

БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ НА КРИСТАЛЛЕ

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ИДЕИ И МЕТОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ

Д.Слюсар, В.Слюсар swadim@inbox.ru

При проектировании систем на кристалле перед разработчиками часто стоит проблема задержек и рассинхронизации сигналов. Различные методы организации сетевых структур на кристалле, теоретически позволяющие минимизировать задержки и потери, имеют недостатки и сложны в реализации. Наиболее перспективным путем решения этой проблемы представляется парадигма беспроводных сетей на кристалле, которая позволяет обойти ограничения классических сетей, а также обеспечить связь между наномасштабными компонентами микросхем и макроуровнем.

СЕТИ НА КРИСТАЛЛЕ

Парадигма сети-на-чипе (Network on Chip, NoC) возникла как методология проектирования мультядерных чипов [1] и стала важным направлением развития систем на кристалле (System on chip, SoC). Возможности NoC с традиционной двумерной топологией были ограничены высокими временными задержками передачи сигналов и энергетическими потерями, возникающими из-за омического сопротивления и деления мощности при разветвлении цепей. Для решения этих проблем предлагались различные методы – использование радиочастотных [2] и оптических волноводных [3] линий, а также трехмерной архитектуры NoC [4] – перспективного направления, позволяющего преодолеть ограничения закона Мура. Но все эти технологии имеют серьезные недостатки. Высокая интеграция элементов NoC в трехмерном исполнении усложняет отвод тепла из центральных областей и ухудшает температурный режим при работе на высоких частотах. Задача размещения в микросхеме большого количества оптических волноводов и интегрированных оптоэлектронных устройств технологически сложна и нетривиальна, а для достижения высокой пропускной способности радиочастотных

линий необходимо множество высокочастотных генераторов и фильтров. Все эти сложности заставили разработчиков искать иные пути обхода ограничений классических сетей на кристалле с металлическими проводниками.

ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ

В последнее время усилия многих специалистов сосредоточились на теории создания беспроводных сетей на чипе (Wireless Network on Chip, WiNoC) [5]. Нужно отметить, что идея WiNoC важна также и для развития нанотехнологий. На сегодняшний день актуальна проблема обеспечения электрического контакта наноэлектронного устройства или схемы и макроскопического элемента без существенных потерь в достижимой на наноуровне плотности тока. Используемый сейчас метод литографического изготовления контактных площадок неэффективен для широкомасштабной параллельной обработки сигналов, требующей объединения множества наносистем на кристалле.

Эту проблему можно решить с помощью беспроводной связи. Для реализации бесконтактных соединений между слоями микросхемы могут

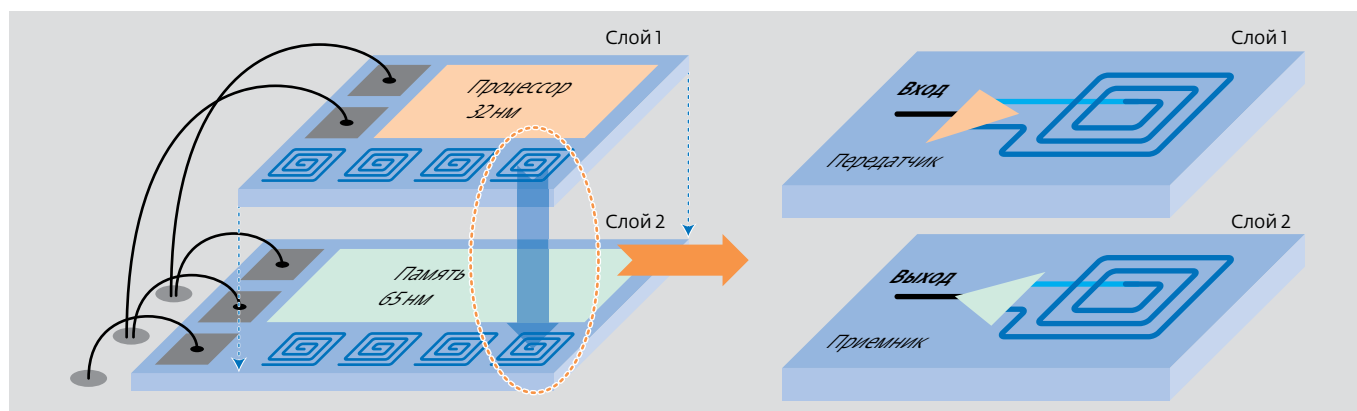


Рис.1. Реализация индуктивной связи [10]

использоваться эффекты емкостной связи между миниатюрными контактными площадками [6] или индуктивной – между спиральными катушками индуктивности [7].

Как отмечено в [8], реализация емкостной связи при толщине слоя более 1 мкм требует мощности более 10 мВт на одиночный контакт, что неприемлемо при большом (>1000) количестве связей между чипами. Впрочем, по сравнению с проводными соединениями величину 10 мВт можно считать неплохим показателем. Например, при скорости передачи данных

23 Гбит/с традиционный проводной контакт рассеивает мощность около 200 мВт, а контактная пара на основе металлических микросфер – 20 мВт. Тем не менее, энергетически выгодней применять индуктивную связь (рис.1). Например, при технологической норме изготовления индукторов 90 нм при скорости 23 Гбит/с рассеиваемая мощность снижается до 2 мВт на контакт или – в пересчете на удельное энергопотребление – до рекордных 0,11 пикоДж/бит в режиме передачи данных и 0,03 пикоДж/бит – в режиме приема [9].

Дополнительной иллюстрацией к сказанному может служить рис.2. Для типового рабочего диапазона значений S_{21} (закрашенный прямоугольный участок на графике) у емкостного интерфейса удельное сопротивление на три порядка больше, чем у индуктивного. Поэтому использование емкостной связи возможно только при передаче данных в двух смежных слоях микросборки, тогда как для индуктивного варианта это удастся сделать без существенных потерь в энергетике сигнала даже при числе слоев более трех.

Результаты моделирования показали, что для получения достаточно большого коэффициента магнитного сцепления размер катушки индуктивности должен быть как минимум в два раза больше, чем расстояние между индукторами в соосной паре (рис.3). Чтобы повысить чувствительность индуктивного перехода, дополнительно в цепь индуктора подключают конденсатор. Получившийся в результате резонансный LC-контур должен быть настроен на максимум спектральной полосы сигналов.

Для реализации многоканальной индуктивной связи используются параллельно расположенные решетки индукторов с шагом 20–30 мкм (рис.4). Примечательно, что согласно [9] для шага 30 мкм нарушение соосности индуктивной пары

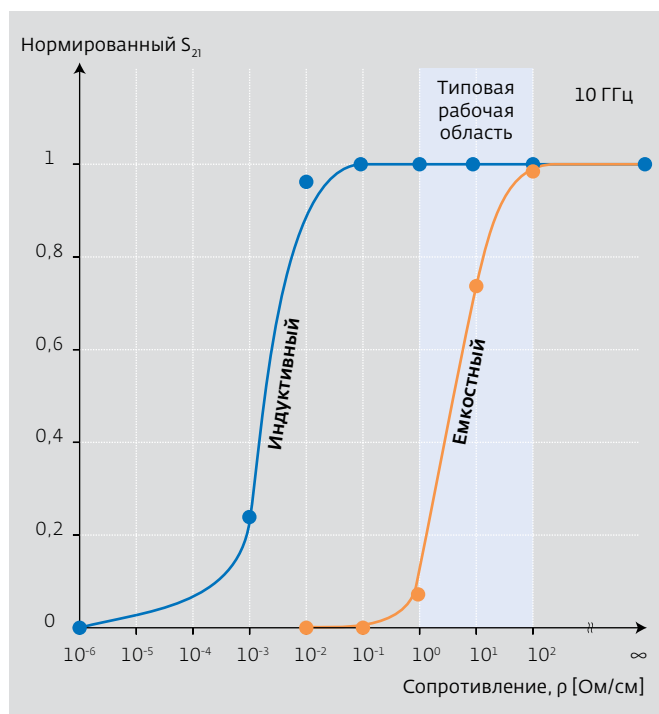


Рис.2. Зависимость нормированного коэффициента передачи от удельного сопротивления для индуктивного и емкостного контактов

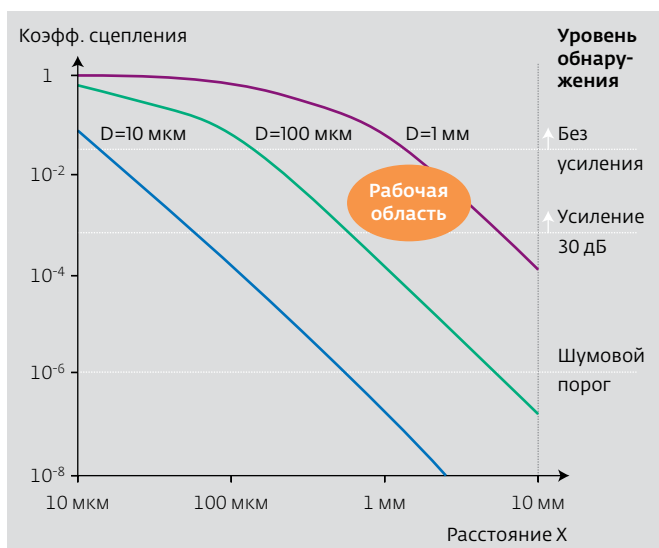


Рис.3. Зависимость коэффициента индуктивной связи в свободном пространстве от расстояния и размеров квадратно-рамочного индуктора [9]

в 3 мкм может быть скомпенсировано 5%-ным повышением мощности сигнала. В то же время в работе [8] требования к точности выравнивания взаимного положения индукторов снижены примерно до половины размера катушки индуктивности. В целом же для увеличения развязки соседних индуктивных каналов может использоваться многофазное кодирование импульсных сигналов во времени в смежных индукторах.

В работе [9] предложен локальный беспроводный интерфейс (LWI) передачи данных в стеке из десяти и более чипов толщиной 50–2000 мкм, основанный на использовании индуктивной связи. В демонстрационном образце микросхемы, выполненной по CMOS-технологии 0,25 мкм, с помощью индукторной пары между двумя чипами в стеке была достигнута скорость передачи данных 800 Мбит/с при напряжении 2,5 В и рассеиваемой мощности 9 мВт. Энергопотребление можно снизить, используя

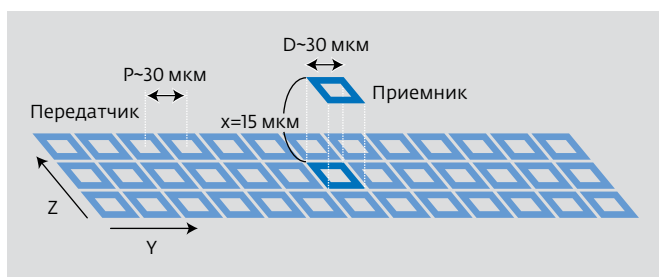


Рис.4. Реализация многоканальной индуктивной связи

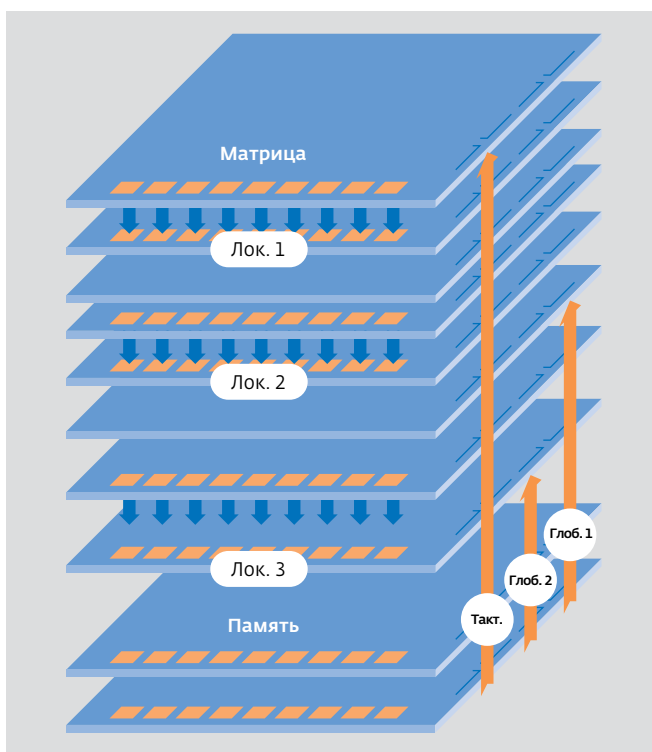


Рис.5. Глобальный радиоинтерфейс (GWI) на основе дипольных антенн [8]

технологии 0,18 мкм, – даже при скорости 2 Гбит/с потребуется всего 1 мВт на контактную пару. В этом демонстрационном образце максимальная скорость передачи была ограничена быстродействием компараторов, обеспечивающих селекцию импульсных сигналов по выходам индукторов. Параметры индуктивного интерфейса можно улучшить, оптимизируя размеры и форму катушек индуктивности, их взаимную ориентацию, толщину чипа и рассеиваемую мощность.

Описанный выше локальный индуктивно-резонансный интерфейс может быть использован для передачи асинхронных сигналов внутри стековой микросборки и тактовых импульсов глобальной синхронизации. Но, несмотря на преимущества индуктивной передачи данных, рассмотренный вид бесконтактных соединений позиционируется в основном как интерфейс ближнего действия, предназначенный для обеспечения связи в пределах нескольких уровней одного стека микросборки. Для реализации более протяженных линий передачи данных предпочтительней использовать радиоканал. Так, в работе [9] в дополнение к локальной индуктивной передаче данных предложен глобальный радиоинтерфейс (GWI) на основе дипольных антенн, обеспечивающий информационный

обмен в микросборке из расположенных друг над другом кремниевых чипов, без ограничения по высоте (рис.5). Потери на распространение гармонических колебаний в многослойной сборке, выполненной с использованием технологии 0,18 мкм, составляют 0,14 дБ/чип при частоте 20 ГГц (погонное сопротивление кремниевой подложки – 2,29 кОм/см). Передачу тактовых сигналов в стековой сборке рекомендовано осуществлять с помощью импульсных последовательностей синусоидальных колебаний в диапазоне 10 ГГц.

В работе [11] предлагается использовать гибридную индуктивно-антенную технологию передачи сигналов в стековых конструкциях видеосистем (рис.6).

Обобщенный принцип такой гибридной организации обмена данными может использоваться для связи между несколькими стековыми микросборками (рис.7, [12-15]). Однако рассмотренный в [12-14] вариант беспроводной передачи данных упрощен и не использует всех возможностей современных телекоммуникационных технологий.

БЕСПРОВОДНАЯ СЕТЬ НА КРИСТАЛЛЕ

Увеличивающийся интерес к технологиям NoC среди разработчиков систем на кристалле способствовал появлению еще одной разновидности беспроводных сетей на кристалле (Wireless Network

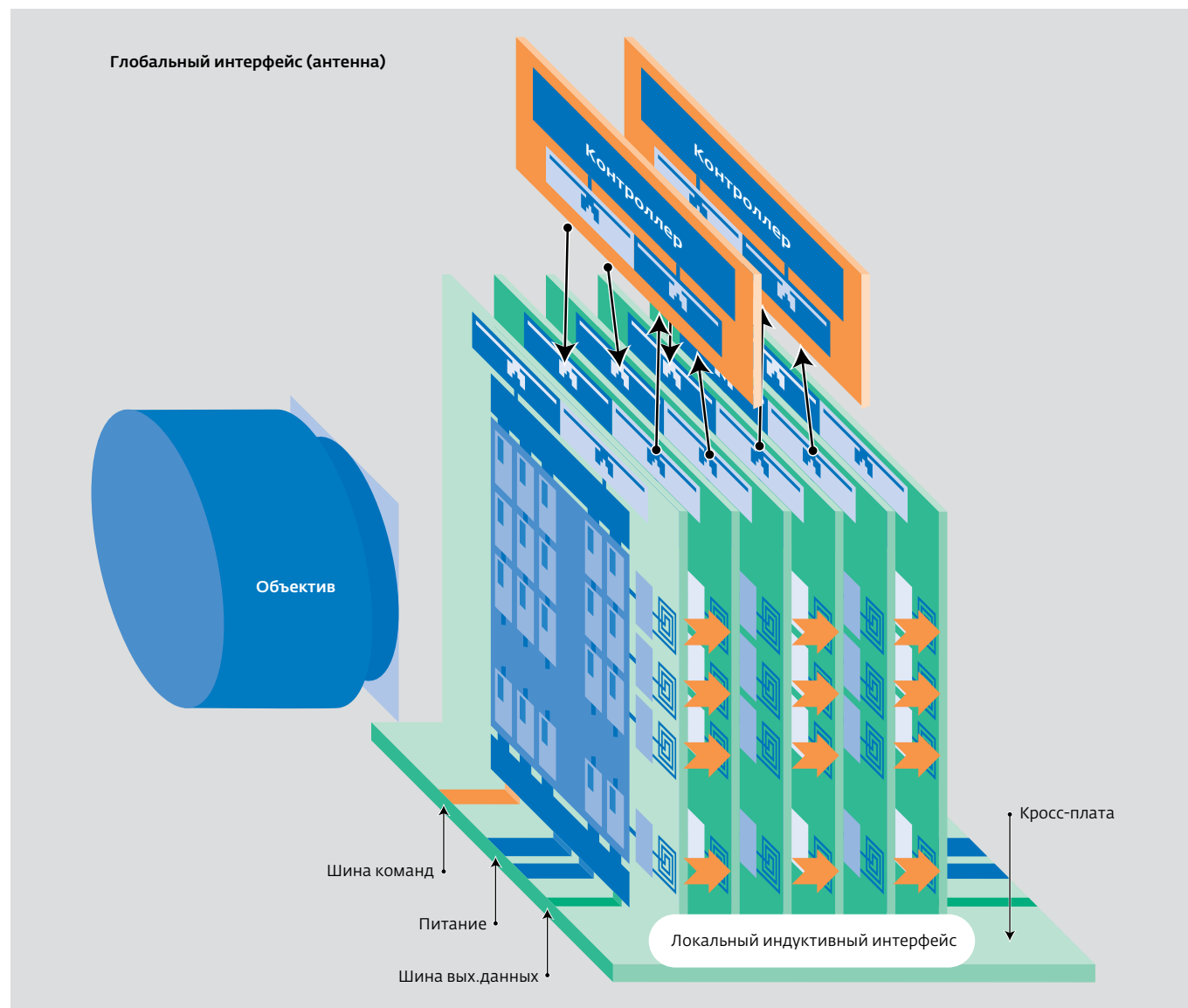


Рис.6. Технология на основе индуктивного и антенного интерфейсов для создания видеосистем со встроенной обработкой сигналов и распознаванием образов

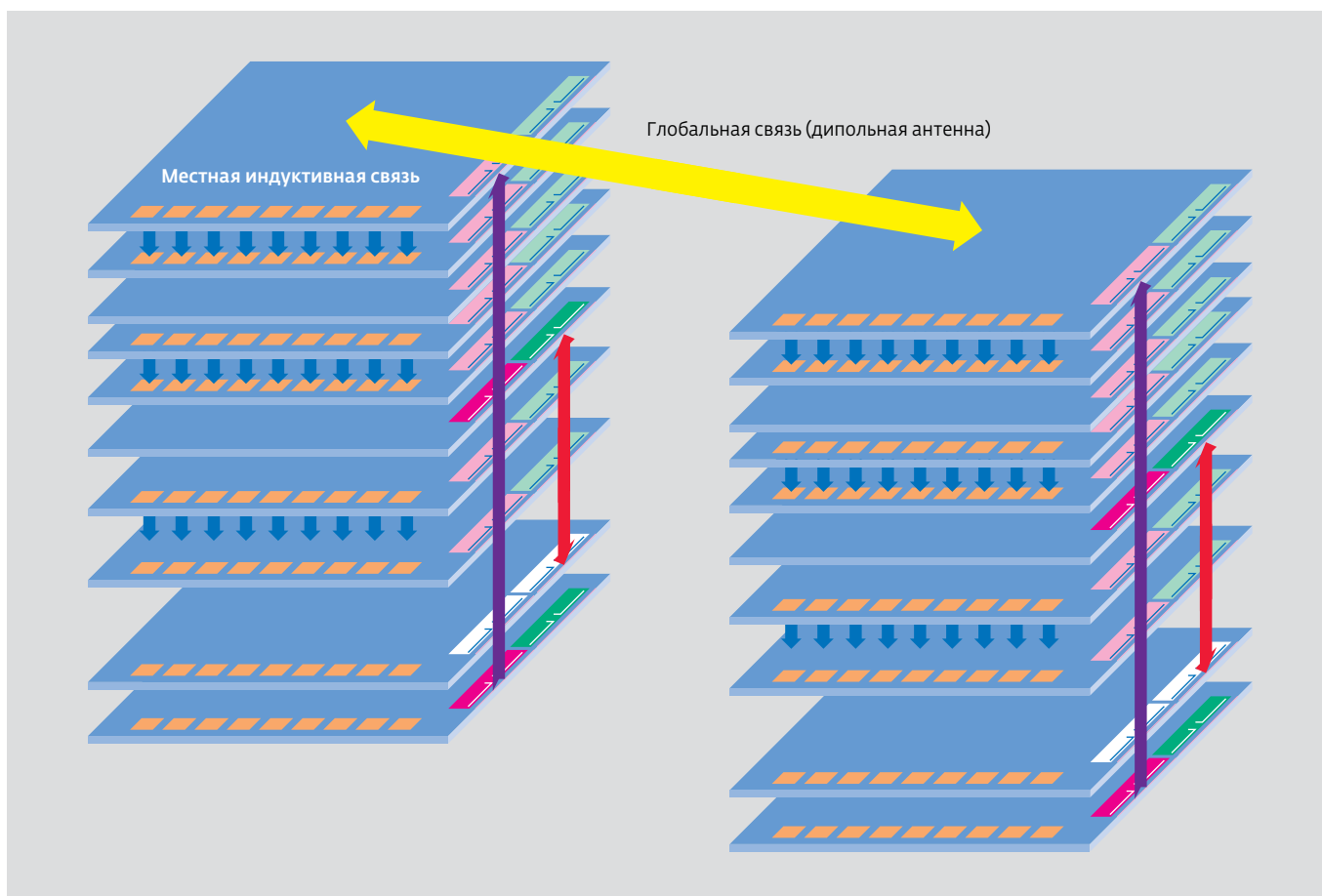


Рис.7. Передача данных между несколькими стековыми микросборками

on Chip, WiNoC), в которых используются решения, сходные с макроскопическими.

Среди возможных подходов к реализации WiNoC в первую очередь следует отметить использование в одном кристалле и беспроводных, и традиционных проводниковых линий передачи сигналов. При этом вся система на кристалле условно делится на подсети из групп ядер, внутри которых коммуникация осуществляется проводными линиями.

Каждая такая подсеть оборудована базовой станцией (БС), обеспечивающей передачу и получение пакетов данных по радиоканалам от других подсетей. Все ядра в подсети связаны с их БС через проводные линии связи. Передача пакета данных между ядрами разных подсетей осуществляется сначала локально до соответствующей БС, затем по эфиру – до БС подгруппы, в которой находится адресат и далее – по проводной линии к пункту назначения. Объединение БС в радиосеть может выполняться по топологии звезды, петли, мэш-сети и т.п., т.е. так же, как это происходит в макросетях.

В более сложных решениях участки проводной передачи сигналов могут вовсе отсутствовать, хотя описанная выше гибридная реализация более проста технологически. Этот вариант – единственно возможный для создания в перспективе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) типа FPGA с возможностью программной реконфигурации архитектуры беспроводной сети на кристалле под различные приложения.

Возможность практической реализации WiNoC впервые демонстрировалась как решение задачи распределения тактовых синхроимпульсов [16]. В [17] был описан проект беспроводной сверхширокополосной (Ultra Wide Band, UWB) NoC.

С помощью антенны в виде дипольного меандра длиной 2,98 мм, излучающей на частоте 3,6 ГГц, была организована связь на расстоянии 1 мм. Пиковая пропускная способность в системе составляла 10 Гбит/с. Через беспроводный канал осуществлялась синхронизация 16 встроенных ядер и управление доступом

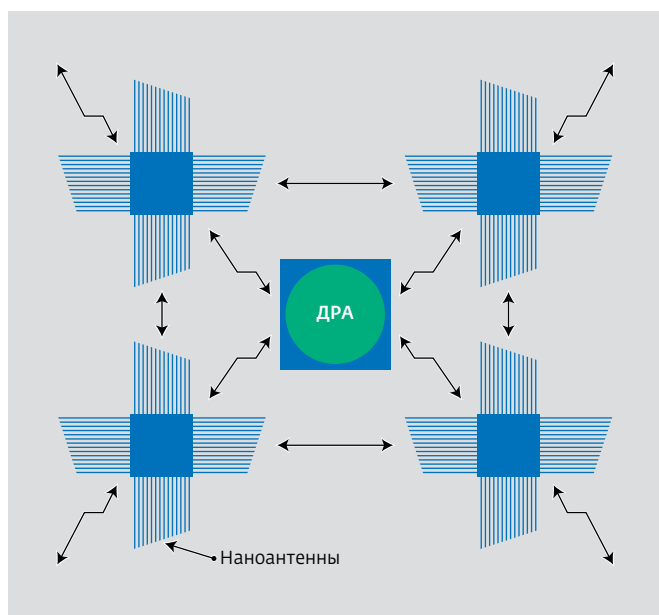


Рис.8. Наносистема с решетками наноантенн для беспроводной связи с макроустройствами

по протоколу SD-MAC. В работе [5] был продемонстрирован выигрыш WiNoC по сравнению с проводными аналогами в пропускной способности сети, времени задержки пакетов и энергетических потерях.

Существенным технологическим прорывом, позволившим перейти от теории беспроводных сетей на кристалле к их практической реализации стало появление наноантенн [18]. Например, в [19] роль антенн выполняют нанотрубки, которые для обеспечения частотного мультиплексирования сигналов имеют разную длину, и, следовательно, резонансную частоту. Развивая эту идею, в [20, 21] предлагается решение, обеспечивающее выход подсетей чипа на внешний макроуровень. На наносхемы также предлагается устанавливать антенны из массива нанотрубок, а центральный порт имеет диэлектрическую резонаторную антенну (ДРА) [20, 21] (рис.8). На основе этих же принципов можно организовать электропитание наноустройств. В этом случае наноантенны могут использоваться в качестве выпрямляющих антенн (ректенн), в которых роль выпрямителей выполняют нанотрубки с внедренным дефектом атомной сетки. Такие наноструктуры позволяют создавать активные устройства, обладающие в дополнение к частотно-селективным и пространственно-избирательным свойствам возможностью прямого усиления сигналов из эфира.

Еще одна потенциальная возможность применения наноантенн в составе

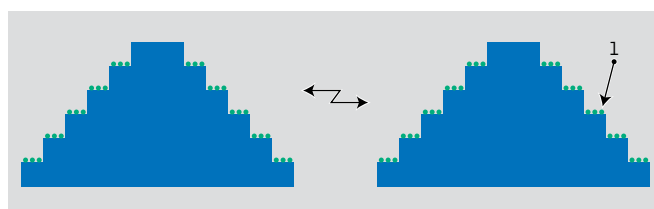


Рис.9. Пирамидальная конфигурация наноантенных решеток на основе нановибраторных антенн Уда-Яги в многослойных наносхемах (вид сбоку)

наноустройств – использование систем на кристалле в качестве химических или биологических датчиков, обеспечивающих бесконтактную дистанционную передачу данных. Наноантенны позволяют использовать в беспроводных сетях на чипе не только радиочастотный, но и оптический диапазон. Это даст возможность сочетать достоинства оптических каналов связи (узкая направленность распространения сигналов) с преимуществами беспроводной передачи данных.

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

Пропускная способность беспроводной сети на кристалле зависит не только от способа ее физической реализации, но и от методов обработки сигналов, которые позволяют увеличить количество каналов информационного обмена при сохранении ширины полосы их пропускания.

В работе [22] для этих целей предложено применить технологию мультиММО. В центре кристалла формируется антенный кластер центральной базовой станции (ЦБС) – топологически структурированный набор малоразмерных ДРА. Все остальные наносхемы оснащаются антенными решетками ММО, составленными, например, из дипольных наноантенн (их может быть восемь и больше). При этом допускается использовать наноантенны одинаковой длины, так как при использовании методов пространственно-временного кодирования ММО-сигналы не обязательно разделять по частоте. Рабочий диапазон устройства может быть миллиметровым или субмиллиметровым.

Алгоритмическое решение задачи декодирования информации в такой мультиММО-системе упрощается благодаря неизменности координат антенн и стабильности условий распространения сигналов под корпусом микросхемы. Это позволяет производить расчет коэффициентов передачи каналов распространения сигналов лишь на начальном этапе, после включения питания, и не учитывать воздействие активных помех

и эффекта Доплера. Декодер ЦБС в варианте сети мультиMIMO также играет роль шлюза, обеспечивающего связь микросхемы с внешними устройствами. Как вариант, может использоваться кооперативная передача данных с помощью виртуальной кластеризации распределенных на кристалле наносистем MIMO и их синхронизированного излучения.

ПИРАМИДАЛЬНЫЕ БАЗОВЫЕ НАНОСТАНЦИИ И КЛАСТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

Поиск новых конструктивных решений для реализации многопользовательских систем MIMO в составе WiNoS привел к идее использования пирамидальных базовых наностанций [23]. На вертикальных стенках пирамиды можно разместить наноантенны, а на горизонтальных поверхностях уступов – единичные вибраторы или малоэлементные наноантенны Уда-Яги (рис.9). Размер пьедестала пирамиды для размещения наноантенны Уда-Яги зависит от длины волны излучения, межэлементного расстояния вибраторов в антенне и их количества. Так, для частоты 100 ТГц и при полуволновом расположении антенных элементов они будут устанавливаться на расстоянии 1,5 мкм друг от друга. При четырех элементах в составе наноантенны необходимо обеспечить длину пьедестала в горизонтальной плоскости не менее 8 мкм. Если эти размеры ограничены до 10–15 мкм, количество вибраторов антенны Уда-Яги может быть уменьшено до двух-трех при снижении частоты излучения.

Одна общая наноантенна может устанавливаться на несколько слоев. Например, при шестислойной топологии можно использовать двухуровневую пирамиду, в которой каждый из уровней образован тремя слоями, а наноантенна располагается на центральном из них, образуя два излучателя в вертикальной плоскости. При использовании современных технологий на один уровень может приходиться от двух до четырех (в зависимости от толщины) слоев. К примеру, с помощью восьмислойной эпитаксии можно сформировать по вертикали четыре слоя, образующие основание для двухэлементной решетки. Для полуволнового шага решетки по вертикали и частоты 100 ТГц толщина уровня пирамиды должна быть 1,5 мкм. При трехслойном его исполнении каждый слой должен быть толщиной 500 нм, что несложно выполнить на современном оборудовании.

Следует отметить, что выбор терагерцового диапазона частот позволяет при анализе параметров наноантенных решеток в составе WiNoS

оперировать понятием дальней зоны антенны. Известно, что дальняя зона определяется как область, в которой плотность потока энергии излучения антенны приблизительно обратно пропорциональна квадрату расстояния от антенны. Для апертурных антенн, к числу которых относятся и рассмотренные решетки наноизлучателей, ближняя граница дальней зоны определяется выражением:

$$R_d = 2L^2/\lambda,$$

где L – размер апертуры антенны, λ – длина волны. Обычно в литературе указывается, что дальняя зона антенны лежит на расстоянии более 100 длин волны, на которой работает антенна. При указанной частоте 100 ТГц и размерах корпуса системы на кристалле 30×30 мм² в пределах корпуса микросхемы укладывается около 10000 длин волн. В этом случае уже при расстоянии между наносхемами более 300 мкм можно применять электродинамическую модель дальней зоны антенн, что существенно упрощает обработку сигналов. В случае укорочения длины волны за счет использования метаматериалов плотность компоновки наносхем в составе кристалла может быть увеличена. Заполнение пространства между наносхемами метаматериалом с отрицательным индексом преломления также позволяет сузить диаграммы направленности излучателей

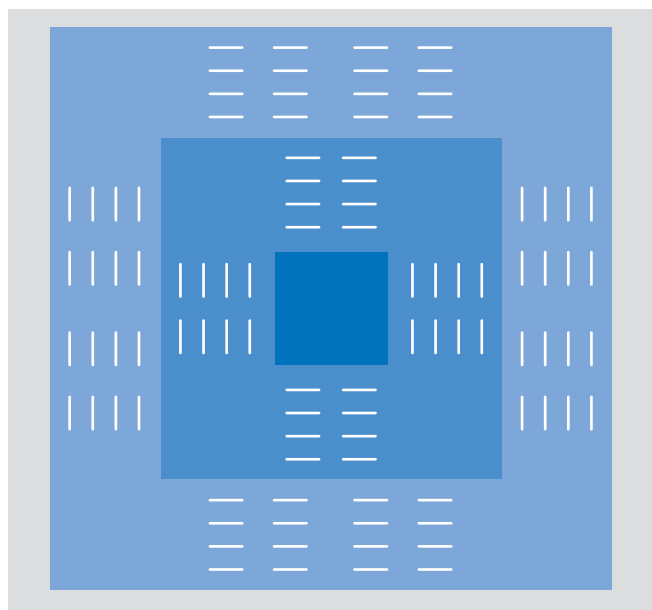


Рис.10. Пирамидальная наноантенная решетка на основе нановибраторных антенн Уда-Яги с различным количеством излучателей в уровнях (вид сверху)

наноантенной решетки и сформировать волноводный канал, препятствующий проникновению излучения за пределы корпуса микросхемы. При этом пирамидальное размещение элементов антенн в наносхеме позволяет убрать взаимное затенение наностанций и улучшить условия рефракции радиоволн внутри корпуса SoC. Для передачи данных между слоями внутри пирамиды могут использоваться и радиоканалы.

Связь с макроустройствами может обеспечиваться посредством печатных микрополосковых антенн на основе метаматериалов, например, типа CRLH, размещенных на верхнем уровне пирамиды [24]. Такое решение позволяет формировать электрически малые излучатели для работы в сравнительно низкочастотных диапазонах. В этом случае топологию печатной антенны целесообразно оптимизировать для придания ей требуемой широкополосности и диапазонности, используя генетические или муравьиные алгоритмы оптимизации. Возможно также использование ДРА либо иных разновидностей объемных электрически малых излучателей.

В более общем случае в разных уровнях пирамидальной наносхемы могут использоваться антенны разных типов (вибраторы, Уда-Яги и т.д.), чередоваться плоские и линейные решетки с разным количеством излучателей (рис.10) при различной длине пьедесталов нанопирамиды. Это

позволяет использовать разные диапазоны частот в уровнях для реализации частотного разделения каналов и улучшения электромагнитной совместимости наносхем внутри чипа.

Дифференциация структур нанорешеток по уровням пирамиды дает возможность эффективно использовать кластерную технологию формирования многопользовательских систем MIMO (мультиMIMO) в составе WiNoC. Для иллюстрации рассмотрим случай размещения на пирамидальных наносхемах различного количества наноантенн Уда-Яги, имеющих неодинаковое количество элементов для передачи данных одновременно на нескольких частотах несущих (рис.11). На пьедестале первого уровня в каждой грани пирамиды расположены четырехэлементные наноантенные решетки на основе излучателей Уда-Яги, реализующие с взаимодействующими узлами сети на чипе систему мультиMIMO по схеме $N \times 4 \times 4$, где N – количество узлов. На каждой грани второго яруса размещено по две наноантенны Уда-Яги, формирующие мультиMIMO-сеть формата $N \times 2 \times 2$ в ином частотном диапазоне (длину волны можно увеличить за счет высвободившейся в результате перехода к двухэлементной антенной решетке полезной площади). На третьем ярусе наносхемы расположена ДРА, обеспечивающая связь с макроуровнем.

Кластерный принцип формирования антенных систем можно применять как для связи внутри WiNoC, когда кластер образуют одинаковые ярусы нескольких пирамидальных наносхем, так и для передачи данных на макроуровень. В последнем случае для увеличения дальности связи WiNoC с внешними потребителями имеет смысл использовать кооперативную передачу данных с помощью кластеризации распределенных на кристалле наносистем MIMO. В зависимости от дальности связи размер кластера

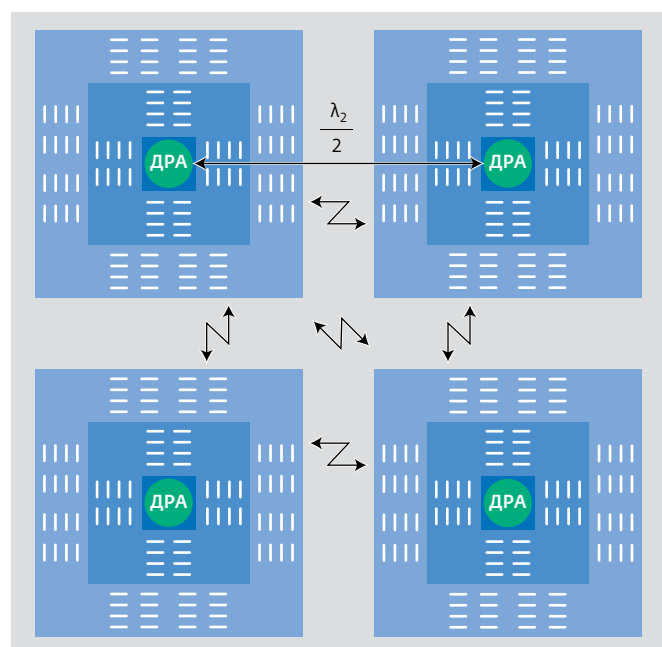


Рис.11. Пирамидальная наноантенная решетка на основе нановибраторных антенн Уда-Яги с различным количеством излучателей в уровнях (вид сверху)

может адаптивно изменяться путем объединения нескольких наносхем в один излучатель. Аналогичное решение по "принципу матрешки" возможно и для реализации одновременной многочастотной связи, при этом верхний уровень наносхем объединен в один кластер, следующий под ним уровень – в другой и т.д. Таким способом формируются множественные кластеры, вложенные друг в друга и различающиеся рабочим диапазоном частот и количеством объединенных наносхем.

Кластеры, образующие MIMO-систему, могут иметь различную топологию, что позволяет минимизировать краевые эффекты, снизить уровни боковых лепестков диаграмм направленности и уменьшить взаимное влияние излучателей. Для каждого диапазона частот можно создавать свою конфигурацию кластеров и их оптимальную топологию. В итоге обеспечивается связь в разных диапазонах частот и в нескольких стандартах одновременно, что позволяет решить многие, различные по функциональному назначению задачи. К примеру, возможно совмещать функции типа "передача данных + прием сигналов GPS" или "связь с макроуровнем + беспроводное питание чипа с помощью ректенн". Такой подход позволяет использовать сравнительно низкочастотное излучение внутри кристалла и улучшить энергетику радиоволн при передаче данных между удаленными периферийными участками чипа.

Таким образом, в отличие от литографических методов создания электрического контакта с наносистемами, идея беспроводных соединений в системах на кристалле является достаточно универсальной и масштабируемой. Понятно, что столь радикальные технологические новшества нуждаются во всестороннем теоретическом обосновании, но можно надеяться, что их широкое внедрение в производство является лишь вопросом времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. **P. P. Pande, C. Grecu, M. Jones, A. Ivanov, R. Saleh.** Performance Evaluation and Design Trade-offs for Network on Chip Interconnect Architectures. – IEEE Transactions on Computers, August 2005, v.54, № 8, p.1025-1040.
2. **M. F. Chang et al.** CMP Network-on-Chip Overlaid With Multi-Band RF-Interconnect. – Proc. of IEEE International Symposium on High-Performance Computer Architecture, 16–20 February, 2008, p.191–202.
3. **A. Shacham et al.** Photonic Network-on-Chip for Future Generations of Chip Multi-Processors. – IEEE Transactions on Computers, v.57, issue 9, p.1246–1260.
4. **V. F. Pavlidis and E. G. Friedman.** 3-D Topologies for Networks-on-Chip. – IEEE Transactions on VLSI, October 2007, p.1081–1090.
5. **Amlan Ganguly, Kevin Chang, Partha Pratim Pande, Benjamin Belzer, Alireza Nojeh.** Performance Evaluation of Wireless Networks on Chip Architectures. // 10th Int'l Symposium on Quality Electronic Design., 16–18 March 2009, p.350–355.
6. **K. Kanda et al.,** 1.27Gb/s/ch 3mW/pin Wireless Superconnect (WSC) Interface Scheme, ISSCC Dig. Tech. Papers, Feb. 2003, p.186–187.
7. **D. Mizoguchi et al.** A 1.2Gb/s/pin Wireless Superconnect Base on Inductive Inter-Chip Signaling (IIS), ISSCC Dig. Tech. Papers, Feb. 2004, p.142–143.
8. **Atsushi Iwata, Mamoru Sasaki, Takamaro Kikkawa, Seiji Kameda, Hiroshi Ando, Kentaro Kimoto, Daisuke Arizono, Hideo Sunami.** A 3D Integration Scheme utilizing Wireless Interconnections for Implementing Hyper Brains. IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), Feb. 2005, p.262–263.
9. **Tadahiro Kuroda.** CMOS Proximity Inter-Chip Communications. 2007 CMOS Emerging Technologies Workshop, http://www.cmoset.com/uploads/Keynote_1.pdf
10. **Sangwook Han, David D. Wentzloff.** Performance Improvement of Resonant Inductive Coupling for Wireless 3D IC Interconnect. – IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, July 11–17, 2010, www.eecs.umich.edu/wics/publications/Han_APS2010.pdf
11. **Seiji Kameda, Mamoru Sasaki and Atsushi Iwata.** A Multi-chip Vision System with a PWM-based Line Parallel Interconnection. – The 2nd Hiroshima International Workshop on Nanoelectronics for Terra-Bit Information Processing. Hiroshima University. January 30, 2004, www.rcns.hiroshima-u.ac.jp/21coe/pdf/2nd_WS/Poster.1-P.74.pdf
12. **Takamaro Kikkawa.** Wireless Inter-Chip Interconnects Using IR-UWB-CMOS. – 10th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT), Shanghai, 1–4 Nov. 2010, p.623–626.
13. **Kentaro Kimoto, Masakazu Nitta, Nobuo Sasaki, and Takamaro Kikkawa.** On-Chip Wireless Signal Transmission using Silicon Integrated Antennas. – Proc. of the 5nd Hiroshima International Workshop on Nanoelectronics for Terra-Bit Information Processing, Hiroshima University, January 30, 2004, www.rcns.hiroshima-u.ac.jp/21coe/pdf/2nd_WS/Poster.1-P.74.pdf
14. **14. K. Kimoto, N. Sasaki, S. Kubota, W. Moriyama and T. Kikkawa.** Analysis of On-chip Antennas for High-speed Signal Transmission in Silicon Integrated

- Circuits. – Antennas and Propagation Society International Symposium, July 2008, p.5–11.
15. **Xiaowei He, Jinwen Li, Minxuan Zhang, and Shubo Qi**, Improvement of Integrated Dipole Antenna Performance Using Diamond for Intra-chip Wireless Interconnection. – IEEE International Conference on IC Design and Technology (ICICDT), Grenoble, 2–4 June 2010, p.248–251.
 16. **B. A. Floyd et al.** Intra-Chip Wireless Interconnect for Clock Distribution Implemented With Integrated Antennas, Receivers, and Transmitters. – IEEE Journal of Solid-State Circuits, May 2002, v.37, № 5, p.543–552.
 17. **D. Zhao and Y. Wang**, SD-MAC: Design and Synthesis of A Hardware-Efficient Collision-Free QoS Aware MAC Protocol for Wireless Network-on-Chip. – IEEE Transactions on Computers, September 2008, v.57, № 9, p.1230–1245.
 18. **Слюсар В.И.** Наноантенны: подходы и перспективы. – Электроника: НТБ, 2009, №2, с.5–65.
 19. European Patent EP1784926 (WO/2007/011365). Interconnected Nanosystems. Burke P.J., 25.01.2007.
 20. **Слюсар В.И., Слюсар Д.В.** Система на кристалле с беспроводной передачей данных между ее наносхемами. – Материалы 13-го международного молодежного форума "Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке" (30 марта–1 апреля 2009 г.), ч.1. – Харьков: ХНУРЭ, 2009, с.307.
 21. **Слюсар В.И., Слюсар Д.В.** Наносистема с решетками наноантенн для беспроводной связи с взаимодействующими макроустройствами. – XV международная научно-техническая конференция "Информационные системы и технологии (ИСТ-2009)". – Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева, 2009, с.52.
 22. **Слюсар В.И., Слюсар Д.В.** Метод мультиММО для беспроводной сети на чипе. – VII міжнародна науково-технічна конференція студентства і молоді "Світ інформації та телекомунікацій – 2010" (15–16 квітня 2010 р.), Київ: ДУІКТ, с.53–54.
 23. Патент Украины на полезную модель № 60938. МПК H01Q 1/38 (2006.01). Способ изготовления наносхем беспроводной сети на кристалле. Опубл. 25.06.2011, бюл. № 12. (Слюсар Д.В., Слюсар В.И. – Заявка на выдачу патента Украины на полезную модель № u201103249 от 21.03.2011).
 24. **Слюсар В.И.** Метаматериалы в конструкциях антенн. – Электроника: НТБ, 2009, №8, с.66–70.