пределу. Использование репитера при тактовой частоте 3,5 ГГц (линия 5) обеспечивает независимость полосы пропускания от длины межсоединения.

На рис. 3 обозначены: результат расчета задержки импульса\* с помощью уточненной RC-модели для межсоединения внутри кристалла ИС на базе медного проводника эффективным сечением  $1 \times 1$  мкм<sup>2</sup>; задержка в кремниевом кристалле, соответствующая одному тактовому периоду сигнала для  $f_T = 3,5$  ГГц; линия тактового периода при передаче сигнала с тактовой частотой 3,5 ГГц; линия тактового периода при передаче сигнала с  $f_T = 10$  ГГц. Согласно рисунку, задержку импульса менее тактового периода можно обеспечить при длине межсоединения до 22 мм на тактовой частоте 3,5 ГГц и до 13–10 ГГц. График на рис.3 также дает возможность сравнить времена задержки импульса и задержки распространения сигнала. Как видно, синхронная работа ИС при тактовой частоте 3,5 ГГц может обеспечиваться при длинах линии до 18 мм.

Анализ рис.2 и 3 позволяет сделать вывод, что при использовании электрических межсоединений уже возникают проблемы с обеспечением необходимой полосы пропускания (скорости передачи) для распределения цифровых импульсных последовательностей и необходимой задержки при распределении тактовой синхронизации внутри БИС с тактовой частотой 3,5 ГГц. Такая скорость достигается при технологии 90 нм. Эти проблемы еще более обострятся при переходе к новым поколениям БИС. Например, согласно прогнозу ITRS-2010, тактовая частота 10 ГГц в соединительных линиях внутри кристалла будет достигнута к 2017 году.

## ДИЗАЙНЕРСКИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА

Одно из преимуществ оптоэлектронного подхода к межсоединениям, которое в полной мере может проявиться только при развитой технологии, состоит в упрощении общей топологии разводки внутри кристалла, поскольку такой подход позволяет избежать проблем с ухудшением качества передачи сигналов по мере повышения скорости работы активных узлов и плотности расположения соединительных линий. Базой для реализации такого упрощения могут стать три известные особенности распространения электромагнитного излучения оптического диапазона в конденсированных средах: отсутствие взаимовлияния, независимость

параметров сигнала от длины линии, независимость от частоты модулирующего сигнала.

Первая особенность связана с отсутствием необходимости учитывать при проектировании топологии оптических шин согласования импедансов, переходных помех и накопления энергии в индуктивных элементах. Кроме того, в отличие от электрических, оптические межсоединения не подвержены влиянию внешних электромагнитных помех.

Вторая особенность объясняется малыми потерями и достаточно высокой линейностью оптического сигнала в кремниевом волноводе. Таким образом, с увеличением его длины в пределах, необходимых для любого типа межсоединений, не произойдет ухудшения качества передаваемого сигнала, возрастания переходных помех и увеличения требований к мощности источника излучения.

Третья особенность связана с тем, что несущая частота оптического сигнала (около  $10^{15}$  Гц), по крайней мере, на три порядка выше верхней частоты модуляции в самых перспективных телекоммуникационных системах. Тогда при распространении оптического излучения в межсоединениях любого типа можно не принимать во внимание

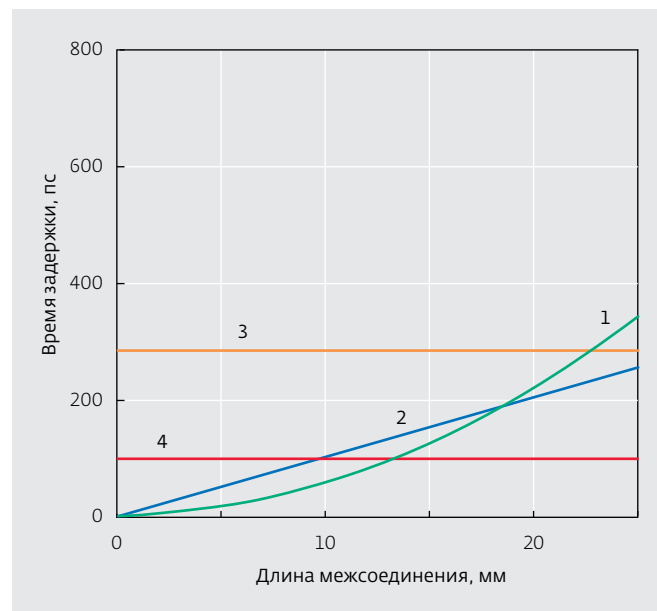


Рис.3. Связь времени задержки сигнала и длины межсоединения: 1 – расчет задержки импульса по RC-модели для межсоединения в ИС на базе медного проводника сечением  $1 \times 1$  мкм<sup>2</sup>; 2 – задержка в кристалле, соответствующая тактовому периоду для  $f_T = 3,5$  ГГц; 3 – тактовый период сигнала для  $f_T = 3,5$  ГГц; 4 – тактовый период сигнала для  $f_T = 10$  ГГц

\* На уровне 0,5 от установившегося значения амплитуды импульса.



искажение формы передаваемых импульсов вследствие материальной дисперсии.

### ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА

Наиболее явные параметрические преимущества оптоэлектронного подхода в межсоединениях на данном начальном этапе выражаются в уменьшении мощности рассеяния и изоляции электрических потенциалов. Уменьшение мощности рассеяния происходит за счет отсутствия необходимости ресинхронизации в ИС с использованием малоэффективных буферных каскадов и схем фазовой синхронизации, а также благодаря эффекту квантового преобразования импедансов [12] с помощью оптоэлектронной пары лазер-фотодиод. Изолирование электрических потенциалов между источником и нагрузкой оптической соединительной линии является следствием квантовой природы генерирования и детектирования оптического излучения. В основе работы оптического детектора лежит счет фотонов, а не измерение напряжения, как в электрическом детекторе, благодаря чему обеспечивается совершенная изоляция. Этот эффект уже широко используется в оптроне. Данное преимущество может стать весьма значительной и важной причиной применения оптоэлектронных межсоединений в ИС следующих поколений в связи с постоянным уменьшением величины питающих напряжений, а следовательно, ужесточения допусков на их изменение и увеличения токов потребления.

### ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА

К основным особенностям применения оптических межсоединений в ИС, обеспечивающим потенциальные преимущества при их производстве, можно отнести технологичность массового производства и простоту тестирования в ходе такого процесса. Первая особенность определяется зрелостью современных оптических технологий производства компонентной базы и оптоэлектронных модулей, а также при переходе к оптическим межсоединениям отсутствием необходимости дальнейшего развития многослойной электрической разводки, связанного с большими затратами финансовых и трудовых ресурсов. Второе преимущество определяется возможностью бесконтактного тестирования при изготовлении ИС. Именно с помощью оптических средств можно практически без деградации передавать высокоскоростные цифровые на значительные расстояния, что позволяет исключить дорогостоящие и недостаточно надежные в измерениях сверхвысокочастотные электрические зонды.

Кроме того, в ходе бесконтактного тестирования число параллельных оптических лучей может быть значительно увеличено по сравнению с существующей практикой, благодаря чему можно ускорить процесс тестирования при массовом производстве ИС. Важно также отметить, что бесконтактное тестирование позволит избежать повреждения кристаллов на полупроводниковой пластине и увеличить процент их выхода.

### Литература

1. **Цветов В.** Развитие классической микроэлектроники. Ожидаемые физико-технические пределы. – Электроника: НТБ, 2010, №3, с.2–6.
2. **Stucchi M.** et al. Benchmarking On-chip Optical Against Electrical Interconnect for High-Performance Applications. 2011 IEEE International Interconnect Technology Conference, ИТС/МAM, 2011, p.1–3.
3. **Goodman J.W.** et al. Optical interconnections for VLSI systems. – Proceedings of IEEE, 1984, v.72, p.850–866.
4. **Ohashi K.** et al. On-Chip Optical Interconnect. – Proceedings of the IEEE, 2009, v.97, №7, p.1186–1198.
5. The National Technology Roadmap for Semiconductors—Technology Needs. – Semiconductor Industry Association, 1997.
6. **Dally W.J., Poulton J.** Transmitter equalization for 4-Cbps signaling. – IEEE Micro, Jan./Feb., 1997, p.48–56.
7. **Horowitz M., Yang C.K.K., Sidiropoulos S.** High-speed electrical signaling: Overview and limitations. – IEEE Micro, Jan./Feb., 1998, v.18, №1, p.12–24.
8. **Miller D.A.B., Ozaktas H.M.** Limit to the bit-rate capacity of electrical interconnects from the aspect ratio of the system architecture. – Journal of Parallel and Distributed Computing, 1997, v.41, p.42–52. (Special Issue on Parallel Computing with Optical Interconnects).
9. Interconnect Working Group. 2011 Revision. ITRS 2011 Winter Meeting – 14 Dec. 2011, Seoul, Korea.
10. **Anderson J., Traverso M.** Optical transceivers for 100 gigabit Ethernet and its transport. – IEEE Communications Magazine, 2010, v.48, №3, p.S35–S40.
11. **Miller D.A.B.** Device Requirements for Optical Interconnects to Silicon Chips. – Proceedings of the IEEE, 2009, v.97, №7, p.1166–1185.
12. **Kibar O., VanBlerkom D.A., Fan C. and Esener S.C.** Power minimization and technology comparisons for digital free-space optoelectronic interconnections. – IEEE Journal of Lightwave Technology, 1999, v.17, p.546–555.