

ISSCC 2007 ГОДА.

ПРОБЛЕМЫ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ МИКРОСХЕМ

С 11 по 15 февраля 2007 года состоялась ежегодная Международная конференция по твердотельным схемам (International Solid-State Circuits Conference, ISSCC) – важнейший форум, посвященный успехам в области разработки твердотельных схем и систем на кристалле. В результате развития в соответствии с законом Мура микроэлектроника вступила в эру наноэлектроники. Но дальнейшее совершенствование твердотельной электроники невозможно без установления баланса между успехами в области технологии изготовления элементов и приборов, схемотехники, системотехники и архитектуры новых устройств. И достичь такой баланс совсем не просто. Поэтому основная тема конференции ISSCC 2007 года – обсуждение новых концепций построения высокопроизводительных твердотельных схем и систем с малой потребляемой мощностью с учетом взаимодействия четырех аспектов их развития.

На 31 секции конференции было заслушано 234 доклада, посвященных последним достижениям в области твердотельной электроники. Из них 91 доклад был представлен американскими специалистами (47 – промышленными компаниями и 44 – высшими учебными заведениями), 73 доклада – представителями стран Дальнего Востока (32 – промышленными компаниями и 41 – высшими учебными заведениями) и 70 докладов поступили от европейских стран (36 – от промышленных компаний и 34 – от высших учебных заведений). Наибольшее число докладов было посвящено проблемам цифровой техники и техники проводных систем связи (по 13% от общего числа представленных работ). Несколько меньшее внимание уделялось вопросам разработки средств преобразования изображения, медицинской аппаратуры, МЭМС и средств отображения информации, перспективным техно-

В.Майская

гическим направлениям и беспроводным системам связи (по 12%), а также радиочастотным устройствам (10%). Остальные направления были представлены примерно одинаково: 8% докладов посвящено микросхемам памяти, 7% – аналоговым устройствам и преобразователям данных и 6% – сигнальным процессорам.

В первый день работы (11 февраля) эксперты, представляющие десять подкомитетов конференции, прочитали лекции, посвященные специфическим проблемам, связанным с разработкой микросхем. Кроме того, были проведены три форума по вопросам:

- входных каскадов радиосистем гигагерцового диапазона (GHz Radio Front Ends , GIRAFE), посвященный усилителям мощности;
- энергонезависимой памяти;
- трехмерной электроники.

Официальное открытие конференции состоялось 12 февраля. На пленарном заседании были заслушаны доклады Мориса Чанга (Morris Chang) – председателя правления компании Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC); Левиса Каунта (Lewis Counts) – вице-президента, отвечающего за технологию, компании Analog Devices и Джоэля Хартманна (Joël Hartmann) – руководителя альянса Crolles2*.

СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ЧИСТЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ (FOUNDRIES) ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Доклад М.Чанга – легенды полупроводниковой промышленности и создателя крупнейшего "кремниевое завода" (foundry) – был посвящен стратегии, которая позволит чисто производственным компаниям сохранить рентабельность в эпоху опережающего развития бытовой техники. Сегодня foundries полностью интегрированы в канал поставок полупроводниковых приборов: доля изделий таких компаний в общем объеме производства составляет 20%. В то же время среднегодовые темпы прироста прибыли полупроводниковой

* Альянс Crolles2 был создан в 2000 году компаниями STMicroelectronics и Philips Semiconductors (сейчас – NXP). Два года спустя к ним присоединилась фирма Freescale и производитель полупроводниковых приборов – тайваньская компания TSMC. Правда, последняя только на правах ассоциированного партнера. Цель альянса – совместная разработка 90-нм КМОП-микросхем и их совершенствование вплоть до освоения 32-нм производства.



промышленности в 2000–2010 годы в целом снизятся с 16%, характерных для периода до 2000 года, до прогнозируемых ~6%. Чанг назвал четыре фактора, которые, по его мнению, смогут гарантировать дальнейшее развитие промышленности и сохранение рентабельности в условиях ужесточающейся конкурентной борьбы. Первый из них – ключевая стратегия. Это не только расширение рынка логических КМОП-микросхем за счет улучшения их характеристик и снижения стоимости, но и выход в новые сегменты, где ранее КМОП-технология не была широко представлена. Сегодня основная движущая сила развития электронной техники – бытовая аппаратура: беспроводные системы, электронные игры, цифровое телевидение, ЖК-панели, средства управления питанием, MP3-устройства, цифровые видеокамеры. А доля изделий foundries в датчиках изображения, аналоговых устройствах, микропроцессорах и микросхемах памяти не превышает 20%.

Второй фактор сводится к совершенствованию систем проектирования все более сложных микросхем (рис.1). Затраты на проектирование (без учета стоимости шаблонов) каждого следующего поколения микросхем до сих пор увеличивались вдвое, а с переходом от 90-нм к 65-нм топологии они возрастут в три раза. Решить эту проблему удастся, если фирма-производитель сможет предоставлять заказчикам сложнофункциональные (IP) блоки, библиотечные системы и инструментальные средства САПР, а также обеспечить доступ к часто используемым IP-блокам (например, средствам ввода/вывода популярных стандартов). К тому же, необходима комплексная экосистема проектирования с учетом технологичности. Сотрудничать следует с аттестованными службами проектирования.

Чтобы выполнить требования по показателю "рабочие характеристики – стоимость изделия" и сократить сроки выхода на рынок, производитель должен участвовать в проектировании и разработке технологии уже на ранних этапах создания микросхемы. Не теряют актуальности и два других фактора: снижение издержек производства (переход фирмы

TSMC к обработке 300-мм пластин привел к снижению стоимости микросхем и увеличению выхода годных) и финансирование НИОКР.

Если выполнять все эти требования, то, по мнению Чанга, к 2010 году 40% микросхем, представленных на рынке, будут выпущены фирмами-производителями.

ДОБРО ПОЖАЛОВАТЬ В ЭРУ "СУПЕРКРЕМНИЯ"

По мнению Левиса Каунтса, с момента появления микросхем на основе SiGe и кремния на изоляторе (КНИ) полупроводниковая промышленность вступила в эпоху суперкремния. Кремниевые приборы уже не способны удовлетворять всем требованиям, предъявляемым электронными системами. По-видимому, чтобы достичь нового уровня развития, в частности в области аналоговых систем и систем смешанного (аналогового-цифрового) сигнала, потребуются новые материалы и структуры.

Какими же станут микросхемы смешанного сигнала через несколько лет? По мнению Каунтса, перспективы аналоговой технологии зависят не столько от ее достоинств, сколько от возможностей преобразователей сигналов. Энергия, затрачиваемая на этапе преобразования, и термический шум – основные факторы, ограничивающие эффективность преобразователей данных. Так, энергия преобразования ряда микросхем, представленных на конференции ISSCC 2007,

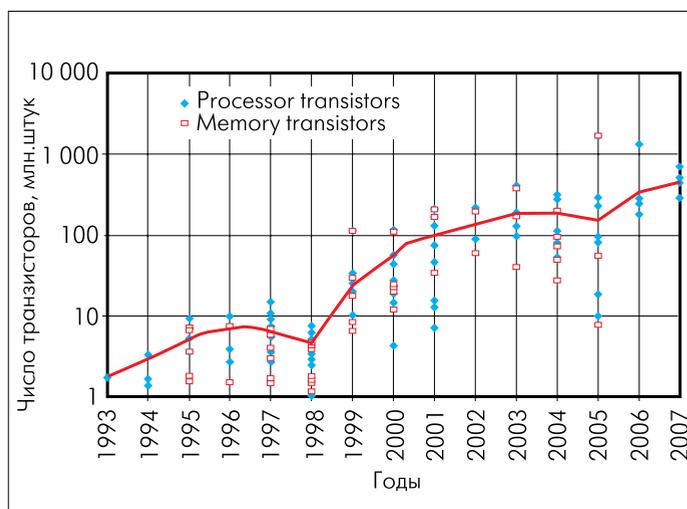


Рис. 1. Увеличение сложности микросхем

составляет 5 пДж. Это уже близко к максимальной теоретической эффективности преобразователей.

Увеличение динамического диапазона приведет к существенному увеличению потребляемой мощности. А этот фактор зачастую не учитывается разработчиками цифровых устройств. Вот почему оптимизм относительно дискретизации аналоговых ВЧ-микросхем неоправдан. Конечно, можно расположить преобразователь данных ближе к антенне, но при этом он будет потреблять более половины мощности устройства. Этому же мнению придерживается и Асад Абиди (Asad Abidi, Калифорнийский университет в Лос-Анджелесе). На дискуссионной секции конференции он отметил, что благодаря преобразованию аналогового сигнала в цифровой потребляемая мощность супергетеродинного приемника можно снизить до ~10 мВт. Однако замена аналоговых компонентов преобразователем сигнала приведет к увеличению потребляемой мощности до нескольких десятков ватт.

Необходимо больше внимания уделять архитектуре системы, считает Каунтс. Оптимальное местоположение АЦП следует выбирать исходя из требований к характеристикам системы и из условий работы. Некоторые системы с некритичными требованиями, такие как Bluetooth-интерфейсы или ряд сотовых телефонов, можно выполнять в основном в цифровом виде. В системах с более высокими требованиями большую часть ВЧ-блоков целесообразно выполнять в аналоговом виде.

В итоге, по мнению Каунтса, при разработке аналоговых микросхем и схем смешанного сигнала необходимо уделять внимание таким вопросам, как:

- динамический диапазон;
- полоса пропускания;
- достигаемые параметры (вольты, амперы, секунды, градусы в единицах Кельвина и т.п.);
- энергопотребление;
- сложность микросхемы.

В качестве примера решения этих проблем компанией Analog Devices Каунтс привел программно-перестраиваемое радио (software-defined Radio – SDR) с МЭМС антенным блоком. Каунтс коснулся и задач, связанных с объединением нескольких радиоприемников в одном сотовом телефоне*. Для работы в нескольких стандартах связи (Wi-Fi, Bluetooth, WiBree, UWB, WiMax, NFC и RFID) будущие телефонные трубки должны иметь по крайней мере шесть радиосистем. При этом необходимо не только объединить все эти системы в одном устройстве, но и обеспечить минимальные его стоимость и энергопотребление. Маловероятно, что разработчики будут использовать отдельную антенну для приемника каждого стандарта. И здесь весьма перспективен перестраиваемый согласующий МЭМС-переключатель. Но такие трубки уже нельзя называть просто сотовым телефоном.

* На Мировом конгрессе 3GSM, проходившем в Барселоне одновременно с ISSCC, фирмы Broadcom, CSR, NXP Semiconductors и Texas Instruments сообщили о разработке микросхем, способных одновременно поддерживать стандарты Bluetooth и Wi-Fi

МЭМС-технология пригодна не только для создания переключателей и акселерометров (трехосевой акселерометр компании Analog Devices уже применяется в игровой консоли Wii компании Nintendo). Она весьма перспективна для формирования механически настраиваемых элементов индуктивности, конденсаторов и высококачественных трансформаторов. Ранее в радиосистемах использовалось больше элементов индуктивности, чем активных приборов. С 80-х годов прошлого столетия дорогостоящие высококачественные элементы индуктивности вытесняются более дешевыми транзисторами. Но с появлением МЭМС-индуктивностей, формируемых поверх активной схемы, ситуация меняется.

Как отметил Каунтс, NPN-транзисторы, высококачественные элементы индуктивности с высокой добротностью и МЭМС – вот на что следует обращать внимание при разработке программы развития полупроводниковой технологии (Technology Roadmap for Semiconductors) в части аналоговых схем и схем смешанного сигнала.

Проблема "оцифровывания" аналоговых схем обсуждалась и на дискуссионной секции конференции. В дискуссии приняли участие представители Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе и компаний Infineon, Intel, Texas Instruments, Hitachi, Silicon Laboratories. Эксперты, как и Каунтс считают, что выигрыш в аналоговой технике достигнут не за счет полностью цифровых ВЧ-схем, а благодаря появлению "цифровых устройств поддержки". В то же время, по мнению представителя компании Infineon Р.Коша (R Cosh), удовлетворить многочисленные стандарты 2G-, 3G- и 4G-систем можно лишь с помощью "интеллектуальных" усилителей мощности. А это значит, что АЦП должен располагаться ближе к антенне. Правда, входные блоки ВЧ-приемника не следует заменять цифровыми КМОП-микросхемами. Однако специалисты компаний Intel и Texas Instruments высказались за выполнение всей цепи обработки сигнала аналоговых устройств в цифровом виде. Аналоговые устройства обработки сигнала – "корабельный якорь" для интегрированных радиосистем, считают разработчики компании Intel. На фирме Texas Instruments создан полностью цифровой передатчик. Амплитуда выходного сигнала регулируется путем добавления или исключения генераторов заряда. В выходном блоке следует использовать транзистор с предельной частотой 250 ГГц. Применение цифровой техники в беспроводных телефонных трубках обеспечивает более высокий уровень интеграции, улучшение характеристик системы, позволяет упростить их тестирование, повысить выход годных, уменьшить габариты, сократить потребляемую мощность.

А поскольку большинство участников дискуссионной секции были единодушны относительно выгод применения цифровой ВЧ-техники, возможно, она и сумеет успешно подтвердить свои рекламируемые достоинства.



ОТКЛОНЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОМЕТРОВЫХ КМОП-ЭЛЕМЕНТОВ: НЕИЗБЕЖНЫ, СИМПТОМАТИЧНЫ ИЛИ ЯВЛЯЮТСЯ ПРИЗНАКОМ НЕЗРЕЛОСТИ?

И наконец, Джоэль Хартманн в своем докладе на пленарном заседании конференции — "Навстречу новой наноэлектронной космологии" — остановился на проблеме разброса параметров технологических процессов и их влияния на характеристики микросхем по мере уменьшения размеров элементов. До последнего времени большинство специалистов относились к росту отклонения параметров приборов от требуемых при неизменной технологии их производства как к неизбежному физическому результату масштабирования. Как смерть, налоги и выборные компании — это явление неотвратимое. Такие отклонения — результат уменьшения размеров транзисторов и, следовательно, уменьшения числа атомов примеси, влияющих на их пороговое напряжение. Возможно, в некоторых случаях такой подход справедлив. Однако опытные технологи считают, что многие отклонения параметров можно устранить за счет улучшения методов контроля технологического процесса. Но необходимые адаптивные методы контроля выходят за рамки существующей практики.

Специалисты альянса Crolles2 полагают, что решить проблему отклонения параметров в процессе изготовления микросхем можно путем строгого установления допустимых топологий схем и введения правил ограничения проектирования (Restrictive Design Rules, RDR). В качестве примера Хартманн продемонстрировал слайды схем с топологиями, отличающимися от стандартного расположения элементов. Поликремниевые дорожки однородной толщины выращивались только одной ориентации. Активные области транзисторов выполнялись в участках, перпендикулярных поликремниевым дорожкам. При формировании такой топологии пришлось отказаться от изоляции элементов мелкими канавками и перейти к изоляции затвора. Кроме того, возможные топологии микросхемы были строго ограничены. В результате требуемые электрические параметры транзисторов достигались успешнее, чем в микросхемах стандартной конфигурации. Правда, на прошедшей ранее, в январе 2007 года, конференции DesignCon высказывалось совершенно противоположное мнение относительно необходимости введения RDR. Специалисты компаний Qualcomm, TSMC и Clear Shape считают, что введение таких правил проектирования существенно ограничит возможности разработчиков и, скорее всего, такие правила не будут приняты.

Из выступления Хартманна следует, что:

- с переходом к нанометровым размерам предсказать параметры приборов становится все труднее, тогда как их работоспособность вследствие утечек и отклонения параметров от заданных ухудшается;
- отклонение параметров от заданных приводит к значительному отличию результатов моделирования и измерения.

Этот эффект характерен для всех типов микросхем;

- для гарантии приемлемого уровня рабочих характеристик, технологичности производства и высокого выхода годных микросхем с нанометровой топологией необходимо понимать и хорошо моделировать физические причины отклонений параметров;
- чтобы заблаговременно оценить выбранную конструкцию с точки зрения универсальности проектирования и технологичности необходима жесткая увязка методов физического, электрического и механического моделирования.

Важный аспект надежности современных микросхем, в первую очередь систем на кристалле, которому пока не уделяется должного внимания, — проектирование микросхем с учетом обеспечения долговечности их эксплуатации. И здесь стоит задача не просто уменьшить плотность дефектов, а предотвратить постепенную деградацию параметров, приводящую к эксплуатационным отказам микросхемы. По общепринятому мнению, если строго следовать правилам проектирования, параметры схемы не будут изменяться со временем. Но как показали специалисты компании NEC, по мере уменьшения топологических норм это правило не выполняется столь строго. Постепенное ухудшение свойств затворного окисла транзистора и сквозных перемычек, а также электромиграция примеси приводят к ухудшению характеристик микросхемы со временем. Как выявить микросхемы, риск выхода из строя которых достаточно велик?

Ответ на этот вопрос предложила компания NEC. Используемый ее специалистами метод разбиения микросхемы на "мелкие" избыточные блоки не нов. Он широко применяется для компенсации отказов в микросхемах памяти. Специалисты компании обратились к этому методу для предотвращения отказов логических микросхем. Большинство скрытых дефектов, приводящих к отказам логических микросхем, при эксплуатации проявляются в постепенном увеличении задержки распространения сигнала в токопроводящих линиях. Для выявления таких дефектов в ходе отбраковочных испытаний проверяется форма волны входящих сигналов каждого логического блока или порта ввода-вывода. На основе заданного "периода предсказания отказа" – интервала между нормальной работой и отказом – сравниваются временные характеристики последовательности состояний. Если время задержки выходит за пределы заданного периода, генерируется предупреждение о возможности отказа и включается запасной блок. По оценкам разработчиков, предложенный метод позволяет повысить выход годных микросхем с 70 до 91% даже с учетом увеличения площади микросхемы вследствие применения резервных блоков. К тому же удается избежать до 80% эксплуатационных отказов, обусловленных скрытыми дефектами микросхемы.

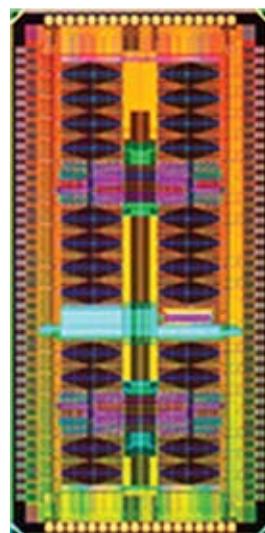


Рис.2 . Микросхема 65-нм eDRAM компании IBM

ДОСТИГНУТЫ ЛИ ПРЕДЕЛЫ МАСШТАБИРОВАНИЯ?

Хартманн проиллюстрировал проблему неотвратимых отклонений по мере уменьшения размеров элементов микросхем на примере МОП-транзистора с 16-нм топологическими нормами. В канале такого транзистора будут присутствовать 53 атома кремния и три с половиной атома бора. При таком уровне легирования произвольное изменение числа атомов в канале (в зависимости и вне зависимости от степени точности выполнения процессов литографии и травления) приведет к изменению тока насыщения стока. И только процесс поатомного формирования канала с помощью зонда атомного силового микроскопа может исключить отклонения такого рода. Аналогично можно рассматривать проблему уменьшения числа атомов затворного диэлектрика или состояния нижней поверхности затвора.

Когда же будут достигнуты пределы масштабирования? Мнения экспертов здесь разошлись. Ученые Университета Калифорнии в Беркли считают, что эти пределы уже не столь важны. Проблемы масштабирования логических микросхем по мере продвижения к многоядерным устройствам отодвигаются на второй план. Основным становится вопрос их программирования. Смогут ли программные средства отвечать требованиям все возрастающего уровня параллелизма процессоров? Особенно актуален этот вопрос в связи с сообщением компании Intel о разработке 80-ядерного процессора*. Как запрограммировать такую штуку?

Но именно специалисты Intel утверждают, что пределы масштабирования еще далеко не достигнуты. Теоретически минимальные размеры элементов будущих микросхем могут составить 1,5 нм. При этом время переключения будет равно 0,04 пс, а потребляемая мощность – 0,017 эВ.

Независимо от того, когда пределы будут достигнуты, микроэлектроника нуждается в новой технологии. Возможно, это углеродные нанотрубки, нанопровода, молекулярная элек-

* См. наст. номер, с.82.



троники, квантовые компьютерные устройства, трехмерные транзисторы (типа FinFET), спинтроника.

А как скажется масштабирование на схемах памяти, в частности статических ОЗУ (СОЗУ, или SRAM)? Если учесть, что в сумме многочисленные кэш на базе СОЗУ занимают большую часть площади микропроцессоров и существенно влияют на размеры программируемых вентиляционных матриц (FPGA), становится ясным, насколько важны размеры, быстродействие и потребляемая мощность СОЗУ. По мнению специалистов компании Philips Research, возможно, в будущем проблема отклонения параметров приборов от заданных будет решена за счет применения семи-, восьми- или даже десятитранзисторных ячеек памяти.

На секции, посвященной микросхемам СОЗУ, специалисты компаний Renesas Technology и Matsushita Electric Industrial (Panasonic) доложили о разработке встраиваемого модуля СОЗУ емкостью 512 Кбит. Модуль отличается высокой стабильностью в широком диапазоне температур (-40...125°C) и при большем, в сравнении с обычными микросхемами памяти этого типа, разбросом значений порогового напряжения (V_{th}), вызываемых вариациями технологического процесса. Микросхема изготовлена на объемном кремнии по 45-нм КМОП-технологии. В экспериментальной схеме памяти использованы две ячейки памяти площадью 0,245 и 0,327 $\mu\text{м}^2$. Одна, аналогичная по топологии обычным ячейкам памяти СОЗУ, использует сопротивление встроенного резистора для компенсации влияния температуры и вариаций напряжения V_{th} при считывании данных. Во второй ячейке шина питания столбцов разделена на восемь линий так, что развязка, требуемая при записи, выполняется только там, где она необходима. Это позволяет уменьшить емкость шин питания в критических участках. Измерения показали, что статический шумовой порог (SNM) превышает 120 мВ.

А представитель компании IBM Давид Франк (David Frank) считает, что в моделях микропроцессоров, к характеристикам которых не предъявляются высокие требования, альтернативой СОЗУ могут стать встраиваемые динамические ОЗУ (embedded DRAM, или eDRAM). Специалисты IBM сообщили о создании первого в своем классе опытного образца eDRAM емкостью 2 Мбит с 65-нм топологическими нормами (рис.2). Схема выполнена на КНИ с использованием технологии глубоких канавок, разработанной для изготовления КМОП-схем памяти на кремнии. Чтобы исключить усилители, требуемые для регистрации разности напряжения между разрядными шинами и конденсатором, в схеме встраиваемой памяти используются короткие разрядные шины и трехтранзисторный микроусилитель считывания, что обеспечивает непосредственное возбуждение затвора. Время выборки памяти – 2 нс, время ожидания – всего 1,5 нс. По утверждению разработчиков, площадь eDRAM примерно на одну треть меньше (площадь ячейки памяти 0,126 $\mu\text{м}^2$), чем у традиционных СОЗУ. В режи-

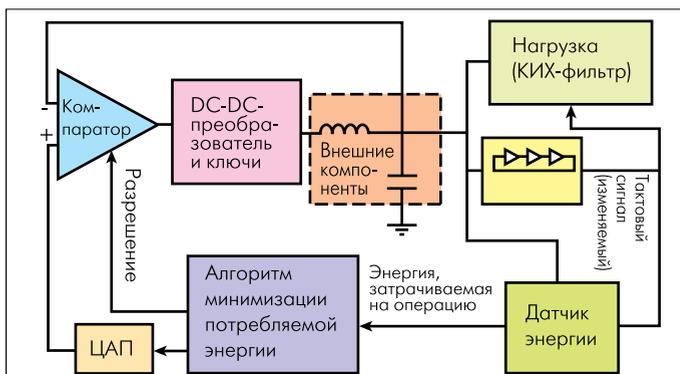


Рис.3 . Блок-схема контура отслеживания минимальной потребляемой энергии и встроенный DC-DC-преобразователь

ме ожидания микросхема потребляет 42 мВт. Напряжение питания составляет 1 В.

Компания IBM уже использовала встраиваемое ДОЗУ в заказном процессоре, разработанном для мощного суперкомпьютера Blue Gene/L. Теперь компания планирует применить разработанную технологию в будущих процессорах серий Power и Cell, а также в заказных микросхемах ASIC-типа. Новая технология должна стать частью стандартного 45-нм процесса изготовления КНИ-микросхем процессоров. Такие процессоры с встраиваемой памятью должны появиться в 2008 году.

Новую технологию возможно использует и давний соперник фирмы Intel – компания Advanced Micro Devices, которая участвовала в ее разработке.

КАК СПРАВИТЬСЯ С ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТЬЮ?

Для сетей беспроводных датчиков, радиочастотных этикеток (RFID), систем контроля рабочего состояния машин и обслуживания необходимы автономные устройства, способные работать от энергии, извлекаемой из окружающей среды. Исследователи Лаборатории электроники и информационной технологии Французской комиссии по атомной энергии (CEA-Leti) – одного из крупнейших европейских центров микроэлектроники – предложили архитектуру модуля, позволяющую накапливать и преобразовывать тепловую энергию в электрическую в диапазоне микроватт. Автономный генератор мощности содержит два источника мощности микроваттного диапазона (миниатюрный 1-В термогенератор и ВЧ-приемник энергии) и микросхему управления. Для управления накопленной энергией в модуле используется заказная ASIC, содержащая DC-DC-преобразователь, ВЧ-преобразователь, схему управления питанием, зарядное устройство, 5-нВт монитор разрядки. На кристалл микросхемы нанесена микробатарея площадью 30 мм². Термоэлектронные генераторы высоконадежны, бесшумны и не требуют вмешательства человека на протяжении всего срока службы. Используемые для их изготовления материалы экологически безвредны. Выходная мощность опытного образца микрогенератора составляет 4 мкВт/см²/°С. При разности температур 60°С модуль генери-

рует напряжение 1 В. Сейчас ведутся работы по выполнению модуля в виде микросхемы.

Тем временем ученые Массачусетского технологического института представили контур минимизации потребляемой энергии, способный динамически управлять минимальным рабочим напряжением цифровой микросхемы (в приведенном примере – КИХ-фильтра) при изменяемых рабочих условиях. В схему входит сверхмаломощный DC-DC-преобразователь, обеспечивающий низкое напряжение питания (до 250 мВ). Опорное напряжение преобразователя устанавливается схемой датчика энергии и алгоритмом минимизации потребляемой энергии (рис.3). Эффективность контура составляет 80%, энергия, поступающая в нагрузку при напряжении питания 1,2 В, – 1 мкВт и более. Контур выполнен по 65-нм КМОП-технологии и занимает площадь кристалла 0,05 мм².

Из работ, посвященных обеспечению малой потребляемой мощности, можно отметить доклады Университета Болоньи, Токийского университета и Межуниверситетского центра микроэлектроники (IMEC, Бельгия). Специалисты Университета Болоньи, отделения STMicroelectronics в Аграт Брианза (Италия) и Института надежности и микроинтеграции (IZM, Фраунховер, Германия) разработали метод трехмерной интеграции микросхем с помощью беспроводной схемы на основе емкостной связи. Микросхемы, выполненные по 0,13-мкм технологии и содержащие приемники и передатчики, соеди-



ненные восемь электродами площадью 8 мкм^2 , монтируются друг с другом лицевыми поверхностями. Это обеспечивает вертикальную передачу тактового сигнала на частоте $1,7 \text{ ГГц}$, задержку распространения сигналов 420 пс и пропускную способность более 22 Мбит/с/мкм^2 . И все это при потребляемой мощности $0,08 \text{ Дж/бит}$.

Ученые Университета Лейа (Иокогама, Япония) и Токийского университета создали КМОП-микросхему приемопередатчика с индуктивной связью. Микросхема выполнена с 90-нм топологическими нормами. При скорости передачи 1 Гбит/с энергия, потребляемая передатчиком, составляет $0,11 \text{ пДж/бит}$, приемником – $0,03 \text{ пДж/бит}$.

Ученым ИМЕС удалось улучшить энергетический КПД системы на 40% благодаря применению устройства управления быстродействием/энергией в соответствии с энергетическими требованиями приложения и средой, в которой она работает. А специалистам трех американских компаний – Luxtera, OEwaves и Forza Silicon – с помощью кремниевой фотонной монолитной микросхемы, изготовленной по КМОП КНИ-технологии с $0,13\text{-мкм}$ нормами, удалось снизить потребляемую мощность почти полностью интегрированного оптоэлектронного генератора на $10,2 \text{ ГГц}$ до менее 800 мВт .

На секции, посвященной многогигабитовым приемопередатчикам, специалисты компании Rambus описали микросхему последовательно-параллельного преобразователя (SERDES) со

скоростью передачи $6,25 \text{ Гбит/с}$ и потребляемой мощностью всего $2,2 \text{ мВт/Гбит/с}$. Схема изготовлена по 90-нм технологии. Для сравнения на той же секции компания Texas Instruments представила SERDES, выполненный по 65-нм технологии, со скоростью передачи $12,5 \text{ Гбит/с}$ и потребляемой мощностью $27,5 \text{ мВт/Гбит/с}$. Скорость приемопередатчика фирмы Sony с 90-нм топологическими нормами, также представленного на этой секции, составляет 10 Гбит/с , а рассеиваемая мощность – 25 мВт/Гбит/с .

Частота появления ошибочных битов микросхемы компании Rambus не превышает 10^{-5} на канал при ослаблении сигнала на частоте $3,125 \text{ ГГц}$, равном -15 дБ . Малая потребляемая мощность достигнута благодаря тому, что основное внимание уделялось адаптивной компенсации приемника, а не передатчика. Причем задачи компенсации решались программными, а не аппаратными средствами.

Международная конференция по твердотельным схемам знакомила инженеров, занятых разработкой и применением передовых твердотельных технологий, с новейшими техническими разработками и достижениями. К сожалению, в одной статье нельзя осветить все вопросы, рассматривавшиеся на протяжении пяти дней работы конференции. Несомненно, многие из затронутых на ISSCC актуальных тем найдут отражение в дальнейших публикациях журнала. ○