

# Построение топологии токовых зеркал

Евгения КИРИЛЛОВА  
jane\_kir@mail.ru

**В данной статье рассмотрены проблемы, возникающие при построении токового зеркала, и способы их решения, причины рассогласования элементов и способы их устранения. Также приведены методы построения топологии токовых зеркал и даны их сравнительные характеристики. Особое внимание уделено правилам построения топологии согласованных элементов, в частности транзисторов.**

## Введение

Токовые зеркала широко используются при проектировании интегральных микросхем, работающих в широком диапазоне питающих напряжений. Токовые зеркала входят в состав базовых функциональных блоков, таких как дифференциальные пары, источники тока, компараторы и операционные усилители. И естественно, чем лучше будут работать токовые зеркала, тем лучше будут работать построенные на их основе аналоговые блоки, а значит и вся схема в целом.

По определению токовое зеркало представляет собой генератор стабильного тока (ГСТ). Являясь удачной разновидностью большого количества схем ГСТ, токовое зеркало называется так потому, что два эмиттерных тока двух транзисторов связаны между собой через постоянную  $K$ :

$$K = I_{E1}/I_{E2} = S_1/S_2,$$

где  $S_1$  и  $S_2$  — площади переходов транзисторов.

Если транзисторы одинаковы, то одинаковы их токи и ток в нагрузке является как бы зеркальным отображением тока первого

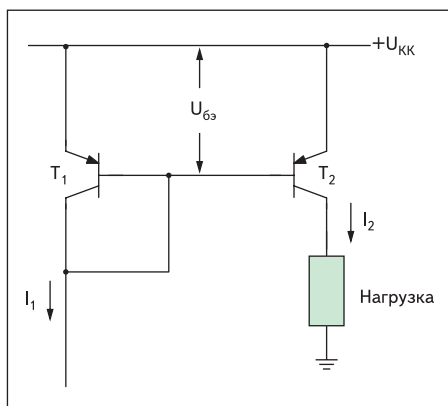


Рис. 1. Классическая схема токового зеркала на основе согласованной пары биполярных транзисторов

транзистора, основное предназначение которого — задание стабильного напряжения на базе второго транзистора.

Простое токовое зеркало состоит из пары согласованных транзисторов и нагрузки (рис. 1).

В данном случае возникает проблема базовых токов, так как ток  $I_1$  не равен току  $I_2$ , а будет несколько больше его:

$$I_1 = I_{K1} + I_{B1} + I_{B2}, \quad I_2 = I_{K2}.$$

Частично эта проблема решается за счет добавления транзистора  $T_3$  в коллекторную цепь транзистора  $T_2$ . Это так называемое токовое зеркало Уилсона (рис. 2).

В этом случае сильно уменьшается погрешность между токами  $I_1$  и  $I_2$ , так как:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{K1} + I_{B3}, \\ I_{E3} &= I_{K2} + I_{B1} + I_{B2}, \\ I_2 &= I_{E3} - I_{B3} = I_{K2} + I_{B1} + I_{B2} - I_{B3}. \end{aligned}$$

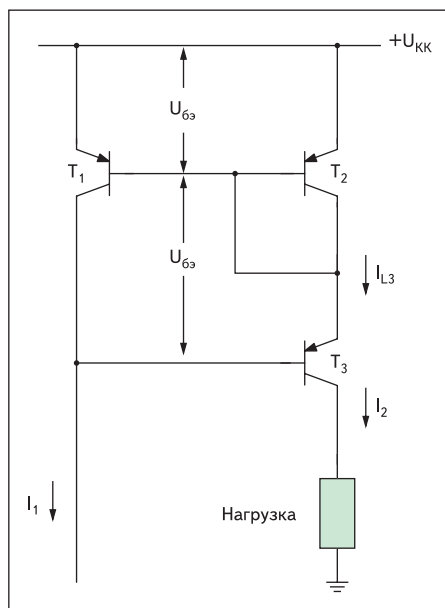


Рис. 2. Токовое зеркало Уилсона

Базовые токи в одинаковых транзисторах будут примерно одинаковыми, поэтому для данной схемы  $I_1$  будет примерно равен току  $I_2$ .

Проблему базовых токов можно решить и по-другому. В токовых зеркалах, построенных на полевых транзисторах, эта проблема не возникает, так как в статическом режиме ток в затворе полевого транзистора практически отсутствует, не считая токов утечки, которые пренебрежимо малы. Но появляется другая проблема — получение идентичных МОП-транзисторов, несмотря на разброс параметров, который, к сожалению, неизбежен даже для хорошо управляемых и стабильных техпроцессов. Данная проблема решается с помощью использования определенных методов построения топологии согласованных транзисторов, что приводит к уменьшению разброса параметров конструкторскими решениями, учитывающими взаимное расположение транзисторов и их геометрию.

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). При построении токовых зеркал наиболее критичен локальный разброс, так как он существенно влияет на дисбаланс токов  $I_1$  и  $I_2$  и этим значительно ухудшает работу токового зеркала.

## Локальный разброс и расчет рассогласования элементов

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 разброс обусловлен

пространственным градиентом характеристик технологического оборудования и может составлять 50% 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 [1, 2]. Однако систематический компонент локального разброса легко может быть скомпенсирован 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.

Основными технологическими источниками возникновения разброса параметров в нанометровых структурах являются [3]:

- 1) неоднородность распределения легирующих примесей и структурных дефектов в наноразмерных объемах полупроводника; колебания толщины диэлектрических покрытий в пределах одного-двух молекулярных слоев (около 1 нм);
- 2) зернистая структура металлических и поликремниевых пленок;
- 3) неравномерный характер травления и полировки материалов при планаризации пластин;
- 4) дифракционные эффекты и отражение света от подложки при фотолитографии;
- 5) отражение и рассеяние электронов при электронной литографии.

Существуют технологические методы, позволяющие снизить разброс параметров благодаря усовершенствованию физических структур микросхем, производственных процессов и оборудования, однако наиболее доступным способом остается уменьшение локального разброса параметров конструкторскими решениями, учитывающими взаимное расположение транзисторов и их геометрию.

Зависимость разброса параметров элементов от их размеров и положения на кристалле описывается «законом Пеллрома» [1, 4, 5]:

$$\sigma^2(\Delta P) = A_p^2/(W \times L) + S_p^2 \times D^2,$$

где  $\sigma^2(\Delta P)$  — дисперсия разности параметров двух одинаковых транзисторов или других элементов, зависит от расстояния  $D$  между ними и активной площади  $WL$  элемента;  $A_p$  — площадь с постоянной величиной  $P$  ( $\sigma P = 0$ ), а  $S_p$  описывает изменения параметра  $P$  с расстоянием. Параметры  $A_p$  и  $S_p$  определяются экспериментально на основе измеренных величин разброса. Данная формула не учитывает эффекта увеличения разброса параметров на краях пластины.

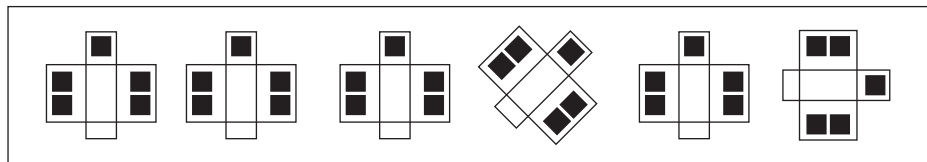


Рис. 3. Устройства, направленные в одну и ту же сторону, согласуются более точно, чем те, которые ориентированы в разные стороны

### 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 прочие. Тщательный анализ размещения согласованных элементов на кристалле может уменьшить чувствительность схемы к механическому напряжению и ряду других факторов [1, 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 удлиненный 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.

Источниками рассогласования также 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. 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, 2].

Для минимизации рассогласования следует придерживаться основных правил построения топологии согласованных интегральных элементов. Токовые зеркала строятся на основе согласованных транзисторов, при этом чем точнее согласование транзисторов, тем меньше дисбаланс токов  $I_1$  и  $I_2$ , следовательно, лучше работа токового зеркала.

### Основные правила построения согласованных элементов

В общем случае можно выделить четыре основных принципа построения согласованных элементов [1, 6, 7, 8]:

1. Согласованные элементы должны состоять из идентичных сегментов, организованных в массив.
2. Все сегменты в массиве согласованных элементов должны иметь одинаковую ориентацию (рис. 3).
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

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. Фактически возможно разместить два массива элементов так, чтобы их оси симметрии совпадали. Такое размещение называется common-centroid, что в переводе означает общий центр (рис. 4). При этом будет исключено влияние рассогласующих факторов, связанных с наличием на кристалле разного рода градиентов параметров (градиентов толщины окисла, механических напряжений, температуры и т. д.) [1, 6, 7, 8].

При построении массива сегментов согласуемых элементов (далее — просто массива сегментов) с общим центром должны выполняться следующие правила:

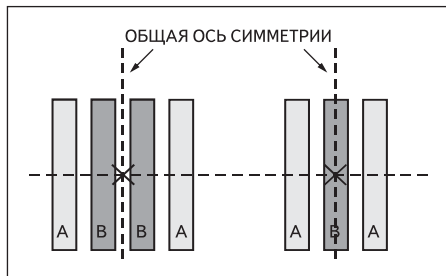


Рис. 4. Примеры размещения элементов с общим центром

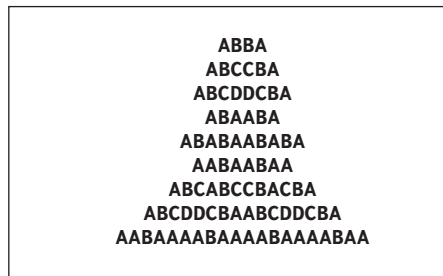


Рис. 5. Примеры организации согласованных элементов с общим центром

1. Совпадение. Геометрические центры согласуемых элементов должны совпадать.
2. Симметрия. Массив сегментов должен быть симметричен относительно обеих X, 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. Чем более компактным может быть сделано размещение с общим центром, тем менее восприимчивыми становятся согласованные элементы к нелинейным градиентам разброса параметров.

5. Ориентация. Каждый согласованный элемент должен состоять из равного числа сегментов, одинаково ориентированных в любом направлении.

На рис. 5 приведены примеры возможного построения массивов с общим центром из 2, 3 и 4 элементов с различными отношениями номиналов [1, 6, 7, 8].

Двумерный массив с общим центром обеспечивает более высокую степень симметрии. Такое размещение называется cross-coupled, что в переводе означает перекрестные связи (рис. 6). Это очень компактное размещение, и оно особенно подходит для пар относительно небольших элементов. На практике каждый элемент разделяется на две равные половины, которые размещаются в диаметрально противоположных углах массива. Такой тип размещения обеспечивает лучшую защиту от градиентов, чем одномерные массивы. Это происходит из-за его компактности

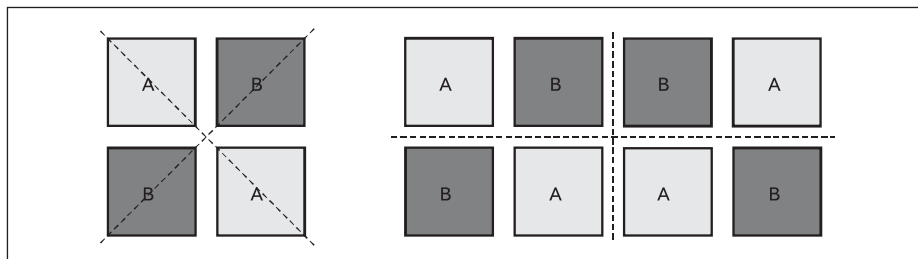


Рис. 6. Примеры построения массивов с перекрестными связями

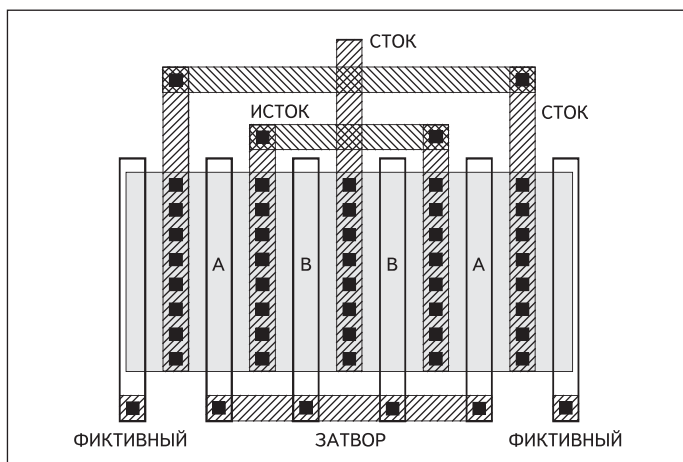


Рис. 7. Пример топологии пары согласованных транзисторов (common-centroid)

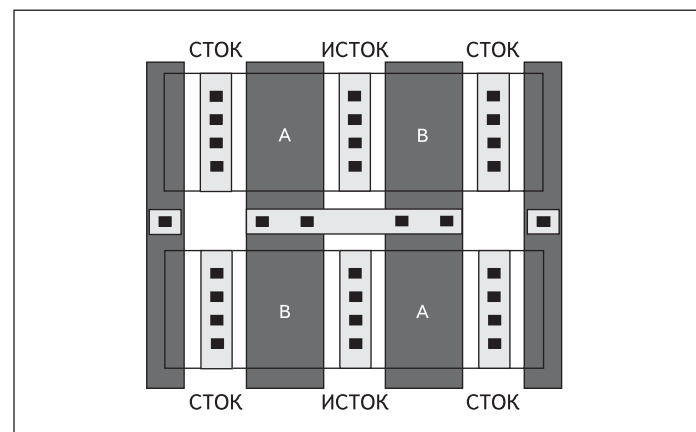


Рис. 8. Пример топологии пары согласованных транзисторов с использованием перекрестных связей (cross-coupled)

и дисперсии, возможной в пределах двумерного массива [1, 6, 7, 8].

### Рекомендации по согласованию МОП-транзисторов

*N*-канальные транзисторы, как правило, обеспечивают более высокую степень согласования, чем *p*-канальные транзисторы при прочих равных условиях. Это явление наблюдается в ряде различных процессов, включая варианты и с *p*-карманом, и с *n*-карманом. *P*-канальные транзисторы показывают от 30 до 50% большее рассогласование по крутизне, чем аналогичные *n*-канальные [1, 6, 7, 8].

Согласуемые МОП-транзисторы разделяются на сегменты, или пальцы, позволяющие построить компактный массив. Самый простой тип массива — размещение многих пальцев транзистора параллельно. При этом допускается объединение общих истоков и/или стоков. На рис. 7 показан пример пары согласованных МОП-транзисторов с общим центром и фиктивными элементами. На рис. 8 — пример пары согласованных МОП-транзисторов с перекрестными связями и фиктивными элементами [6, 7, 8].

Для достижения наибольшего согласования желательно выбирать максимально возможную для данного применения площадь затворов транзистора.

Следующие рекомендации суммируют наиболее важные принципы построения согласованных МОП-транзисторов [1, 6, 7, 8]:

- 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 края 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 металлические шины 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.

### Методы построения топологии токовых зеркал

Токовые зеркала могут быть построены несогласованными транзисторами или транзисторами, согласованными по принципу common-centroid или cross-coupled, а также с помощью согласованных транзисторов нестандартной конфигурации. Существует пять основных методов построения топологии токовых зеркал. Это простое расположение двух транзисторов рядом (простая технология без дополнительного согласования транзисторов), два вида встречноштыревых структур (согласование типа common-centroid) и два вида центроидов (согласование типа cross-coupled). Все они изображены на рис. 9 [9].

В токовом зеркале, построенном с помощью простого расположения транзисторов рядом друг с другом (рис. 9а), вертикальный градиент рассогласования параметров не оказывает сильного влияния на согласование транзисторов, однако параметры согласования существенно ухудшатся, если в структуре присутствуют «горизонтальные» компоненты градиента. Встречноштыревые структуры (рис. 9б, в) менее чувствительны к горизонтальным составляющим градиента, но результирующий градиент все еще является существенным. Построение топологии в виде центроидов (рис. 9г, д) позволяет добиться наилучшего согласования параметров. Метод построения топологии в виде центроидов широко используется в настоящее время в тех случаях, где необходимо получить хорошее согласование двух и более транзисторов. Однако, как и у каждого метода, у него есть свои недостатки — это большая занимаемая площадь физической реализации (топологии) [9].

В современных условиях всеобщей минимизации размеров кристалла ИМС большая занимаемая площадь может стать серьезной проблемой. В таких случаях либо находят компромисс между степенью согласования параметров транзисторов и занимаемой ими площадью, либо ищут нестандартные пути решения проблемы. Таким решением может

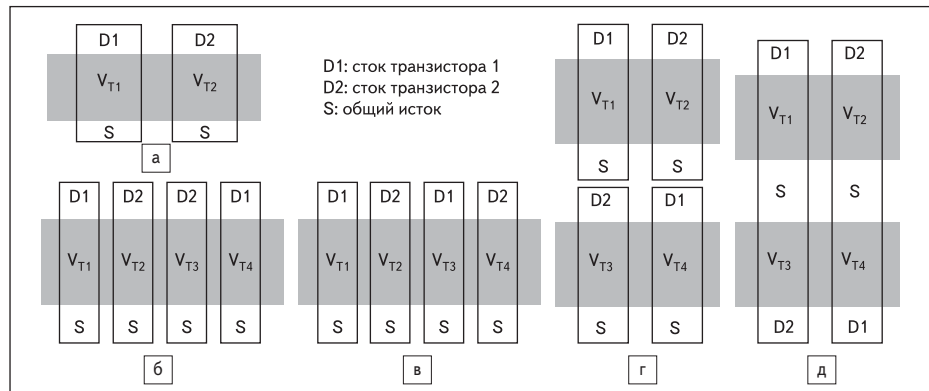


Рис. 9. Пять основных методов построения топологии токовых зеркал: а) простая технология; б) встречноштыревая структура первого типа (тип 1); в) встречноштыревая структура второго типа (тип 2); г) обычный центроид первого типа (тип 1); д) обычный центроид второго типа (тип 2)

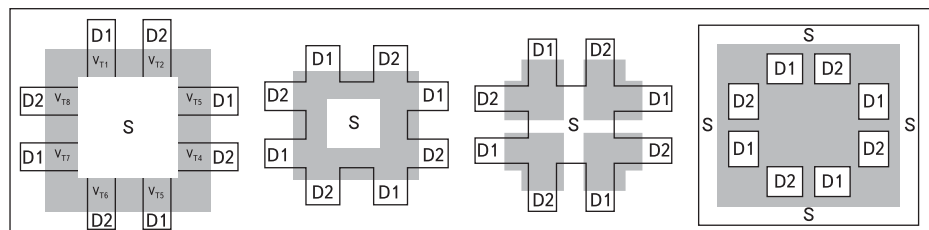


Рис. 10. Построение токовых зеркал с помощью транзисторов нестандартной конфигурации

стать построение токового зеркала с помощью транзисторов нестандартной конфигурации, как показано на рисунке 10. При таком построении обеспечивается минимальное сопротивление истоковой области (S) за счет ее объединения, а также достигается наивысшая степень согласования пары транзисторов. Здесь каждый транзистор состоит из четырех частей, согласуемых попарно в вертикальном и горизонтальном направлении, что позволяет обеспечить равные условия для обоих транзисторов при наличии как вертикального, так и горизонтального градиента. По существу, мы просто разбили каждый транзистор пополам и согласовали половинки по принципу cross-coupled, а потом расположили полученные центроиды (рис. 9г, д) под прямым углом (рис. 10), объединив при этом область истоков обоих транзисторов. Данная конструкция делает согласуемые транзисторы наименее чувствительными к градиентам рассогласования практически по всем направлениям, за счет чего и получается наивысшая степень согласования [9].

### Заключение

Приведенное в данной статье исследование методов построения топологии токовых зеркал показало, что токовые зеркала необходимо строить на основе согласованных МОП-транзисторов, при этом чем точнее согласованы транзисторы, тем меньше дисбаланс токов  $I_1$  и  $I_2$  и, следовательно, лучше работа токового зеркала. Наименьшую площадь физической реализации обеспечивает согласование

по принципу common-centroid, а наивысшую степень согласования получают при построении токового зеркала с помощью транзисторов нестандартной конфигурации. ■

### Литература

1. Кириллова Е. В. Методология проектирования прецизионных аналоговых блоков // Компоненты и технологии. 2006. № 11.
2. Денисенко В. Моделирование разброса параметров транзисторов в КМОП СБИС // Компоненты и технологии. 2003. № 8, 9, 10.
3. Адамов Д. Учет особенностей микроэлектронных нанотехнологий при проектировании СБИС // Электроника НТБ. 2007. № 7.
4. Адамов Ю., Губин Я., Сибигагуллин А., Сомов О. Аналоговые блоки в системах на кристалле // Электроника НТБ. 2004. № 8.
5. Pelgrom M. J. M., Duijnmaier A. C. J., Welbers A. P. G. Matching properties of MOS transistors // IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 24. N 5. Oct. 1989.
6. Эннс В. И., Кобзев Ю. М. Проектирование аналоговых КМОП ИС (Краткий справочник разработчика). М.: Горячая линия ТЕЛЕКОМ, 2005.
7. Allan Hastings. The Art of Analog Layout. Prentice Hall, 2001.
8. Кириллова Е. В. Физическое проектирование прецизионных аналоговых блоков в цифро-аналоговых ИМС // Компоненты и технологии. 2007. № 6.
9. Lan M.-F., Tammineedi A., Geiger R. A New Current Mirror Layout Technique for Improved Matching Characteristics. Department of Electrical and Computer Engineering Iowa State University, Ames, IA 50011. U.S.A. 2005.