

АНАЛОГОВЫЕ БЛОКИ В СИСТЕМАХ НА КРИСТАЛЛЕ

Ю.Адамов, Я.Губин,
А.Сибагатуллин,
О.Сомов

Создание аналоговых электронных блоков, отвечающих современным требованиям, можно без особого преувеличения назвать искусством. Тем более, если речь идет об аналоговых блоках для систем на кристалле, при производстве которых используются субмикронные технологии. Мы рады предоставить специалистам компании «Юник Ай Сиз» возможность поделиться опытом подобных разработок.

ОСОБЕННОСТИ АНАЛОГОВЫХ БЛОКОВ

Современные способы проектирования систем на кристалле (СНК) предусматривают использование готовых сложнофункциональных (СФ, IP) блоков, реализованных по принципу «включи и работай» (plug-and-play). Главное условие соблюдения этого принципа – совместимость, которая должна обеспечиваться единой методологией, включающей требования и рекомендации к спецификации, реализации и использованию СФ-блоков. Общие требования к спецификации предполагают наличие моделей высокого уровня, детального описания функционирования и используемой технологии. Рекомендации по реализации предусматривают разработку СФ-блоков как автономных устройств с компактными инфраструктурными блоками (интерфейсы, системы питания и синхронизации, встроенные средства контроля). И, наконец, правилами использования определяются такие способы объединения СФ-блоков в систему, которые обеспечат наименьшее взаимовлияние. Специфика проектирования аналоговых блоков проявляется в каждой из этих составляющих.

Основная трудность разработки аналоговых блоков не в том, чтобы создать устройство, принципиально реализующее заданную функцию, а в том, чтобы добиться требуемых параметров этого устройства. А параметры в первую очередь зависят от характеристик используемых полупроводниковых приборов, то есть от технологического процесса изготовления микросхем. Сегодня для СНК в основном используется субмикронная КМОП-технология. Предельное быстродействие, достигаемое при использовании техпроцесса с минимальным размером элементов 0,25 мкм, составляет 600 МГц для цифровых блоков (тактовая частота синхрогенераторов) и 1200 МГц для аналоговых (радиочастотные блоки и интерфейсы проводной связи). При переходе на меньшие размеры элементов рабочие частоты можно повысить соответственно до:

- 1,2 ГГц (тактовая частота) и 2,5 ГГц (частота радиосигнала) для 0,18 мкм;
- 2,5 ГГц (тактовая частота) и 5 ГГц (частота радиосигнала) для 0,13 мкм;
- 5 ГГц (тактовая частота) и 10 ГГц (частота радиосигнала) для 0,09 мкм.

Однако при уменьшении размеров снижаются рабочее напряжение и коэффициент усиления транзисторов, возрастают утечки и разброс параметров.

Аналоговые СФ-блоки, разработанные для одного техпроцесса, как правило, невозможно использовать в СНК, изготавливаемых с применением другого техпроцесса, поскольку параметры блоков напрямую зависят от технологии. Возможно, для реализации некоторых аналоговых функций КМОП-технология – не самая удобная, но разработчики СФ-блоков должны использовать ту технологию, которая выбирается для системы на кристалле. В то же время наличие аналоговых блоков учитывается при выборе технологии для СНК. В этой технологии используется более дорогой модифицированный КМОП-техпроцесс, в котором дополнительно формируются высокоомные резисторы, конденсаторы со структурой металл–диэлектрик–металл (МДМ), индукторы, биполярные диоды, транзисторы с уменьшенными утечками. Применяются эпитаксиальные структуры на низкоомной подложке. Для аналоговых и цифровых блоков устанавливаются различные проектные нормы.

Для того чтобы эффективно использовать преимущества и компенсировать недостатки современной КМОП-технологии, надо следовать ряду правил. Во-первых, если есть возможность реализовать нужную функцию в виде цифрового блока, то следует выбирать цифровой вариант реализации. Во-вторых, если можно понизить требования к быстродействию аналогового блока, то это надо сделать обязательно. В-третьих, не рекомендуется экономить площадь за счет пассивных элементов (конденсаторов, индукторов, экранов, резисторов) аналогового СФ-блока.

При анализе требований к быстродействию нужно учитывать роль алгоритмов обработки информации и коррекции ошибок. Предельное быстродействие аналогового блока ограничивается не нарушением функционирования, а снижением соотношения сигнал/шум и соответствующим возрастанием искажений в передаваемой информации. Современные методы обработки сигналов позволяют компенсировать искажения, даже если количество ошибок составляет несколько процентов от объема цифрового кода.

Чрезвычайно важно учитывать влияние таких дестабилизирующих факторов, как помехи и разброс параметров транзисторов. Задача

Представляем авторов статьи

АДАМОВ Юрий Федорович. Д-р техн. наук, профессор, начальник отдела разработки высокочастотных и высокоскоростных ИМС ООО «Юник Ай Сиз». Тел. (095) 530-75-38, e-mail adamov@uniqueics.com

ГУБИН Ярослав Сергеевич. Инженер сектора разработки цифровых интерфейсов ООО «Юник Ай Сиз». E-mail yaroslav@uniqueics.com

СИБАГАТУЛЛИН Артур Гиниятович. Инженер сектора разработки быстродействующих аналогово-цифровых интегральных схем ООО «Юник Ай Сиз». E-mail: artsib@uniqueics

СОМОВ Олег Анатольевич. Руководитель сектора разработки цифровых интерфейсов ООО «Юник Ай Сиз». E-mail: oleg@uniqueics.com



очень сложная. Чаще всего уровень помех и разброс параметров транзисторов оценивают отдельно. В пределах заданных значений площади и быстродействия пытаются заранее применить все известные средства борьбы с влиянием этих факторов. Ориентируясь на ограничения по усилению и быстродействию транзисторов, проводят оптимизацию электрической схемы с учетом топологии и разброса параметров. К сожалению, влияние помех и шумов пока в основном оценивается экспериментально, после изготовления тестового кристалла. Но есть надежда, что развитие новых средств САПР позволит заранее оценить и эти факторы.

Проектирование аналогового СФ-блока включает следующие этапы:

- расчет-прогноз параметров на основе опыта предыдущих проектов, разработка структурной схемы и спецификации;
- разработка системной модели, расчет-прогноз параметров внешних цепей и условий применения;
- оценочный расчет допустимого разброса параметров транзисторов;
- оценка электрической мощности;
- разработка первого варианта электрической схемы;
- разработка эскизного топологического проекта;
- уточненный расчет параметров транзисторов, линий связи, пассивных элементов, прогноз статистических отклонений;
- разработка полной электрической схемы с уточненными параметрами и встроенными средствами контроля;
- статистический анализ модели;
- расчет шумов и помех;
- анализ работы модели с внешним окружением;
- разработка топологии блока;
- верификация модели;
- разработка спецификации и модели высокого уровня;
- изготовление тестового кристалла и аттестация блока.

В целом последовательность этапов аналогична маршруту создания цифровых блоков, но есть и существенные различия, на которых следует остановиться подробнее.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МОДЕЛИ СФ-БЛОКА

Уменьшение размеров транзисторов привело к увеличению разброса их параметров на кристалле даже в условиях хорошо управляемого стабильного техпроцесса. В аналоговых блоках разброс параметров – основной фактор, определяющий соотношение “точность – быстродействие – потребляемая мощность”. Моделирование аналоговых блоков с учетом статистического разброса параметров элементов позволяет:

- уменьшить чувствительность схемы к разбросу параметров за счет подбора размеров транзисторов и размещения элементов внутри блока;
- увеличить параметрическую надежность разрабатываемых блоков;
- снизить риск неоптимального проектирования.

Влияние результатов статистического анализа на успешное завершение проекта возрастает с уменьшением размеров элементов.

Основа статистического анализа – данные о разбросе параметров элементов, характерные для используемого техпроцесса. Большинство фабрик для измерения величины разброса параметров изготавливают специальные тестовые кристаллы. При анализе различают локальный разброс в пределах одного кристалла и глобальный разброс между кристаллами, пластинами и различными производственными партиями пластин. Глобальный разброс ограничен производственными нормами. Если параметры выходят за пределы этих норм, то пластины бракуются.

Локальный разброс имеет две основных составляющих – микроскопическую и макроскопическую. Микроскопическая составляющая

разброса определяется флуктуацией параметров физической структуры в расположенных рядом идентичных элементах. Толщина подзатворного окисла в субмикронных МОП-транзисторах составляет от пяти до десяти молекулярных слоев, а число атомов легирующей примеси в области пространственного заряда под затвором – менее тысячи. Статистические флуктуации тока в приборах минимальных размеров составляют единицы процентов.

Макроскопическая составляющая разброса – следствие неоднородности условий обработки пластин. Температура, концентрация реагентов, толщина фоторезиста, мощность излучения в рабочих камерах технологических установок имеют линейный либо центрально-симметричный градиенты. В результате прохождения всех этапов техпроцесса на пластине формируется сложный рельеф макроскопических неоднородностей, который зависит от расположения пластины в рабочей камере и характеристик используемого технологического оборудования. Но обычно наблюдаются именно линейные и центрально-симметричные составляющие, при этом на краях пластины амплитуда неоднородностей резко возрастает. Характерные размеры макроскопических неоднородностей – от сотен микрометров до сотен миллиметров.

Для аналоговых микросхем наиболее важным является рассогласование параметров элементов, входящих в один функциональный блок. Зависимость разброса параметров элементов от их размеров и положения на кристалле описывается “законом Пеллгрма”:

$$s^2(DP) = \frac{A_p^2}{W \cdot L} + S_p^2 \cdot D^2, \quad (1)$$

где $s^2(DP)$ (дисперсия разности параметров DP) двух одинаковых транзисторов (или других элементов) зависит от расстояния D между ними и активной площади $W \cdot L$ (L и W – длина и ширина канала). A_p и S_p – параметры, определяемые экспериментально на основе измеренных величин разброса. Формула (1) – приближенная и не учитывает эффектов увеличения разброса на краях пластины, нелинейности зависимости дисперсии от расстояния между элементами. Для уточнения “закона Пеллгрма” увеличивают количество эмпирических коэффициентов. Усовершенствованные модели содержат до шести слагаемых в формуле для дисперсии и девяти эмпирически подбираемых коэффициентов. Простейшая и уточненная модели разброса могут давать оценки, различающиеся на десятки процентов, но не в несколько раз. Определение эмпирических коэффициентов требует времени и немалых затрат. В большинстве случаев для схемотехнических расчетов используется простейшая формула (1).

Для качественной оценки разброса параметров МОП-транзисторов с длиной затвора 0,25 мкм можно использовать следующие значения коэффициентов в формуле Пеллгрма:

$$s(V_{TOP}) = \frac{7[\text{мВ} \cdot \text{мкм}]}{W \cdot L} + 1 \left[\frac{\text{мВ}}{\text{мкм}} \right] \cdot D, \quad (2)$$

$$s(I_{HAC}) = \frac{0,8[\% \cdot \text{мкм}]}{W \cdot L} + 0,1 \left[\frac{\%}{\text{мкм}} \right] \cdot D. \quad (3)$$

Расчет параметров глобального разброса ведется методом последовательного усреднения. Сначала сравнивают средние значения параметров элементов в соседних кристаллах, затем в соседних зонах пластины, далее на пластинах одной партии, разных партий и т. д. При схемотехническом моделировании необходимо одновременно учитывать влияния и локального, и глобального разброса параметров. Считается, что процессы глобального и локального разброса статистически независимы, поэтому общая дисперсия любого параметра принимается равной сумме локальной и глобальной дисперсий. Глобальный разброс действует на все элементы схемы, локальный учитывается только для функционального блока.

Для статистического анализа нельзя непосредственно использовать данные измерений тестовых структур, необходимо уметь на основе этих данных оценивать разброс параметров электрических моделей элементов. Для такой оценки используют статистическую связь физически измеренных параметров и параметров моделей. Она характеризуется величиной ковариации

$$\text{cov}(x, y) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - M_x) \cdot (y_i - M_y), \quad (4)$$

где x , y – измеренные значения; n – количество измерений; M_x , M_y – математические ожидания величин x и y . Для сравнения разных параметров удобнее пользоваться безразмерным коэффициентом корреляции

$$r(x, y) = \frac{\text{cov}(x, y)}{s_x s_y}. \quad (5)$$

Статистическая связь между параметрами в общем случае нелинейная. Однако отклонения от среднего значения обычно невелики (5–15%), и для практических целей статистическую зависимость принято считать линейной, а коэффициент корреляции – постоянным и не зависящим от величины x и y . Коэффициенты корреляции одинаковы для локального и глобального разбросов.

Подготовка данных для статистического моделирования включает расчет разброса параметров моделей элементов на основе нескольких базовых параметров, полученных по результатам измерений тестовых структур. При моделировании КМОП-схем выделяются шесть–восемь главных независимых параметров, которые и определяют технологический разброс характеристик приборов. Для главных параметров устанавливаются границы глобального разброса и эмпирические коэффициенты в формуле Пелгрома (1).

Получить статистическое распределение выходных параметров аналогового блока простым перебором случайных величин практически невозможно. Требуемые объемы вычислений и обработки их результатов очень велики. Поэтому для оценки статистического разброса совместно используются несколько методов.

Метод наихудшего случая требует 2^n вариантов расчета схемы для n входных статистически независимых главных параметров. Расчеты ведутся для случаев максимального отклонения главных параметров от их математического ожидания. Результатом расчетов являются максимальные отклонения выходных параметров блока от значений, полученных при моделировании с величинами главных параметров, соответствующими их математическим ожиданиям.

Метод границ параметров представляет собой разновидность метода наихудшего случая и требует $2 \cdot n$ вариантов расчета для n входных параметров. Расчеты ведутся для случаев максимального отклонения только одного из главных параметров. Значения остальных параметров задаются равными их математическому ожиданию.

Выходные характеристики аналоговых блоков также являются статистическими величинами. Для практически значимых задач закон распределения выходных параметров всегда принимается нормальным. Отклонения от нормального распределения достаточно малы и в схемотехнических расчетах игнорируются. Дисперсию выходных параметров можно оценить аналитически с помощью специальных методов. Когда размерность схемы начинает превышать сотню транзисторов, объемы вычислений растут катастрофически. Чтобы уменьшить вычислительные затраты, для оценки разброса параметров таких схем используется принцип декомпозиции. Строится иерархическая модель схемы, выделяются статистически идентичные цепи, определяются критические пути прохождения сигнала, проводится оценка статистической корреляции сходных фрагментов. Экспериментально установ-

лено, что большинство функционально похожих блоков в микросхемах имеют мало отличающиеся статистические параметры. В схеме, как правило, имеются фрагменты, разброс параметров которых мало влияет на разброс выходных характеристик, их можно игнорировать. Но зато очень важно выделить и проанализировать критические пути прохождения сигнала, от которых в основном зависят выходные параметры аналогового блока. Анализ влияния факторов глобального и локального разброса для упрощения расчетов можно проводить отдельно. Использование всех этих инструментов позволяет сократить объем вычислений на несколько порядков.

Обычные средства схемотехнического анализа мало подходят для статистических расчетов. Методически правильным является использование систем ускоренного аналогового моделирования типа Ultrasim фирмы Cadence, которые позволяют провести реальный статистический анализ выходных параметров аналогового блока на основе многократного моделирования со случайными значениями входных параметров. Использование таких специальных программ статистического анализа, как SPAYN фирмы Silvaco и SIGMAP фирмы Celestry позволяет упростить процедуру оценки разброса выходных параметров аналогового блока.

Проведению полноценного статистического анализа аналоговых блоков препятствуют большие затраты времени и вычислительных ресурсов. Однако игнорировать этот этап в современных условиях уже невозможно. Как минимум, необходимо учитывать глобальный разброс параметров при помощи метода границ параметров и проводить оценку влияния локального разброса для критических путей (суммированием оценок дисперсии для фрагментов, лежащих на критическом пути).

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ЦЕПЕЙ

Все СФ-блоки имеют связи с элементами, находящимися за пределами кристалла СНК. Размеры проводников в конструкции корпуса и печатной платы на несколько порядков превышают размеры элементов на кристалле микросхемы. Соответственно, увеличиваются их индуктивности и емкости. При разработке СФ-блоков детали конструкции еще неизвестны, однако многие характеристики внешних цепей легко прогнозировать. Параметры выводов используемых корпусов можно измерить или рассчитать, а возможные варианты подключения СФ-блоков к внешним цепям определены в спецификации.

Особое внимание необходимо уделить цепям питания. Шины питания на кристалле могут иметь значительное сопротивление, измеряемое десятками долями ома. Индуктивность одного вывода корпуса составляет до 10 нГ. Импульсные помехи в цепях питания цифровых элементов имеют величины в несколько десятых долей вольта или до 20% логического перепада. Обычно такие помехи совершенно неприемлемы для питания аналоговых блоков. И как правило, цепи питания аналоговых блоков отделены от питания цифровых. Индуктивность выводов питания совместно с емкостью в шинах питания на кристалле образуют параллельный колебательный контур, характеризующийся резонансной частотой 500–2000 МГц. Изменения тока потребления с периодом, кратным периоду резонансных колебаний паразитного контура, возбуждают резонансные помехи в цепи питания. Помехи проявляются даже на частотах, которые в несколько раз ниже резонансной частоты. Борьба с резонансными помехами ведется путем понижения резонансной частоты (блокировочные конденсаторы на кристалле) и добротности паразитного контура (включение резисторов между цепями питания с одинаковыми номиналами).

Реактивные параметры сигнальных выводов соответствуют резонансным частотам 1–4 ГГц. Для частот ниже 100 МГц резонансные помехи не проявляются в сигнальных цепях. Высокочастотные входы и



выходы должны иметь элементы согласования импедансов, понижающие добротность паразитного резонансного контура.

Индуктивности в цепях питания могут привести и к другим нежелательным эффектам. Например, если входная цепь отключена от источника сигнала или источник сигнала переведен в состояние с высоким импедансом, то емкость входной цепи будет медленно перезаряжаться входным током приемника. Когда входное напряжение достигнет порогового уровня, произойдет переключение схемы, сопровождающееся увеличением тока в цепи питания. При этом питающее напряжение изменится, так как ток будет ограничиваться индуктивностью в цепи питания. Изменение напряжения питания приведет к изменению порогового уровня, и схема переключится в исходное состояние. Хотя входное напряжение не меняется, схема будет постоянно переключаться с частотой до 100 МГц. Паразитная генерация многократно увеличивает ток потребления и может привести к отказу микросхемы. Для борьбы с паразитной генерацией на всех входах микросхемы (между входами и общей шиной) должны быть включены дополнительные резисторы с номиналом менее 10 кОм. Если на вход поступают импульсные сигналы, то предотвращению генерации способствует гистерезисная характеристика входного усилителя (триггер Шмитта). Если требуется линейное усиление входного сигнала, то необходимо стабилизировать ток потребления входных усилителей и обеспечить их отдельной цепью питания.

Информационные сигналы передаются между микросхемами по внешним сигнальным цепям. Скорость передачи информации ограничивается именно характеристиками сигнальных цепей, а не возможностями полупроводниковой технологии. В аналоговых микросхемах специально рассчитываются элементы согласования импедансов высокочастотных сигнальных цепей. Аналоговые блоки СНК находятся в более

тяжелых условиях, чем специализированные микросхемы. Во-первых, на них действуют помехи от других СФ-блоков СНК. Во-вторых, при проектировании высокочастотных аналоговых СФ-блоков заранее не известны точные параметры сигнальных цепей, в том числе реактивные параметры выводов корпуса. Искажения аналоговых сигналов в линиях связи напрямую влияют на потребительские качества электронного устройства. Согласование импедансов приемников и передатчиков аналоговых сигналов с импедансом линии связи требует использования дополнительных внешних элементов либо специальных блоков управления импедансом на кристалле СНК.

Еще одна проблема связана со стойкостью микросхем к электростатическим разрядам (ЭСР). Защита от них осуществляется введением в схему элементов, которые замыкают входы и выходы микросхемы с цепями питания в случае перегрузки или электростатического разряда через выводы схемы. В нормальном рабочем режиме элементы защиты от ЭСР должны оказывать минимальное влияние на схему. Проблема состоит именно в этом влиянии. Ток разряда может превышать 2 А. Элемент защиты должен иметь суммарное сопротивление 2–3 Ом. Размеры и соответствующая им емкость элементов защиты определяются максимальным током разряда. Элементы защиты вносят во входные и выходные цепи дополнительную емкость 0,5–1,0 пФ. К сожалению, эта дополнительная емкость в сигнальных цепях мешает согласованию импедансов, и ради повышения рабочей частоты иногда приходится жертвовать стойкостью к ЭСР.

В следующей части статьи мы рассмотрим вопросы топологического проектирования, аттестации аналоговых блоков, проблемы создания моделей высокого уровня. Большое внимание будет уделено расчету помех, шумов и методам их снижения. *Продолжение следует...*