

Энергосбережение в полупроводниковой наноэлектронике

Денис Адамов, Наталья Горшкова (Москва)

В статье кратко описаны проблемы энергосбережения, связанные с ограничением плотности мощности и плотности тока в проводниках. Предлагаемые технические решения направлены на уменьшение площади функциональных блоков, сокращение длины проводников и уменьшение логического перепада в линиях связи. Все решения требуют комплексной оптимизации на всех этапах проектирования интегральных схем.

Принято считать, что электронные приборы потребляют сравнительно мало электрической энергии. Однако в индустриально развитых странах электроника уже сейчас потребляет до 25% электроэнергии. Среднее время работы телевизора составляет около 5 ч в сутки. Каждый мобильный телефон осуществляет связь с базовой станцией за несколько секунд и раз в несколько дней заряжается от сети. Почти в каждой городской квартире есть кабельное телевидение и Интернет через различные модемы и маршрутизаторы, работающие в круглосуточном режиме. Никто уже не обращает внимания на миллионы датчиков и видеокамер в системах безопасности. Постоянно включенных электронных приборов в России уже сотни миллионов. Их уже значительно больше, чем ламп освещения. Если ставится государственная задача повсеместной экономии электроэнергии, то электроника должна быть не на последнем месте.

Все электронные устройства можно разделить на две основные группы: мобильные и стационарные. Мобильные обеспечиваются энергией от химических источников тока, которые требуют периодической подзарядки или замены. Время работы без подзарядки или замены источника является одним из важнейших технических параметров. Увеличение этого времени достигается как снижением потребляемой мощности, так и установкой в мобильные устройства миниатюрных электрогенераторов для подзарядки химических источников тока. Большинство встроенных электрогенераторов работают на пьезоэлектрическом эффекте, ис-

пользуя механическую энергию вибраций при перемещении мобильных устройств. Мощность встроенных электрогенераторов достигает сотен микроватт.

Подавляющее большинство стационарных электронных устройств питается от электрической сети. Энергопотребление определяется электронными компонентами, используемыми в устройствах. Усреднённые оценки обычно выполняются на основе документов ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors).

В современных КМОП-микросхемах энергия потребляется только в процессе переключения логических элементов и расходуется на перезарядку внутренних емкостей. Ёмкости, связанные с транзисторами, многократно меньше емкостей многоуровневой системы электрических соединений. Усреднённая потребляемая мощность пропорциональна напряжению питания, частоте синхронизации и площади кристалла. Поэтому для снижения энергопотребления необходимо использовать новые полупроводниковые технологии с нанометровыми размерами элементов.

Главным препятствием на пути миниатюризации элементов микросхем являются физические ограничения. Напряжение питания не удаётся снизить пропорционально размерам элементов. Поэтому плотность мощности и плотность тока в проводниках возрастают с уменьшением размеров. Документ ITRS устанавливает максимально допустимую плотность мощности не более 0,64 Вт/мм² для микросхем коммерческого назначения без жидкостного охлаждения.

В аппаратуре с жидкостным охлаждением достигнута плотность мощности более 7 Вт/мм². Однако, и эта величина значительно меньше той, которая может возникнуть в микросхемах, разработанных без учёта тепловых ограничений.

Вторым критическим ограничением является плотность тока в сигнальных проводниках. Удельная ёмкость проводников слабо зависит от их ширины. Плотность размещения проводников увеличивается с уменьшением размеров элементов. Ёмкость в нагрузке логического элемента незначительно зависит от размеров транзисторов, а допустимая ёмкость определяется предельной плотностью тока. В современных микросхемах используются многослойные структуры проводников на основе меди, допускающие предельную плотность тока 10 мА/мкм². В микросхемах с нанометровыми размерами эта величина не обеспечивает максимально возможное быстроедействие логических элементов и устройства в целом. Плотность тока приходится ограничивать путём увеличения выходного сопротивления логических элементов, увеличения ширины и ограничения длины проводников. Эти ограничения отрицательно влияют на быстроедействие и производительность прибора.

Проектирование микросхем и вычислительных систем в условиях энергетических ограничений привело к тому, что основным критерием производительности вычислительной системы стала энергетическая эффективность, измеряемая в количестве операций на единицу энергии.

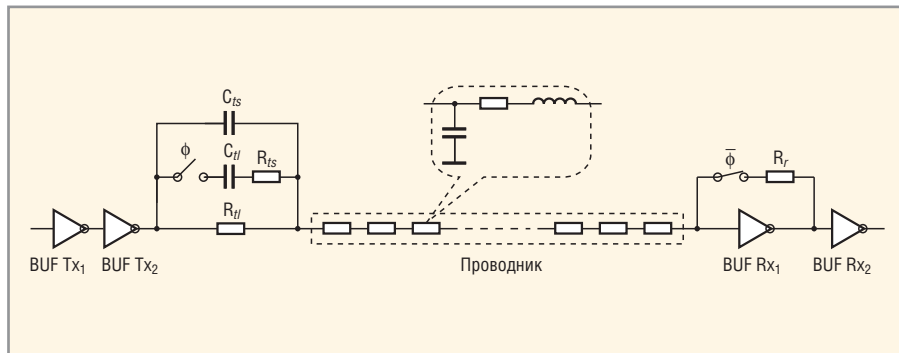
Очевидно, что снижение энергопотребления требует комплексного подхода с оптимизацией на каждом этапе проектирования.

На этапе выбора технологии и элементной базы предпочтение должно отдаваться логическим элементам с меньшей площадью, поскольку пропорционально площади уменьшается и потребляемая мощность. В логи-

ческих элементах на проходных ключах логическая функция реализуется с использованием только n-канальных МОП-транзисторов. В инверторе с положительной обратной связью (триггер Шмитта) используется три транзистора. Триггер Шмитта обеспечивает короткие фронты выходных сигналов при медленном изменении выходных. Для реализации сложных логических функций на проходных ключах требуется меньше транзисторов. Сравнение вариантов реализации сложных блоков в условиях энергетических ограничений показало, что площадь функционального блока на проходных ключах в три раза меньше, чем площадь аналогичного блока при использовании традиционной КМОП-схемотехники.

На этапе оптимизации режимов работы функциональных блоков обязательно используется совместное динамическое управление напряжением питания и частотой синхросигнала. Причём сначала понижается частота синхросигнала, а затем напряжение питания. При обратном переходе сначала повышается напряжение, а затем частота.

На этапе оптимизации архитектуры главное внимание сосредоточено на распределении блоков памяти. Сейчас до 70% площади кристалла среднего вычислителя занято блоками памяти. Самые длинные проводники располагаются как раз в блоках памяти и в связанных с ней шинах. Существенным является то, что обращение к локальным регистрам требует в 5–7 раз меньше энергии, чем обращение к общей памяти. Использование оптимизированной иерар-



Структурная схема канала связи на кристалле с переключением потенциального и токового режимов

хической структуры, в которой вычислитель чаще обращается к локальным блокам памяти и значительно реже – к общим, позволяет значительно повысить энергоэффективность.

Другим энергозатратным процессом является распределение синхросигнала. Применение триггеров, которые переключаются как по фронту, так и по срезу синхросигнала, позволяет вдвое снизить частоту и мощность цепи распределения.

Передача сигналов по длинным проводникам на кристалле составляет значительную часть энергопотребления. Сравнение линий связи с потенциальным и токовым управлением показало, что на низких частотах передача сигнала уровнем напряжения обеспечивает меньшее энергопотребление. На высоких частотах передача сигнала уровнем тока при низком перепаде напряжения в линии даёт значительное уменьшение энергии на единицу передаваемой информации. Оптимальная система должна переключать потенциальный и токовый режимы в зависимости от частоты сигнала в линии связи. На рисунке представлена

структурная схема канала связи на кристалле с переключением потенциального и токового режимов передачи информации.

Таким образом, при разработке энергоэффективных полупроводниковых приборов необходимо учитывать максимально возможное число факторов и вести оптимизацию по широкому набору параметров. Необходимо не только выполнять критические ограничения по плотности токов и мощности, но и снижать выделяемую мощность каждого узла, шины и функционального блока. Современные средства САПР предлагают достаточный инструментарий для решения этой проблемы, однако многие маршруты разработки интегральных схем в отечественных дизайн-центрах не уделяют должного внимания проблеме энергоэффективности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горшкова Н.М., Гергель В.А., Матвеев О.С. Энергосбережение в полупроводниковой нанoeлектронике. Нанотехнологии: наука и производство. 2009. № 4(5). С. 27–32.



Реклама