

Методология проектирования прецизионных аналоговых блоков

Евгения КИРИЛЛОВА
jane_kir@mail.ru

Проектирование аналоговых электронных блоков, отвечающих современным требованиям, можно назвать искусством, поскольку аналоговая топология обычно очень сложна. В данной статье рассматривается методология проектирования прецизионных аналоговых блоков (ПАБ), позволяющая добиться от реализуемого устройства требуемых параметров. Приводится достаточно большой перечень факторов, требующих учета при проектировании ПАБ.

Введение

Процесс уменьшения геометрических норм и увеличения сложности проектов сопровождается усложнением системы правил проектирования. В результате планировка кристалла, содержащего аналоговые и радиочастотные блоки, требует огромной ручной работы для задания на верхнем уровне проектирования всего необходимого множества ограничений. В этой связи становится актуальным вопрос о методологии проектирования прецизионных аналоговых блоков. Прецизионными аналоговые блоки не становятся в процессе проектирования, а задаются по ТЗ, так как прецизионные — это значит точные. К таким блокам можно отнести операционные усилители с малым смещением нуля, источники опорного напряжения, точные компараторы в ЦАП и АЦП и т. п.

Особенности аналоговых блоков

Основная трудность разработки аналоговых блоков состоит не только в том, чтобы создать устройство, принципиально реализующее заданную функцию, но еще и в том, чтобы добиться требуемых параметров этого устройства [1]. Причем реализация второго гораздо сложнее первого, так как параметры в первую очередь зависят от технологического процесса изготовления микросхем. Поэтому проектирование любых аналоговых схем начинается с выбора технологии изготовления ИМС. Сегодня для производства аналоговых и цифро-аналоговых интегральных микросхем в основном используется субмикронная КМОП-технология. Для улучшения параметров аналоговых блоков радиочастотного диапазона, для быстродействующих ЦАП и АЦП, а также быстродействующих логических схем с большой нагрузочной способностью (мощные выходные транзисторы) лучше всего использовать технологию БикМОП. При производстве аналоговых и смешанных ИМС, содержащих высоковольтные прецизионные аналоговые блоки (15–25 В),

по КМОП-технологии широко используются поверхностные биполярные структуры и высоковольтные транзисторы с разрывом на толстый окисел. Можно использовать более дорогой и модифицированный КМОП-техпроцесс, в котором дополнительно формируются высокоомные резисторы, конденсаторы со структурой металл–диэлектрик–металл (МДМ), индукторы, биполярные диоды, транзисторы с уменьшенными токами утечки, что очень актуально для разработки прецизионных аналоговых блоков. Однако для более эффективного использования преимуществ и компенсации ряда недостатков современной КМОП-технологии рекомендуется следовать ряду правил [1].

Если можно понизить требования к быстродействию аналогового блока, то это надо сделать обязательно. При проектировании цифро-аналоговых схем рекомендуется заранее продумывать расположение прецизионных аналоговых блоков относительно сильно шумящих блоков остальной схемы, по принципу «чем дальше, тем лучше». Если жесткие ограничения по площади кристалла не позволяют воспользоваться данным принципом, то рекомендуется не экономить места на охранные кольца экранированной защиты вокруг ПАБ. Кроме того, располагать прецизионные аналоговые блоки следует как можно ближе к геометрическому центру кристалла. И, наконец, не рекомендуется экономить площадь за счет пассивных элементов (конденсаторов, индукторов, экранов, резисторов) для аналогового блока. Наоборот, рекомендуется закладывать при проектировании топологии некоторые подстроечные элементы, особенно при сложной схемотехнической реализации, а также фиктивные элементы в случае согласования, о чем будет подробно рассказано далее.

Проектирование аналоговых блоков

С уменьшением геометрических размеров и повышением быстродействия проблема учета тонких физических эффектов на кри-

сталле становится при проектировании доминирующей. Упрощенные модели на большинстве этапов разработки уже не годятся. Чтобы обеспечить надежное проектирование при нормах 0,35–0,11 мкм необходимы точные модели и специальные средства анализа, учитывающие влияние таких факторов, как сложные паразитные RC-структуры, падение напряжения в шинах питания, индуктивность, электромиграция, высокочастотные эффекты, шум подложки [2].

При анализе требований к быстродействию нужно учитывать, что предельное быстродействие аналогового блока ограничивается не нарушением функционирования, а снижением соотношения сигнал/шум и соответствующим возрастанием искажений в передаваемой информации [1].

Необходимо принимать во внимание влияние и таких дестабилизирующих факторов, как помехи и разброс параметров КМОП-транзисторов. Задача очень сложная, поэтому чаще всего уровень помех и разброс параметров транзисторов оценивают отдельно и пытаются заранее применить все известные средства борьбы с влиянием этих факторов, ограничиваясь заданными значениями быстродействия и площади кристалла. Далее проводят оптимизацию электрической схемы с учетом топологии и разброса параметров, так как влияние помех и шумов оценивается пока исключительно экспериментально, после изготовления тестового кристалла [1].

Проектирование прецизионных аналоговых блоков для цифро-аналоговых ИМС включает в себя следующие этапы:

1. Расчет и анализ параметров на основе опыта предыдущих проектов, разработка структурной схемы.
2. Разработка системной модели блока, расчет и анализ параметров внешних цепей и условий применения.
3. Оценочный расчет допустимого разброса параметров транзисторов.
4. Оценка потребляемой мощности блока.

5. Разработка первого варианта электрической схемы.
6. Разработка эскизного топологического проекта с учетом подстроечных и фиктивных элементов схемы.
7. Уточненный расчет параметров транзисторов, линий связи, пассивных элементов, анализ статистических отклонений.
8. Разработка полной электрической схемы с уточненными параметрами и встроенными средствами контроля.
9. Статистический анализ модели блока.
10. Расчет шумов и помех.
11. Анализ работы блока с внешним окружением.
12. Разработка окончательного варианта топологии блока с учетом проведенных расчетов и анализов, а также с обязательным согласованием элементов.
13. Проверка норм КТО и верификация.
14. Изготовление тестового кристалла и аттестация блока.

В целом последовательность этапов проектирования прецизионных аналоговых блоков аналогична маршруту проектирования цифровых блоков, но есть и существенные отличия [1]. Подробное описание статистического анализа модели, учета влияния внешних цепей, методов борьбы с шумами и помехами можно найти в технической литературе.

Специфика проектирования прецизионных аналоговых блоков

Специфика проектирования топологии ПАБ состоит в том, что характеристики аналоговой схемы в большой степени зависят от физической реализации. В целом, чтобы процесс разработки шел более эффективно, рекомендуется придерживаться следующих правил [3]:

1. Определить приоритеты в системе параметров аналогового блока. Невозможно существенно улучшить все параметры одновременно. Для второстепенных параметров следует установить только граничные значения.
2. Проанализировать результаты технологических тестов, которые фабрики предоставляют разработчикам.
3. Выделить список критических узлов и фрагментов, определяющих выходные параметры блока. Для всех узлов и фрагментов установить градации по точности, помехоустойчивости и коэффициенту шума.
4. Провести оценку и подготовить рекомендации по условиям применения блока. При этом надо учитывать, что минимальная рабочая температура, уровень шумов и помех будут на краю кристалла, удаленном от мощных источников сигнала, а минимальный градиент температуры и лучшая воспроизводимость параметров элементов обычно наблюдаются в центре кристалла.
5. Установить минимально допустимые расстояния от критических узлов до тепловы-

деляющих элементов и источников мощных помех.

6. Проводить вычисления и проектирование с помощью современных средств САПР.

Так как для прецизионных аналоговых блоков определяющее значение играет воспроизводимость параметров и согласованность элементов, рекомендуется располагать прецизионные блоки в геометрическом центре кристалла или как можно ближе к нему. Также рекомендуется обратить особое внимание на факторы, требующие учета при проектировании, и обязательное согласование элементов в особо чувствительных местах.

Факторы, требующие учета при проектировании

После корпусирования ИМС параметры прецизионных аналоговых блоков, расположенных внутри данной ИМС, могут сильно ухудшиться. При проектировании ПАБ следует учитывать паразитные свойства корпуса, а также увеличение плотности выводов и потребляемой мощности, повышение рабочей частоты, температурные эффекты и прочие параметры, зависящие от выбранного корпуса. При проектировании системы питания особое значение имеют такие факторы, как падение напряжения в шинах питания, увеличение плотности тока, электромиграция, области локального перегрева. При проектировании межсоединений следует обратить особое внимание на учет влияния механической и химической обработки пластины, влияние заливки металлом, искажения сигнала в проводниках, шумы, импульсные помехи, электромиграцию, индуктивность. При проектировании схемотики прецизионных аналоговых блоков необходимо учитывать эффекты на уровне транзисторов, такие как короткоканальные эффекты, разброс параметров на кристалле, паразитные свойства, подпороговые эффекты, использование транзисторов с разными пороговыми напряжениями, старение и надежность. При проектировании особо чувствительных мест нужно учесть паразитные свойства подложки, шумы, температурные эффекты [2].

Модели подложки должны позволять анализировать разнообразные температурные эффекты и влияние цифрового шума на чувствительные аналоговые и радиочастотные блоки. Для моделирования надежности необходимы новые средства, учитывающие значительный разброс параметров полупроводниковых компонентов внутри кристалла, особенности работы с несколькими значениями пороговых напряжений, эффекты старения. Анализ надежности межсоединений должен учитывать влияние процессов механической и химической обработки пластин на проводники и окружающий диэлектрик, электромиграцию и искажения высокоскоростных сигналов в проводниках. Увеличение плотности выводов в корпусах при увеличении

потребляемой мощностью порождает необходимость тщательного моделирования температурных режимов при выборе корпуса для аналоговой ИМС [2].

В настоящее время большинство кремниевых производств имеют специально спроектированные тестовые кристаллы для измерения величины разброса параметров. Разброс параметров интегральных элементов схемы является следствием пространственных и временных флуктуаций параметров технологического процесса, таких как плотность ионного пучка, поток окислителя при получении подзатворного окисла, температура разгонки примеси, абберрация оптической системы, шероховатость поверхности фоторезиста и т. п. В аналоговых ИМС разброс параметров является основным фактором, определяющим соотношение «точность–быстродействие–потребляемая мощность». Для цифровых ИМС он является одним из барьеров, ограничивающих дальнейшее уменьшение размеров транзисторов [4].

Разброс параметров неизбежен даже для хорошо управляемых и стабильных техпроцессов. В итоге он приводит к разбросу параметров самой интегральной схемы около номинальных значений, указанных в спецификации. Часть ИМС, параметры которых выходят за границы допустимых значений, уходит в брак. Увеличения коэффициента выхода годных можно достичь еще при проектировании ИМС с помощью оптимального выбора размеров интегральных элементов (транзисторов, конденсаторов, резисторов) и их взаимного расположения на кристалле, а также путем моделирования электрической схемы, малочувствительной к разбросу параметров элементов. При этом следует учитывать моделирование эффектов, связанных со статистическим разбросом параметров. Также крайне важна оптимизация параметров технологического процесса для получения максимального процента выхода годных кристаллов и улучшения их характеристик. В любом случае тесное взаимодействие технолога и проектировщика ИМС не только приветствуется, но и становится крайне необходимым.

Различают статистический разброс параметров интегральных элементов в пределах одного кристалла (локальный разброс или рассогласование параметров) и между интегральными элементами, расположенными на разных кристаллах (глобальный разброс) [4].

Локальный разброс параметров

Локальный разброс (или рассогласование параметров) интегральных элементов часто вызван особенностями топологии и топографии кристалла, например, разбросом ширины металлических проводников или канала МОП-транзисторов. Локальный разброс может быть случайным и систематическим. Систематический обусловлен пространственным градиентом характеристик технологического оборудо-

вания и может составлять 50% от общего разброса. Наибольшее влияние на характеристики ИС имеет систематический разброс эффективной длины канала МОП-транзистора. Он связан с искажениями изображения вследствие оптической аберрации линзы вблизи предела ее оптического разрешения. Такой разброс параметров в нанометровых структурах с характерными размерами 0,1 мкм и менее намного превышает случайный компонент разброса. Поэтому моделирование с использованием представлений о разбросе параметров как о случайном процессе дает очень большую ошибку для нанометровых структур [4]. Однако систематический компонент локального разброса легко может быть скомпенсирован конструктивными мерами, чего нельзя сделать со случайным разбросом.

Случайный компонент локального разброса параметров связан, в первую очередь, с пространственным разбросом эффективной длины канала МОП-транзистора. Второе по величине влияние оказывает пороговое напряжение V_{th0} и токовый множитель β . Причиной локального разброса порогового напряжения V_{th0} является флуктуация общего заряда легирующей примеси в канале МОП-транзистора, а рассогласование по току β определяется разбросом эффективной длины и ширины канала, который вызван неровностями его границ. Для длинноканальных транзисторов на разброс β влияет также флуктуация подвижностей носителей заряда. Поскольку перечисленные причины являются пространственно-независимыми, то параметры V_{th0} и β оказываются статистически независимыми, если рассматривать только их локальный разброс [4].

Примером локального разброса служит разброс параметров транзисторов дифференциального каскада операционного усилителя, когда характеристики схемы определяются разностью параметров двух транзисторов, а не их абсолютным разбросом. В АЦП и ЦАП разброс порогового напряжения величиной в единицы милливольт или менее может существенно влиять на характеристики ИС или выход годных. Локальный разброс (рассогласование параметров) может быть уменьшен конструкторскими решениями, учитывающими взаимное расположение транзисторов и их геометрию [4].

Расчет рассогласования элементов

Зависимость разброса параметров элементов от их размеров и положения на кристалле описывается законом Пелгрона [1, 5]:

$$\sigma^2(\Delta P) = \frac{A_p^2}{W \times L} + S_p^2 \times D^2, \quad (1)$$

где $\sigma^2(\Delta P)$ — дисперсия разности параметров двух одинаковых транзисторов или других элементов, которая зависит от расстояния D между ними и активной площади $W \cdot L$ элемента; оставшиеся параметры определяются

Таблица 1. Степень согласования элементов

Согласование	Резисторы и конденсаторы		Транзисторы	
	Максимальная степень рассогласования (3 σ)	Типовое применение	Максимальная степень рассогласования (3 σ)	Типовое применение
Минимальное	$\pm 1\%$ (разрешающая способность 6–7 бит)	Схемы формирования статического смещения блоков	Рассогласование токов стоков не более нескольких процентов	Этот уровень соответствует типичным смещениям более ± 10 мВ и используется в схемах с низкими требованиями согласования по напряжению
Среднее	$\pm 0,1\%$ (разрешающая способность 9–10 бит)	Аналоговые схемы, обеспечивающие точность порядка 1%	Напряжения смещения ± 5 мВ или рассогласование токов стоков меньше чем $\pm 1\%$	Используется для построения входных каскадов некритичных операционных усилителей и компараторов, где допускается смещение ± 10 мВ
Точное	$\pm 0,01\%$ (разрешающая способность 13–14 бит)	11–12* разрядные АЦП и ЦАП, инструментальные усилители	Напряжения смещения меньше чем 1 мВ или рассогласование токов стоков меньше чем $\pm 0,1\%$	Прецизионные схемы, как правило, с дополнительной настройкой согласования в заданном диапазоне температур

* Для достижения данной степени согласования конденсаторы более предпочтительны.

экспериментально на основе измеренных величин разброса. Данная формула является приближенной и не учитывает эффектов увеличения разброса на края пластины и нелинейности зависимости дисперсии от расстояния между элементами.

Для более точного расчета рассогласования отдельно взятой пары или группы элементов используют следующие формулы [6, 7].

Рассогласование одной пары элементов:

$$\delta = \frac{(x_2/x_1) - (X_2/X_1)}{(X_2/X_1)} = \frac{X_1 x_2}{X_2 x_1} - 1, \quad (2)$$

где x_1 и x_2 измеренные значения, а X_1 и X_2 — предполагаемые (идеальные) значения.

Среднее рассогласование группы элементов:

$$m_\delta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_i, \quad (3)$$

где N — количество пар элементов, а σ_i — рассогласование i -той пары элементов.

Стандартное отклонение рассогласования:

$$s_\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\delta_i - m_\delta)^2}. \quad (4)$$

В зависимости от значения 3σ различают три степени согласования элементов: минимальное, среднее и точное. Таблица 1 показывает типовое применение резисторов, конденсаторов и транзисторов в зависимости от степени их согласованности [6].

Использование специальных топологических методов позволяет достичь близких к нулю значений среднего рассогласования. Стандартное отклонение рассогласования, определяемое неоднородностью материала и неравномерностью краев, можно оценить с помощью следующих выражений [6, 7]:

• для согласованной пары конденсаторов:

$$s_C = \frac{1}{\sqrt{C}} \sqrt{k_a + \frac{k_p}{\sqrt{C}}}, \quad (5)$$

где k_a и k_p — коэффициенты (постоянные для заданного технологического процесса и способа согласования), учитывающие

вклад в рассогласование неоднородности поверхности и периферии, соответственно; C — емкость конденсатора с наименьшими размерами соответственно;

• для согласованной пары резисторов:

$$s_R = \frac{1}{W\sqrt{R}} \sqrt{k_a + \frac{k_p}{\sqrt{W}}}, \quad (6)$$

где k_a и k_p — коэффициенты (постоянные для заданного технологического процесса и способа согласования), учитывающие вклад в рассогласование неоднородности поверхности и периферии, соответственно; W — ширина тела резисторов, R — сопротивление резистора с наименьшими размерами;

• для порогового напряжения согласованных транзисторов:

$$s_{Vt} = \frac{C_{Vt}}{\sqrt{W_{eff} L_{eff}}}, \quad (7)$$

где C_{Vt} — коэффициент (постоянный для заданного технологического процесса и способа согласования), W_{eff} и L_{eff} — эффективные ширина и длина канала наименьшего транзистора;

• для крутизны согласованных транзисторов:

$$\frac{s_k}{k} = \frac{C_k}{\sqrt{W_{eff} L_{eff}}}, \quad (8)$$

где C_k — коэффициент (постоянный для заданного технологического процесса и способа согласования), W_{eff} и L_{eff} — эффективные ширина, длина канала и крутизна наименьшего транзистора соответственно.

Для повышения степени согласования интегральных элементов необходимо четко представлять причины рассогласования и способы их устранения. Все это будет подробно рассмотрено далее.

Причины рассогласования элементов и способы их устранения

Причинами рассогласования элементов являются геометрические погрешности, механические напряжения, градиент механичес-

ких напряжений, изменение геометрии элементов, генерация напряжения, изменение параметров элементов и прочие. Тщательный анализ размещения согласованных элементов на кристалле может уменьшить чувствительность схемы к механическому напряжению и ряду других факторов [6, 7].

После корпусирования в кристалле возникают дополнительные механические напряжения, которые не учитывались в процессе измерения и настройки на пластине. Эти механические напряжения могут вызвать рассогласование элементов в прецизионных блоках. Механическое напряжение и его градиент минимальны в центре кристалла и в серединах его сторон, а максимальны в углах кристалла. Согласованные элементы необходимо располагать в местах с малым механическим напряжением, учитывая при этом, что удлинённый кристалл имеет более высокие уровни механических напряжений, чем квадратный кристалл той же площади.

Еще одной важной причиной рассогласования элементов является пьезочувствительность кремния, что проявляется в изменении его удельного сопротивления под действием механических напряжений. Поэтому согласованные элементы необходимо располагать вдоль осей с минимальной пьезочувствительностью.

Поликремниевые резисторы согласуются лучше большинства типов легированных и имплантированных резисторов, так как они в меньшей степени зависят от механических напряжений. Согласованные конденсаторы также малочувствительны к механическим напряжениям и обычно показывают меньшее систематическое рассогласование, чем согласованные резисторы.

Источниками рассогласования могут быть зернистость и дефекты пластины, смещение масок и неравномерность травления, наличие негативного влияния соседних структур и электростатическое взаимодействие, модуляция напряжением и инжекция заряда, а также диэлектрическая поляризация. Сильное влияние на рассогласование элементов прецизионных аналоговых блоков оказывает локальный разброс параметров элементов, особенно его макроскопическая составляющая, которая есть следствие неоднородности условий обработки пластин [1].

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. Характерные размеры макроскопических неоднородностей составляют от сотен микрометров до сотен миллиметров, при этом на краях пластины амплитуда неоднородностей резко возрастает [1].

Таблица 2. Причины рассогласования элементов и способы их устранения

Причина	Источник	Способ устранения
Аддитивные погрешности	Различная геометрия элементов и количество контактов	Разделение элементов на одинаковые сегменты, использование элементов с большой площадью
Механические напряжения	Внешнее механическое воздействие на кристалл	Правильное расположение на кристалле и на пластине. Оптимальная форма и размер кристалла
Градиент механических напряжений		Малое расстояние между элементами и их правильное расположение на кристалле. Использование common-centroid и cross-coupled размещений элементов. Применение материалов корпусов с низкими механическими напряжениями
Изменение геометрии элементов	Гранулярность и дефекты	Правильный выбор размеров, ориентации и формы элементов
	Смещение масок	Деление согласованных элементов на сегменты одного и того же размера
	Неравномерность травления	Добавление фиктивных элементов по краям рабочих
Температурный градиент	Мощные элементы	Правильное расположение на кристалле относительно мощных элементов
Генерация напряжения	Термоэлектрический эффект	Элементы (резисторы) должны состоять из четного числа сегментов: половина соединяется в одном направлении и половина в другом
Изменение параметров элементов	Наличие соседних структур	Правильное расположение на кристалле относительно соседних диффузионных и поликремниевых структур
	Присутствие контактов над рабочими областями	Избегать расположения контактов над затворами и телом резисторов или конденсаторов
Изменение номиналов	Электростатическое взаимодействие	Использование электростатического экранирования
	Модуляция напряжением	Использование электростатического экранирования
	Инжекция заряда	Использование электростатического экранирования
	Диэлектрическая поляризация	Использование электростатического экранирования

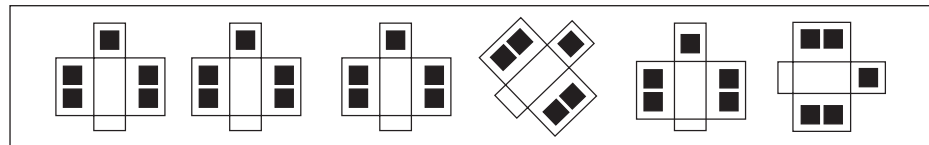


Рис. 1. Устройства, направленные в одну и ту же сторону, согласуются более точно, чем те, которые ориентированы в разные стороны

В таблице 2 подробно указаны причины и источники рассогласования элементов, а также способы их устранения [6].

Для минимизации рассогласования следует придерживаться основных правил проектирования топологии согласованных интегральных элементов.

Основные правила построения согласованных элементов

В общем случае можно выделить 4 основных принципа построения согласованных элементов [6, 7]:

1. Согласованные элементы должны состоять из идентичных сегментов, организованных в массив.
2. Все сегменты в массиве согласованных элементов должны иметь одинаковую ориентацию (рис. 1).
3. Массивы сегментов согласованных элементов должны иметь минимально возможное расстояние между геометрическими центрами или (желательно) общий центр.
4. Должны быть приняты меры по обеспечению равных условий для краевых и внутренних сегментов массива.

Далее рассмотрим конкретные топологические методы повышения степени согласованности интегральных элементов.

Размещение согласуемых элементов с общим центром

Расчет местоположения каждого элемента производится в соответствии с вкладом каждой части устройства в целом. оконча-

тельное расположение называется центром симметрии элемента. Центр симметрии прямоугольного элемента находится точно в его центре. Оси элементов других форм могут быть определены с применением принципа симметрии осей, который показывает, что центр симметрии фигуры должен лежать на оси симметрии этой фигуры [6, 7].

На рис. 2 показано, как с помощью этого принципа можно определить центр симметрии прямоугольника и резистора. Центр симметрии фактически любого элемента, используемого на практике, может быть определен подобным образом.

Согласуемые элементы следует разделять на идентичные сегменты. Сегменты должны быть расположены симметричным образом в виде массива так, чтобы геометрический центр элемента лежал на пересечении осей симметрии массива [6, 7].

Фактически возможно разместить два массива элементов так, чтобы они вместе использовали общие оси симметрии. Если это будет достигнуто, то принцип симметрии гарантирует, что геометрические центры этих двух элементов совпадут (common centroid), и это будет соответствовать нулевому расстоянию между элементами (рис. 3). При совпадении геометрических центров будет исключено влияние рассогласующих факторов, связанных с наличием на кристалле разного рода градиентов параметров (градиентов толщины окисла, механических напряжений, температуры и т. д.) [6, 7].

Массивы согласуемых элементов, имеющие общий центр, образуют общий массив

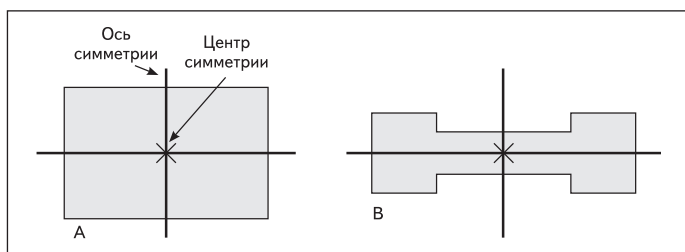


Рис. 2. Примеры определения центра симметрии

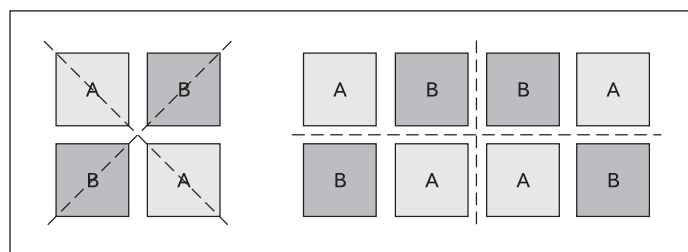


Рис. 5. Примеры построения массивов с перекрестными связями

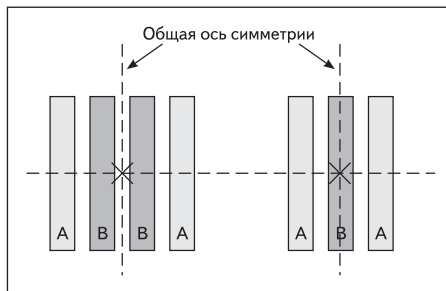


Рис. 3. Примеры размещения элементов с общим центром



Рис. 4. Примеры организации согласованных элементов с общим центром

сегментов согласованных элементов. При построении общего массива сегментов согласованных элементов (далее просто массива сегментов) с общим центром должны выполняться следующие правила.

1. **Совпадение:** геометрические центры согласуемых элементов должны совпадать.
2. **Симметрия:** массив сегментов должен быть симметричен вокруг обеих и X-, и Y-осей. В идеале эта симметрия должна быть результатом размещения сегментов в массиве, а не симметрии индивидуальных сегментов.
3. **Дисперсия:** массив сегментов должен иметь высокую степень дисперсии; другими словами, сегменты каждого согласуемого элемента должны быть распределены по массиву настолько равномерно, насколько это возможно.
4. **Компактность:** массив должен быть компактным насколько это возможно. В идеале, он должен быть почти квадратным.
5. **Ориентация:** каждый согласованный элемент должен состоять из равного числа сегментов, одинаково ориентированных в любом направлении.

На рис. 4 приведены примеры возможного построения массивов с общим центром из 2-х, 3-х и 4-х элементов с различными отношениями номиналов [6, 7].

Чем более компактным может быть сделано размещение с общим центром, тем менее восприимчивыми становятся согласованные элементы к нелинейным градиентам разброса параметров.

Двумерный массив с общим центром обеспечивает более высокую степень симметрии, потому что обе оси симметрии являются результатом размещения массива, а не сегментов, составляющих его. Размещения этого ви-

да показаны на рис. 5 и называются размещениями с перекрестными связями сегментов (cross-coupled).

Это не только очень компактное размещение, оно также удовлетворяет правилу ориентации, потому что два сегмента, принадлежащие каждой согласованной паре элементов, ориентированы в противоположных направлениях.

Это размещение особенно подходит для пар относительно небольших элементов.

На практике каждый элемент разделяется на две равные половины, которые размещаются в диаметрально противоположных углах массива.

Этот тип размещения обеспечивает лучшую защиту от градиентов, чем одномерные массивы, прежде всего из-за его компактности и дисперсии, возможной в пределах двумерного массива [6, 7].

Рекомендации по согласованию МОП-транзисторов

N-МОП транзисторы обычно согласуются более точно, чем P-МОП транзисторы. Это явление наблюдается в ряде различных процессов, включая варианты и с P-, и с N-карманом. P-МОП транзисторы показывают на 30–50% большее рассогласование по крутизне, чем сравнимые N-МОП.

Следующие рекомендации суммируют наиболее важные принципы построения согласованных МОП-транзисторов [6, 7]:

1. Использовать идентичную конфигурацию пальцев.
2. Использовать большие по площади рабочие области.
3. Ориентировать транзисторы в одинаковом направлении.
4. Размещать транзисторы, по возможности, вблизи друг от друга.

5. Использовать компактное размещение согласованных транзисторов.
6. Применять размещение с общим центром или с перекрестными связями сегментов.
7. Применять фиктивные элементы на краях массива пальцев транзисторов.
8. Размещать транзисторы в областях с низким градиентом механического напряжения.
9. Размещать транзисторы вдали от мощных элементов схемы.
10. Не размещать контакты над рабочими затворами.
11. Не проводить металл через рабочие затворы.
12. Размещать рабочие затворы вдали от всех переходов с глубокой диффузией.
13. Размещать точно согласованные транзисторы по осям симметрии кристалла.
14. Не позволять краям скрытого слоя пересекать область рабочего затвора.
15. Соединять затворы, набранные из пальцев, используя металлические связи.

Рекомендации по согласованию резисторов

Согласуемые резисторы разделяются на сегменты с одинаковой геометрией и конструктивным исполнением, которые объединяются в массивы. Сегменты согласованных резисторов должны содержать не менее пяти квадратов, обычное число квадратов в сегменте порядка двадцати. Если требуется сопротивление, соответствующее дробному числу сегментов, то предпочтительно использовать последовательно-параллельное соединение сегментов для достижения требуемого номинала.

Желательно использовать максимально возможную в заданных условиях ширину квадрата резистора для достижения наибольшего согласования.

Минимальное согласование может быть получено без особой трудности, умеренное — получено с использованием перемешивания. Точно согласованные резисторы трудно построить из-за изменений в сопротивлении контактов и наличия тепловых градиентов и градиентов механического напряжения.

Следующие правила суммируют наиболее важные принципы построения согласованных резисторов [6, 7]:

1. Выполнять согласованные резисторы из одинакового материала.

2. Выполнять согласованные резисторы достаточной ширины.
3. Ориентировать согласованные резисторы в одном и том же направлении.
4. Использовать размещение с общим центром для массивов сегментов согласуемых резисторов.
5. Использовать фиктивные сегменты на краях массива.
6. Избегать коротких сегментов для резисторов.
7. Подключать согласованные резисторы так, чтобы исключить термоэлектрические эффекты.
8. Располагать согласованные резисторы в областях с низким механическим напряжением.
9. Располагать согласованные резисторы вдали от мощных элементов.
10. Располагать точно согласованные резисторы на осях симметрии кристалла.
11. Избегать эффекта модуляции охранным контуром.
12. Использовать поликремниевые резисторы вместо диффузионных.
13. Располагать поликремниевые резисторы на полевом окисле.
14. Использовать поликремниевые резисторы P-типа вместо резисторов N-типа.
15. Не допускать пересечения скрытым слоем согласованных диффузионных резисторов.
16. Использовать электростатическое экранирование.
17. Избегать наличия неподсоединенного металла над согласованными резисторами.
18. Если металл все-таки пересекает согласованные резисторы, то он должен пересекать все сегменты одинаковым образом по специально выделенной низкоомной части.
19. Избегать чрезмерного рассеяния энергии на согласованных резисторах.

Рекомендации по согласованию конденсаторов

Согласуемые конденсаторы разделяются на квадратные сегменты, которые объединяются в массивы. Массивы сегментов согласованных конденсаторов размещаются по двумерным схемам с общим центром (в частности, можно использовать перекрестно-связанную топологию). Желательно использовать максимально возможную в заданных условиях емкость конденсатора для достижения наилучшего согласования. Сегменты согласованных конденсаторов не должны иметь площадь значительно меньше, чем 100 мкм². Допускается только параллельное соединение сегментов в согласованных конденсаторах, так как при последовательном соединении значительную погрешность внесут паразитные емкости нижних обкладок. В связи с этим получение емкости с дробной частью емкости сегмента затруднено. В этом

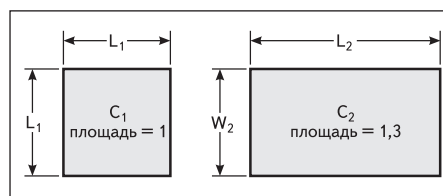


Рис. 6. Способ построения нестандартного сегмента конденсатора

случае рекомендуется использование дополнительного сегмента с нестандартным размером (рис. 6), геометрия которого рассчитывается по формулам [6, 7]:

$$L_2 = \frac{C_2}{C_1} \left[1 + \sqrt{1 - \frac{C_1}{C_2}} \right] L_1,$$

$$W_2 = \frac{C_2}{C_1} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{C_1}{C_2}} \right] L_1.$$

В прецизионных схемах нежелательно использовать нитридные и оксинитридные диэлектрики между обкладками конденсатора из-за их подверженности диэлектрической поляризации [6, 7].

Правильно построенные конденсаторы могут иметь согласование, не сравнимое с согласованием любого другого интегрального элемента. Согласованные конденсаторы составляют основу для большинства изделий типа аналого-цифрового (АЦП) и цифро-аналогового (ЦАП) преобразователей.

Следующие правила суммируют наиболее важные принципы построения согласованных конденсаторов [6, 7]:

1. Использовать квадратные сегменты в матрицах согласованных конденсаторов.
2. Использовать максимально возможные по площади конденсаторы.
3. Располагать согласованные конденсаторы на полевом окисле.
4. Использовать размещение с перекрестными связями (с общим центром) в массиве сегментов согласованных конденсаторов.
5. Размещать фиктивные конденсаторы вокруг внешнего края массива.
6. Использовать электростатическую защиту для согласованных конденсаторов.
7. Уменьшать емкости проводников, соединяющих конденсатор.
8. Никогда не проводить металл по согласованным конденсаторам, за исключением электростатической защиты.
9. Желательно использовать диэлектрики из оксида кремния вместо нитридных и других для исключения эффектов диэлектрической поляризации.
10. Располагать согласованные конденсаторы в областях с низким градиентом механического напряжения.
11. Располагать согласованные конденсаторы вдали от мощных элементов.

12. Располагать согласованные конденсаторы на осях симметрии кристалла.

Заключение

Приведенные в данной статье топологические методы построения согласованных интегральных элементов на базе современных КМОП-технологий позволяют минимизировать негативные рассогласующие факторы, сопутствующие процессу изготовления и эксплуатации ИМС.

Соблюдение приведенных рекомендаций при проектировании прецизионных аналоговых ИМС, таких как АЦП, ЦАП, DC_DC конвертеры и т. п., поможет существенно улучшить их выходные характеристики и получить высокую степень согласованности однотипных элементов.

Согласование интегральных элементов напрямую влияет на выход годных прецизионных аналоговых ИМС. Поэтому, повышая степень согласованности с помощью предложенных топологических методов, можно увеличить выход годных аналоговых ИМС в несколько раз.

И в заключение: поскольку проектирование прецизионных аналоговых блоков является сложной задачей с неоднократной оптимизацией и тестированием параметров, то желательно по максимуму использовать наработанный и отлаженный материал. Для этого при проектировании топологии изначально в качестве основной единицы измерения расстояния выбирается масштабная величина (лямбда). В масштабируемой КМОП-технологии топология схемы рисуется согласно лямбда-методологии, где единица измерения масштабируется в соответствии с изменением технологии в сторону уменьшения размеров. Это позволяет избежать повторного проектирования отлаженной топологии кристалла и уменьшает риск внесения ошибок на этапе проектирования. ■

Литература

1. Адамов Ю., Губин Я., Сибатуллин А., Сомов О. Аналоговые блоки в системах на кристалле // Электроника НТБ. 2004. № 8.
2. Сорока Д. Требования к современным САПР заказных СБИС // Электроника НТБ. 2004. № 6.
3. Адамов Ю., Губин Я., Сибатуллин А., Сомов О. Аналоговые блоки в системах на кристалле // Электроника НТБ. 2005. № 1.
4. Денисенко В. Моделирование разброса параметров транзисторов в КМОП СБИС // Компоненты и технологии. 2003. № 8.
5. Pelgrom M. J. M., Duinmaier A. C. J. and Welbers A. P. G. Matching properties of MOS transistors. IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 24, no. 5. Oct. 1989.
6. Эннс В. И., Кобзев Ю. М. Проектирование аналоговых КМОП ИС (Краткий справочник разработчика). М.: Горячая линия — Телеком. 2005.
7. Hastings A. The Art of Analog Layout. Prentice Hall. 2001.