

# Согласование интегральных элементов.

## Часть 1

Е. Кириллова

**Согласование интегральных элементов является наиболее важным фактором для аналоговых схем, так как напрямую влияет на характеристики ИМС и выход годных. Рассогласование параметров напрямую связано с локальным разбросом параметров интегральных элементов в пределах одного кристалла. В статье рассмотрены основные причины возникновения локального разброса параметров, а также топологические методы уменьшения рассогласования интегральных элементов и основные формулы расчета для отдельных пар и групп элементов.**

### ВВЕДЕНИЕ

Разброс параметров интегральных элементов схемы является следствием таких пространственных и временных флуктуаций параметров технологического процесса, 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. [2]

Разброс параметров неизбежен даже для хорошо управляемых и стабильных техпроцессов. В конечном 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 [2]. 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.

Современная КМОП-технология позволяет получить высокую степень согласованности однотипных элементов с помощью специальных топологических методов, которые минимизируют негативные рассогласующие факторы, сопутствующие процессу изготовления и эксплуатации ИМС [1]. В настоящее время большинство кремниевых мастерских имеют специально спроектированные тестовые кристаллы для измерения величины разброса параметров. 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) [2].

### ЛОКАЛЬНЫЙ РАЗБРОС ПАРАМЕТРОВ

Локальный разброс обычно больше, чем глобальный, и часто вызван особенностями топологии и топографии кристалла, например разбросом ширины металлических проводников или канала МОП-транзисторов. Локальный разброс может быть случайным и систематическим. Систематический разброс обусловлен пространственным градиентом характеристик технологического оборудования и может составлять 50% общего разброса [2]. Наибольшее влияние на характеристики ИС имеет систематический разброс эффективной

длины канала МОП-транзистора. Он связан с искажениями изображения вследствие оптической абберрации 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 [2]. Однако систематический компонент локального разброса легко может быть компенсирован конструктивными мерами, чего нельзя сделать со случайным разбросом.

Случайный компонент локального разброса параметров также связан в первую очередь с пространственным разбросом эффективной длины канала МОП-транзистора. Второе по величине влияние оказывает пороговое напряжение  $V_{tho}$  и токовый множитель  $\beta$ . Причиной локального разброса порогового напряжения  $V_{tho}$  является флуктуация общего заряда легирующей примеси в канале МОП-транзистора, а рассогласование по току  $\beta$  определяется разбросом эффективной длины и ширины канала, который вызван неровностями его границ. Для длинноканальных транзисторов на разброс  $\beta$  влияет также флуктуация подвижностей носителей заряда. Поскольку перечисленные причины являются пространственно-независимыми, то параметры  $V_{tho}$  и  $\beta$  оказываются статистически независимыми, если рассматривать только их локальный разброс [2].

Примером локального разброса служит разброс параметров транзисторов дифференциального каскада опе-

Таблица 1. Степень согласования элементов и их типовое применение

| Согласование | Резисторы и конденсаторы                      |  | Транзисторы  |  |
|--------------|---|--|--|--|
|              | Максимальная степень рассогласования (3σ)     | Типовое применение                                     | Максимальная степень рассогласования (3σ)  | Типовое применение   |
| Минимальное  | ±1 %<br>(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      | ±0,1%<br>(разрешающая способность 9–10 бит)   | Аналоговые схемы, обеспечивающие точность порядка 1%   | Напряжения смещения ±5 мВ или рассогласование токов стоков меньше чем ±1%              | Используется для построения входных каскадов некритичных операционных усилителей и компараторов, где допускается смещение ±10 мВ     |
| Точное       | ±0,01%<br>(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 ±0,1% | Прецизионные схемы, как правило, с дополнительной настройкой согласования в заданном диапазоне температур                            |

\* Для достижения данной степени согласования конденсаторы более предпочтительны.

рационального 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 [2].

**РАСЧЕТ РАССОГЛАСОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ**

Зависимость разброса параметров элементов от их размеров и положения на кристалле описывается законом Пелгрона [4, 5]:

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

где  $s^2(\Delta P)$  — дисперсия разности параметров двух одинаковых транзисторов или других элементов зависит от расстояния  $\Delta$  между ними и активной площади  $WL$  элемента, оставшиеся параметры определяются экспериментально на основе измеренных величин разброса. Данная формула является приближенной и не учитывает эффектов увеличения разброса на краях пластины и нелинейности зависимости дисперсии от расстояния между элементами.

Для более точного расчета рассогласования отдельно взятой пары элементов или группы элементов используют формулы, приведенные в [1, 3].

Рассогласование одной пары элементов:

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

где  $k_o$  и  $k_p$  — коэффициенты (постоянные для заданного технологического процес-

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

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  $\delta_i$  — рассогласование  $i$ -й 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  $\delta_i$  различают три степени согласования элементов: минимальное, среднее и точное. Таблица 1 показывает типовое применение резисторов, конденсаторов и транзисторов в зависимости от степени их согласованности.

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 [1, 3].

Для согласованной пары конденсаторов:

са и способа согласования), учитывающие вклад в рассогласование неоднородности поверхности и периферии соответственно;  $C$  — емкость конденсатора с наименьшими размерами соответственно.

Для согласованной пары резисторов:

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

где  $k_o$  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 необходи-

**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.<br>Оптимальная форма и размер кристалла  |
| Градиент механических напряжений |  | Малое расстояние между элементами и их правильное расположение на кристалле.<br>Использование common-centroid и cross-coupled размещений элементов.<br>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 чётного 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                                |  |
|                                  | Инжекция заряда                                      |  |
|                                  | Диэлектрическая поляризация                          |  |

мо четко представлять причины рассогласования и способы их устранения. Все это будет подробно рассмотрено ниже. Будут приведены основные правила построения согласованных элементов и даны рекомендации по уменьшению влияния механического напряжения и его градиента и электростатического взаимодействия между элементами схемы. Также будут рассмотрены топологические приемы построения максимально согласованных транзисторов, конденсаторов и резисторов.

**ПРИЧИНЫ РАССОГЛАСОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ И СПОСОБЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ**

Причинами рассогласования элементов являются геометрические погрешности, механические напряжения, градиент механических напряжений, изменение геометрии элементов, генерация напряжения, изменение параметров элементов и прочее. Тщательный анализ размещения согласованных элементов на кристалле может уменьшить чувствительность схемы к механическому напряжению и ряду других факторов [1, 3].

Различная форма корпуса приводит к более высоким или более низким уровням механического напряжения на кристалле. Приемлемые результаты могут быть получены при покрытии каждого кристалла полиамидной смолой для герметизации (мягкое корпусирование). Если при этом используется эпоксидное

соединение с кристаллом, то полиамидное покрытие может существенно снизить механические напряжения в пластмассе.

Еще одной важной причиной рассогласования элементов является пьезочувствительность кремния, что проявляется в изменении удельного сопротивления под механическим напряжением. Для борьбы с рассогласованием резисторов были разработаны технологические методы, позволяющие уменьшить чувствительность резисторов к механическим напряжениям. Поликремниевые резисторы имеют неплохое общее согласование, так как они не проявляют эффекта модуляции напряжения, в отличие от большинства типов легированных и имплантированных резисторов. В то же время согласованные конденсаторы малочувствительны к механическим напряжениям и обычно показывают меньшее систематическое рассогласование, чем согласованные резисторы.

Источниками рассогласования также могут быть различная геометрия элементов (топология), внешнее механическое воздействие (корпусирование), зернистость и дефекты пластины, смещение масок и неравномерность травления, термоэлектрический и пьезоэлектрический эффекты, наличие негативного влияния соседних структур и присутствие контактов над рабочими областями, 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.

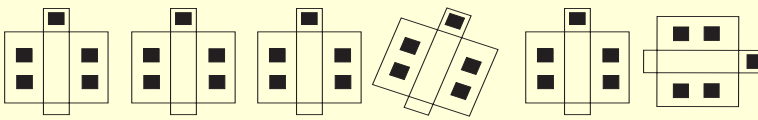
Температура, концентрация реагентов, толщина фоторезиста, мощность излучения в рабочих камерах технологических установок имеют линейный либо центрально-симметричный градиенты. В результате прохождения всех этапов техпроцесса на пластине формируется сложный рельеф макроскопических неоднородностей, который 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 [4].

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

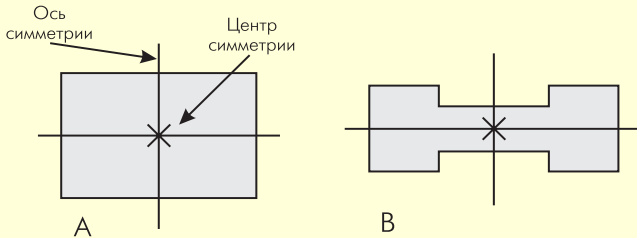
Для минимизации рассогласования следует придерживаться основных правил проектирования топологии согласованных интегральных элементов.

**ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА ПОСТРОЕНИЯ СОГЛАСОВАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

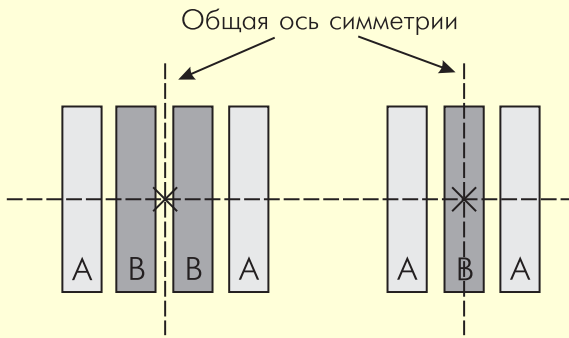
В общем случае можно выделить 4 основных принципа построения согласованных элементов [1]:



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



**Рисунок 2** Примеры определения центра симметрии



**Рисунок 3** Примеры размещения элементов с общим центром

- согласованные элементы должны состоять из идентичных сегментов, организованных в массив;
- все сегменты в массиве согласованных элементов должны иметь одинаковую ориентацию (рис. 1);
- массивы сегментов согласованных элементов должны иметь минимально возможное расстояние между геометрическими центрами или (желательно) общий центр;
- 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

Расчёт местоположения каждого элемента производится в соответствии

с вкладом каждой части устройства в целом. Окончательное 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.

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 [1, 3].

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.) [1, 3].

Массивы согласуемых элементов, имеющие общий центр, образуют общий массив сегментов согласованных элементов. При построении общего массива сегментов согласованных элементов (далее просто массива сегментов) с общим центром должны выполняться следующие правила:

- *совпадение* — геометрические центры согласуемых элементов должны совпадать;
- *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;
- *дисперсия* — массив сегментов должен иметь высокую степень дисперсии. Другими словами, сегменты каждого согласуемого элемента должны быть распределены по массиву настолько равномерно, насколько это возможно;
- *компактность* — массив должен быть компактным насколько это возможно. В идеале, он должен быть почти квадратным;
- *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, 3 и 4 элементов с различными отношениями номиналов [1, 3].

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

**АВВА**  
**АВССВА**  
**АВССВВА**  
**АВААВА**  
**АВАВААВАВА**  
**ААВААВАА**  
**АВСАВССВАСВА**  
**АВССВВААВССВВА**  
**ААВАААВААААВАААВАА**

**Рисунок 4** Примеры организации согласованных элементов с общим центром

массива, а не сегментов, составляющих его. Размещения этого вида показаны на рис. 5 и называются размещениями с перекрёстными 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.

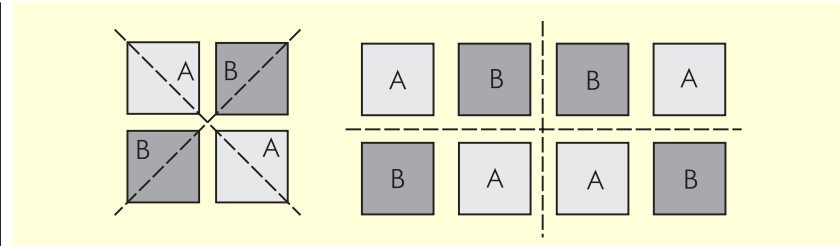
На практике каждый элемент разделяется на две равные половины, которые размещаются в диаметрально противоположных углах массива.

Этот тип размещения обеспечивает лучшую защиту от градиентов, чем одномерные массивы, прежде всего из-за его компактности и дисперсии, возможной в пределах двумерного массива [1, 3].

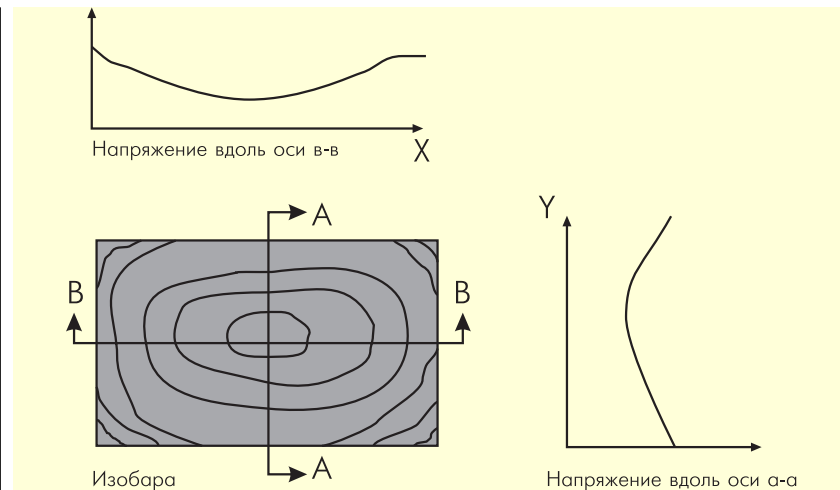
**СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ЕГО ГРАДИЕНТА**

После сборки кристалла ИМС в корпус возникают дополнительные механические напряжения в кристалле, которые не учитывались в процессе измерения и настройки на пластине. Механические напряжения могут вызвать рассогласование элементов в прецизионных блоках, что в конечном итоге существенно снижает выход годных аналоговых ИМС на этапе корпусирования.

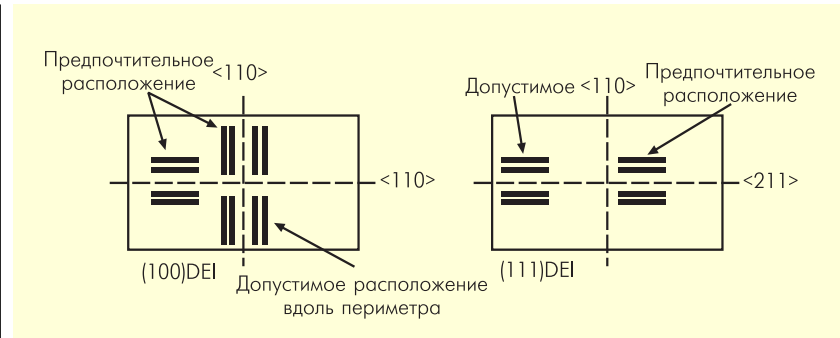
Механические напряжения воздействуют на крутизну характеристики МОП-транзисторов, вызывая изменения подвижности носителей. Влияние механического напряжения на подвижность зависит от ориентации элементов, поэтому зависимость от механических напряжений большей части носителей падает почти до нуля по определённым направлениям.



**Рисунок 5** Примеры построения массивов с перекрёстными связями



**Рисунок 6** Распределение механического напряжения на кристалле

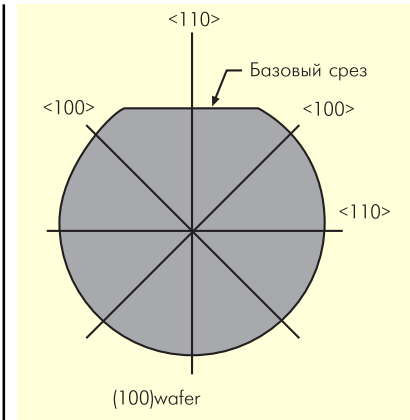


**Рисунок 7** Допустимые места расположения согласованных элементов на кристалле

Механическое напряжение слабо влияет на согласование по напряжению, потому что пороговые напряжения МОП-транзисторов в значительной степени независимы от механических напряжений. Пороговое напряжение вообще не проявляет изменений больше нескольких милливольт при механических напряжениях, которые могут быть еще сокращены методом размещения common-centroid.

Перечисленные ниже способы позволяют минимизировать отрицательное влияние механического напряжения. При этом предполагается, что для согласуемых элементов выполнены основные правила построения согласованных элементов [1, 3], а именно:

- расположение согласуемых элементов на кристалле в местах с малым механическим напряжением и его градиентом (центр и середины сторон кристалла) (рис. 6, 7);
- выбор оптимальной формы кристалла: удлинённый кристалл имеет более высокие уровни напряжений, чем квадратный кристалл той же площади;
- минимизация площади кристалла: кристаллы с большей площадью обладают более высокими уровнями напряжений;
- ориентирование согласуемых элементов (выполненных в монокристаллической подложке) вдоль осей с ми-



**Рисунок 8** Расположение осей  $\langle 110 \rangle$  с минимальной пьезочувствительностью для пластины с ориентацией  $\langle 100 \rangle$

нимальной пьезочувствительностью  $\langle 110 \rangle$  (для данного типа кремниевой пластины) (рис. 8);

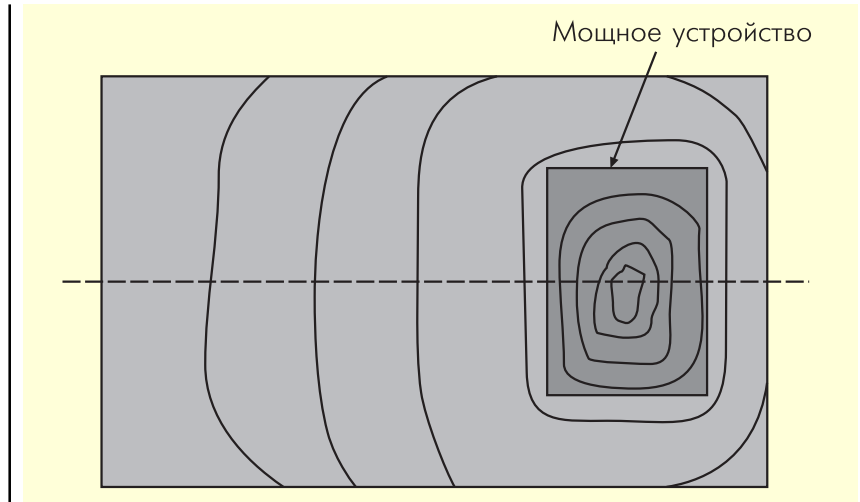
- использование полиамидных смол для покрытия кристалла при герметизации и корпусировании, что обеспечивает механическое согласование между пластмассовым корпусом и кристаллом;
- использование специальных пластмасс для корпусов с пониженными механическими напряжениями;
- использование металлокерамических корпусов.

Механическое напряжение и его градиент минимальны в центре кристалла и в серединах его сторон, а максимальны в углах кристалла, где располагать согласованные элементы не допускается [1, 3]. В середине более длинной стороны механическое напряжение ниже, чем в середине короткой.

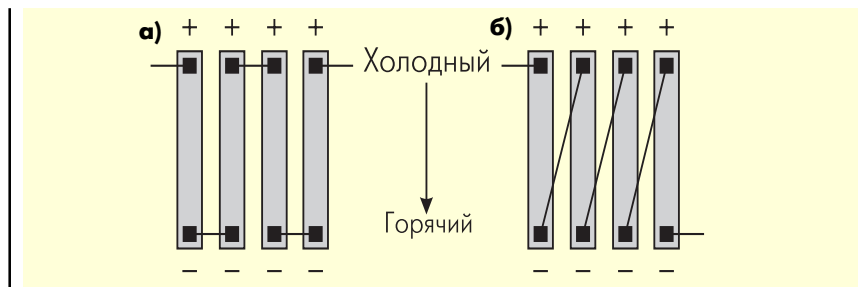
Пластины  $P$ -типа с ориентацией  $\langle 100 \rangle$ , как правило, используют для КМОП-технологии.

### СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ГРАДИЕНТА

Электрические свойства многих интегральных элементов зависят от температуры. Рассогласование согласованных по напряжению МОП-транзисторов зависит прежде всего от рассогласования их пороговых напряжений. Пороговые напряжения уменьшаются в зависимости от температуры на величину  $2 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$ . Тогда как рассогласование согласованных по току МОП-транзисторов зависит



**Рисунок 9** Изотермы на кристалле с источником тепловыделения



**Рисунок 10** Соединение резисторов с парной компенсацией термоэлектрического эффекта (а) и недопустимое соединение (б)

прежде всего от рассогласования крутизны характеристики элементов. Эта крутизна прямо пропорциональна эффективной подвижности носителей, которая, в свою очередь, имеет довольно большие температурные коэффициенты. Меньшая крутизна МОП-транзисторов делает их менее чувствительными к тепловым градиентам, но, в свою очередь, это вызывает трудности в согласовании от деградации истоков. Чтобы уменьшить рассогласование от деградации истоков, нужно использовать методы размещения, называемые common-centroid.

Большинство интегральных резисторов имеют температурные коэффициенты  $1000 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  и более. При температурном коэффициенте, равном  $2500 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ , перепад температур в  $1^\circ$  между двумя согласованными резисторами производит рассогласование  $0,25\%$ . При этом тепловые градиенты  $1^\circ\text{C}/\text{mil}$  ( $0,04^\circ\text{C}/\text{мм}$ ) могут существовать около мощных элементов схемы. Температурный градиент имеет максимальное значение около периметра источника тепла и постепенно уменьшается при удалении от него (рис. 9).

Поскольку источник помещен симметрично относительно горизонтальной оси кристалла, то и распределение также симметрично относительно этой оси. Наличие этой оси может использоваться, чтобы рассчитать тепловое согласование других элементов на кристалле. Оси симметрии тепловых распределений определяются корпусом и поэтому жестко влияют на размещение и зависят от положения и ориентации мощного элемента. Величина вызванных теплом изменений может быть уменьшена соответствующим размещением согласованных элементов относительно мощных.

Приводимые ниже способы позволяют уменьшить влияние температурных градиентов. При этом предполагается, что для согласуемых элементов выполнены основные правила построения согласованных элементов [1, 3], а именно:

- ориентация осей симметрии массивов сегментов вдоль осей симметрии распространения тепла (перпендикулярно изотермам) (рис. 9, 11);
- ориентация протяженных сегментов в согласованных элементах вдоль

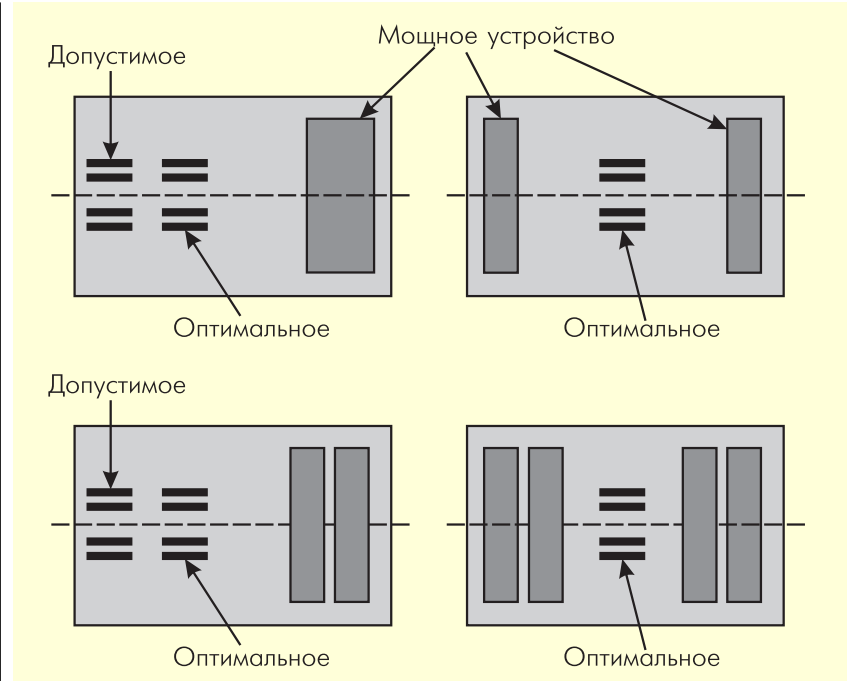
осей симметрии распространения тепла (рис. 9, 11);

- использование четного числа сегментов в резисторах с соединением, позволяющим попарно компенсировать термоэлектрический эффект (рис. 10);
- компромиссное размещение согласованных элементов на кристалле относительно источника тепла (максимальное удаление от источника тепла при учете оптимального размещения для минимизации влияния механических напряжений) (рис. 11).

(Продолжение следует)

Литература

1. Эннс В.И., Кобзев Ю.М. Проектирование аналоговых КМОП ИС (Краткий справочник разработчика). М.: Горячая линия ТЕЛЕКОМ, 2005.
2. Денисенко В. Моделирование разброса параметров транзисторов в КМОП СБИС.
3. Allan Hastings. The Art of Analog Layout. Prentice Hall, 2001.
4. Адамов Ю., Губин Я., Сибатуллин А., Сомов О. Аналоговые блоки в системах на кристалле (часть 1) // Электроника НТБ. 2004. № 8.



**Рисунок 11** Оптимальные варианты размещения согласованных элементов на кристалле с источником тепла

ника НТБ. 2004. № 8.

MOS transistors. IEEE J. Solid-State

5. Pelgrom M.J.M., Duijnmaijer A.C.J. and Welbers A.P.G. Matching properties of 1433–1440.

**ЭЛКОТЕХ**

105005, Москва, ул. Радио, д.12, стр.2  
Тел.: (095) 755-8815, 781-0077; факс: (095) 755-8814  
E-mail: sales@elcotech.ru; http://www.elcotech.ru

**В НАШЕЙ ПРОГРАММЕ ПОСТАВОК:**

**ПАСИВНЫЕ СВЧ-КОМПОНЕНТЫ Anaren**

**Симметрирующие трансформаторы (baluns)**

- Диапазоны частот от 470–860 МГц до 2300–2700 МГц.
- 50 / 50 Ом, 180° и 50 / 25 Ом, 180°.
- Непрерывная мощность до 150...275 Вт.

**Синфазные делители мощности**

- 2-х, 3-х и 4-х-канальные.
- Диапазоны от 650–1200 МГц до 3000–3800 МГц.
- Максимальные потери 0,3...0,5 дБ.

**Гибридные квадратурные 3-дБ ответвители**

- Диапазоны частот от 225–400 МГц до 5000–6000 МГц.
- Потери 0,15...0,55 дБ, непрерывная мощность до 20...300 Вт.
- Баланс по амплитуде 0,15...0,65 дБ, по фазе – 2...5°.

**Направленные ответвители**

- Диапазоны частот от 190–400 МГц до 5000–6000 МГц.
- Коэффициент ответвления от 5 до 30 дБ.
- Потери 0,10...0,35 дБ, непрерывная мощность до 15...350 Вт.

**«Мостики» для пересечения полосковых линий**

- Диапазон частот до 6 ГГц.
- Потери до 0,15 дБ, непрерывная мощность до 30 Вт.

**Модульные компоненты**

- Гибридные мосты, направленные ответвители, модуляторы, смесители, аттенюаторы, фазовые дискриминаторы.

www.anaren.com

