

Продолжение. Начало в № 7'2004

Моделирование МОП-транзисторов

Методологический аспект

Виктор Денисенко,
к. т. н.

Victor@RLDA.ru

Показатели качества моделей

Компактные модели используются разнообразными группами специалистов, вовлеченных в процесс разработки и производства ИС. Требования к «идеальной модели» у этих групп не совпадают и часто противоречат друг другу. Поэтому разработчики компактных моделей выбирают компромиссные решения, которые могут удовлетворить максимальное число пользователей (табл. 3).

Таблица 3. Требования к моделям в зависимости от типа группы пользователей [23]

Свойство модели	Заинтересованная группа пользователей
Точное соответствие физике работы прибора	Разработчики МОП-транзисторов
Точность соответствия экспериментальным данным, достоверность	Проектировщики ИС, кремниевые мастерские
Вычислительная эффективность	Проектировщики ИС
Пригодность для различных технологий	Поставщики САПР, кремниевые мастерские
Простота	Проектировщики ИС
Короткое время разработки модели	Разработчики моделей и поставщики САПР
Совместимость с прежними версиями	Проектировщики ИС, разработчики САПР

Требования к компактным моделям

Ниже приведены требования к компактным моделям, которые соответствуют мнению большинства экспертов, работающих в этой области:

1. Общие требования

- 1.1. Возможность настройки модели на широкий спектр геометрических форм и размеров, техпроцессов и внешние воздействия (масштабируемость).
- 1.2. Структура модели должна быть основана на физике.
- 1.3. Простота и интуитивная понятность для пользователя.
- 1.4. Пригодность одновременно как для цифровых, так и аналоговых цепей.
- 1.5. Пригодность для статистического моделирования.
- 1.6. Предсказательная способность (применимость для экстраполяции по физическим параметрам и геометрии).

2. Требования по степени соответствия объекту

- 2.1. Достаточная для конкретной задачи точность.
- 2.2. Максимально возможная достоверность и информационная емкость.

- 2.3. Физически объяснимое поведение при любых значениях параметров.
 - 2.4. Широкий диапазон изменения переменных.
- #### 3. Вычислительные свойства
- 3.1. Вычислительная эффективность (быстрота расчета, сходимость алгоритмов в SPICE).
 - 3.2. Отсутствие внутренних итерационных циклов.
 - 3.3. Гладкость функций и производных до третьего порядка включительно.
 - 3.4. Гладкость функций по параметрам.
- #### 4. Требования к параметрам
- 4.1. Общее количество параметров должно быть минимальным.
 - 4.2. Число подгоняемых параметров и их чувствительность должны быть минимальными.
 - 4.3. Отсутствие корреляции (избыточности) параметров.
 - 4.4. Параметры должны иметь ясную связь с параметрами техпроцесса и физическую интерпретацию.
 - 4.5. Простота процедуры экстракции параметров.
- #### 5. Организационные требования
- 5.1. Доступность широкому кругу пользователей.
 - 5.2. Хорошая документированность.
 - 5.3. Высокая квалификация персонала, поддерживающего модель.
 - 5.4. Отсутствие высоких требований к квалификации пользователей.
 - 5.5. Пригодность для моделирующих программ разных производителей.
 - 5.6. Возможность быстрой разработки и модификации.
 - 5.7. Совместимость версий одной и той же модели.
 - 5.8. Совместимость разных моделей по параметрам.
 - 5.9. Соответствие стандарту, подтвержденное сертификатом.
 - 5.10. Достаточность финансирования процесса разработки и технической поддержки модели.

Ниже мы поясним смысл этих требований.

Возможность перестройки модели при изменении геометрических размеров транзистора является трудновыполнимым требованием. В частности, модель BSIM2 не имела такой возможности. И для того чтобы моделировать транзисторы разных размеров, она использует так называемый «биннинг» (binning), когда вся область изменения длины и ширины канала делится на прямоугольники,

в пределах каждого из которых идентификация параметров выполняется раздельно. Недостатком биннинга является разрывность зависимости параметров от пространственных координат при переходе от одной области к другой, что усложняет использование алгоритмов оптимизации и статистического анализа, требующих гладкости функции или ее производных. Вторым недостатком биннинга является большое количество параметров модели.

Наиболее сложным является учет новых физических эффектов, появляющихся при уменьшении длины канала. Так, модель Level 1 была справедлива только для транзисторов с длиной канала более 5 мкм, Level2 — 2 мкм, Level3 — 1 мкм, BSIM1 — 0,8 мкм, BSIM2 — 0,25 мкм, BSIM3v3 — 0,15 мкм, BSIM4 — менее 100 нм.

МОП-транзисторы имеют разнообразную конструкцию и изготавливаются по различным технологиям. Одна и та же компактная модель должна обладать способностью быть настроенной на любую конструкцию и любой техпроцесс путем изменения ее параметров (но не уравнений), доступных пользователю.

Структура модели — это структура ее уравнений и моделирующей (эквивалентной) электрической цепи. Физические модели синтезируют, анализируя различные области полупроводниковой структуры с целью обоснования упрощающих допущений, которые позволили бы получить аналитическое решение уравнений непрерывности, переноса и Пуассона. Такой подход позволяет установить физически обоснованные допущения и установить связь параметров модели с геометрическими и технологическими параметрами транзистора, а также понять физический смысл других параметров, появившихся при синтезе модели. Противоположный метод синтеза состоит в том, что физические процессы в приборе вообще не анализируются; вместо этого экспертным путем подбираются уравнения четырехплюсника, которые ведут себя относительно внешних зажимов точно так, как реальный МОП-транзистор. Такие модели называются формальными. Имея ограниченный набор элементарных функций, в ходе синтеза модели пытаются получить уравнение, имеющее минимальное количество параметров при максимальной точности аппроксимации экспериментальных характеристик.

Синтез формальных моделей для моделирования ИС в настоящее время не считается перспективным, поскольку он не позволяет установить связь параметров модели с параметрами техпроцесса, а пользователь модели теряет интуицию, без которой невозможно творчество, создание новых полупроводниковых приборов и интегральных схем. Вторым недостатком формальных моделей является их худшая достоверность по сравнению с физическими, поскольку в процессе синтеза физических моделей используются уже проверенные (верифицированные) знания о физике прибора и прослеживается связь компонентов уравнений с физическими процессами.

Формальная модель, в отличие от этого, может дать внезапно непредсказуемое поведение ввиду невозможности 100-процентной ее верификации. Модель должна быть физической во всех отношениях, а не аппаратом для подгонки эмпирических уравнений к экспериментальным данным.

Физичность модели тесно связана с простотой и интуитивной понятностью. Простота и понятность модели для пользователя позволяют избежать большого числа ошибок, которые обычно в изобилии возникают на этапах экстракции параметров, моделирования ИС и разработки модели. Кроме того, сопровождение и применение сложных моделей требует специалистов высокой квалификации, которых очень трудно найти. Если работника для модели с 20 параметрами можно найти за 2 месяца, то специалиста, который сможет работать с моделью, имеющей 400 параметров, надо искать 2 года [17].

Модели для цифровых и аналоговых цепей имеют некоторые различия. Для цифровых цепей не требуется точное моделирование производных тока стока по напряжениям на выводах прибора, что важно для аналоговых схем; не требуется моделирование нелинейных искажений и большой динамический диапазон. Длительное время считалось, что для моделирования цифровых цепей не требуются модели высокой точности и поэтому широко использовались модели переключательного уровня [11]. Однако после преодоления технологического рубежа 0,25 мкм поведение цифровых цепей стало приближаться к поведению аналоговых [15]. Кроме того, большинство современных ИС и систем на кристалле содержат аналоговые блоки. Поэтому одним из требований к «хорошей» модели стала пригодность ее одновременно как для цифровых, так и аналоговых цепей. Наличие одной универсальной модели вместо двух позволяет также снизить издержки на разработку и техническую поддержку без снижения объема продаж и, следовательно, повысить качество модели.

Пригодность модели для статистического моделирования означает, что она должна иметь технологические параметры и быть непрерывной по этим параметрам.

Компактная модель должна позволять *предсказывать поведение транзистора* для будущих, еще не созданных технологий. Это становится возможным, если модель синтезирована на основе физических представлений о работе транзистора, имеет физические параметры, хорошо калибрована и имеет высокую точность. Предсказания с помощью компактной модели часто бывают точнее, чем с помощью физико-топологической модели [30] благодаря тому, что компактная модель допускает более точную калибровку по сравнению с физической. Эта способность модели важна для технологов и разработчиков ИС в случаях, когда проектирование техпроцесса и ИС выполняется одновременно.

При изменении параметров идеальная модель должна вести себя точно так же, как и объект моделирования. Однако достичь этого очень трудно, поскольку простота мо-

дели требует использования упрощающих допущений и введения формальных аппроксимаций. Это приводит к появлению таких нефизических эффектов, как отрицательная проводимость или емкость, разрывность функций, наличие тока при отсутствии напряжения и т. п. в случаях, когда параметры выходят за допустимые границы. «Хорошая» модель должна иметь физически объяснимое поведение при любых сочетаниях физических или технологических параметров. В противном случае достоверность модели падает, поскольку вероятны ситуации, когда по ошибке пользователь вышел за допустимые границы и получил неверный результат.

Вычислительная эффективность модели зависит от ее сложности и правильного проектирования вычислительного алгоритма. Очень нежелательным является использование внутренних итерационных циклов [5]. Поскольку метод Ньютона–Рафсона, использованный в SPICE, стал стандартом де-факто для схемотехнического моделирования, компактные модели должны описываться гладкими функциями. Этому требованию не удовлетворяет, в частности, большинство моделей первого и второго поколения, которые не использовали сглаживающих функций для «сшивания» линейной области и области насыщения, а также подпороговой области с областью сильной инверсии. Требование гладкости и точности производных связано с бурным развитием радиочастотных ИС, для которых важным параметром является коэффициент нелинейных искажений. Модели для радиочастотных цепей должны точно моделировать третью производную тока стока по напряжению на затворе (вторую производную от передаточной проводимости), которая определяет интермодуляционные искажения третьего порядка, которые играют важную роль в радиочастотных усилителях [31]. Кроме того, отсутствие гладкости производных ограничивает порядок метода интегрирования системы обыкновенных дифференциальных уравнений в программе SPICE, ухудшает скорость сходимости на постоянном токе и усложняет алгоритмы экстракции параметров.

Количество параметров модели обычно связано с количеством моделируемых физических эффектов. Добавление в модель одного физического эффекта требует введения 1–3 новых параметров. С другой стороны, с точки зрения пользователя, достаточно иметь только технологические и геометрические параметры, как у физико-топологических моделей. В этом смысле большинство параметров являются избыточными и служат только для подстройки аппроксимирующих функций. Другой подход к анализу избыточности параметров основан на идеях метода главных компонентов. Наличие сильно коррелирующих параметров свидетельствует о неудачном выборе системы параметров модели или об их избыточности, поскольку после применения метода главных компонентов число статистически независимых параметров может быть уменьшено. У «идеальной» модели параметры не должны коррелировать.

Модель должна быть хорошо документирована. Это серьезный качественный показатель, а не формальное требование. Документация должна содержать не только описание уравнений, но и графики, показывающие точность в разных режимах и объем работ по верификации модели; объяснение, как модель была построена, на каких принципах, какие были сделаны упрощающие предположения, какие у модели слабые места и явные недостатки, и т. п. [17].

Техническая поддержка модели требует глубокой фундаментальной подготовки в области физики полупроводниковых приборов, численных методов анализа и техники эксперимента. Поэтому качество модели в значительной степени определяется качеством персонала, осуществляющего ее техническую поддержку. Это одна из самых больших проблем моделирования [32]. В то же время, хорошая модель не должна требовать высокой квалификации персонала для ее использования [17].

В настоящее время появление новых технологий происходит быстрее, чем разработка моделей для этих технологий. Поэтому требуется быстро разрабатывать модель; в противном случае ко времени ее появления она устаревает.

По причине быстрого развития полупроводниковой индустрии модель должна находиться в состоянии непрерывного развития. Однажды созданная модель, ставшая всеобщим достоянием, обречена на быстрое моральное старение и умирание. Для долгого существования модель должна иметь достаточное финансирование поставщиком систем САПР или достаточную рентабельность собственных продаж. Это условие является необходимым для жизнеспособности компактной модели.

Очень заманчиво иметь единую меру качества компактной модели. Главная проблема, стоящая на этом пути, заключается в том, что многие очень важные параметры моделей не могут быть описаны количественно. Принцип невозможности полной формализации содержательных систем, сформулированный Геделем в 1931 году, не позволяет найти численную оценку качества моделей. Тем не менее в работе [17] предпринята попытка сформулировать такой показатель. Он выглядит следующим образом:

$$Q_{Model} = \frac{1,5^{100/A_{fit}}}{T \times n_{eng} \times \left(\sum |C_{ij}| \right) E_{ext} \times n_{par}}$$

где A_{fit} — погрешность подгонки к экспериментальным данным в процентах; T — время, необходимое для экстракции параметров (в часах); n_{eng} — количество инженеров, выполняющих экстракцию; C_{ij} — коэффициенты корреляции параметров i, j ; — погрешность экстраполяции в процентах; n_{par} — количество параметров модели.

Точность модели

Степень соответствия между моделью и объектом можно характеризовать *точностью, достоверностью, диапазоном изменения переменных и параметров*, а также *количеством информации* об объекте, содержащейся в модели.

Понятие точности компактной модели, используемое в литературе уже более 40 лет, многогранно и неопределенно. Одной из количественных мер точности является погрешность. Погрешность моделей транзисторов обычно оценивают по степени соответствия характеристик модели экспериментальным характеристикам транзистора. При этом, указывая значение относительной погрешности, часто имеют в виду *приведенную погрешность*, то есть абсолютную погрешность, деленную на значение верхней границы динамического диапазона или на среднее по диапазону значение. Иногда имеют в виду максимальную относительную погрешность в пределах динамического диапазона, но практически никогда не указывают, как именно погрешность определена. Не указывают также *границы динамического диапазона*, в котором оценивалась погрешность, хотя всегда можно найти такой режим работы транзистора за пределами динамического диапазона, в котором погрешность превысит 100%. Кроме того, не указывают, погрешность какой величины была измерена (тока, напряжения или проводимости, или максимальная из них, или их векторная сумма, и для каких выводов прибора).

Для короткоканальных транзисторов используют две методики экстракции параметров: экстракция по одному транзистору и *экстракция по группе транзисторов* с разными величинами длины и ширины канала. Первый подход не позволяет идентифицировать параметры, отвечающие за геометрические зависимости, и поэтому пригоден для моделирования только в случаях, когда не требуется выполнять оптимизацию по геометрическим параметрам или статистический анализ ИС, а количество наборов параметров равно количеству разнотипных транзисторов.

Экстракция параметров по группе транзисторов в настоящее время является более перспективным и общепризнанным подходом, поскольку позволяет получить единый набор параметров для транзисторов разных размеров, то есть в модели длина и ширина канала являются изменяемыми параметрами. Количество транзисторов с разной длиной и шириной канала в группе колеблется от 13 до 23 (для модели BSIM3v3) [4]. Однако парадокс состоит в том, что вследствие технологического разброса в группе оказывается, что модель описывает характеристики некоторого абстрактного транзистора, которого нет ни в этой группе, ни на одной из пластин, изготовленных в данном техпроцессе. Часть параметров модели соответствует одному транзистору из группы, часть — другому, а технологические параметры вообще относятся к некоторому «среднему» транзистору и берутся из предварительных электрофизических измерений.

Продолжение этого парадокса обнаруживается при попытке оценить точность модели. Если точность рассматривать как меру соответствия модели объекту, то в данном случае непонятно, какой из транзисторов

группы выбрать в качестве объекта, если учесть, что среднеквадратическое отклонение относительного разброса тока стока $\sigma(\Delta T_d/I_d)$ двух рядом расположенных идентичных транзисторов может достигать 8% при длине канала 0,5 мкм [33] и 30% при длине канала 0,18 мкм [34]. Поэтому, какой бы транзистор мы ни выбрали, оценка погрешности модели будет включать большую долю погрешности, обусловленную технологическим разбросом, и ее невозможно отделить от собственно погрешности модели. Проблема усложняется тем, что выполнить сравнение с одним конкретным транзистором невозможно, поскольку фактические технологические параметры этого транзистора будут отличаться от результатов электрофизических измерений этих параметров (которые являются усредненными величинами) на величину технологического разброса.

Этой проблемы не существовало для технологии 0,8 мкм, когда, например, параметр модели (уход длины канала от размера по фотошаблону), был равен 0,4–1 мкм, а его среднеквадратическое отклонение составляло всего 1%. Для современной технологии $\Delta L = 40...80$ нм, а технологический разброс ΔL составляет 100–300% [35]. Это вносит существенную методическую погрешность в процесс экстракции параметров и может дать значение параметра, не имеющее физического смысла [35].

Таким образом, точность моделирования субмикронных транзисторов [36] при экстракции параметров из группы транзисторов нельзя определить через максимальное расстояние между ординатами двух кривых, как это было принято для длинноканальных транзисторов.

Известна также двухшаговая методика экстракции параметров, когда на первом шаге определяют параметры с помощью группы транзисторов, а на втором шаге методами оптимизации находят подгоняемые параметры модели для одного транзистора из группы, оставляя без изменения определенные на первом шаге физические параметры. Однако при этом могут измениться производные тока стока по физическим параметрам, поскольку они зависят от подгоняемых параметров. Достоинством двухшаговой методики является возможность применения традиционной оценки погрешности как расстояния между двумя кривыми (то есть как нормы вектора разности координат), поскольку характеристики модели оказываются подогнанными к характеристикам одного конкретного транзистора. Однако эту погрешность правильнее называть не погрешностью модели, а *погрешностью подгонки кривых*, поскольку она ничего не говорит о степени соответствия модели другим транзисторам данного техпроцесса. Понятие «погрешность модели» существенно отличается от понятия «погрешность подгонки» уравнений модели. Различие состоит в том, что погрешность модели должна описывать соответствие модели техпроцессу ИС, а погрешность подгонки описывает соответствие одному-единственному транзистору.

По описанным выше причинам требование определенной точности не включено в список требований к стандартным моделям [18]. Декларирование «погрешности подгонки величиной 2%» ничего не говорит о том, насколько правильно набор параметров, обеспечивший такую «точность», характеризует технологию и будет пригоден для моделирования всей ИС, а именно это является конечной целью применения компактных моделей.

Корректное определение точности должно быть основано на статистическом описании модели и объекта. Можно предложить следующую процедуру статистической оценки точности компактной модели. Предположим, что в нашем распоряжении имеется статистически значимое количество транзисторов, например, 1000 шт. Предположим также, что мы нашли величины параметров модели и их среднеквадратические отклонения, связанные с технологическим разбросом, и теперь хотим оценить погрешность модели. Для этого с помощью генератора случайных чисел (предполагаем, что плотность распределения параметров описывается нормальным законом) генерируем 1000 наборов параметров модели и для каждого набора строим интересные нас характеристики. Далее, сопоставляя характеристики модели с характеристиками реальных транзисторов, можно найти соответствие между характеристиками по критерию наилучшего совпадения. После этого можно обычным способом вычислить погрешности моделирования отдельных транзисторов и затем построить гистограмму частоты появления погрешностей, которая и будет характеризовать погрешность модели.

Очередной проблемой в оценке точности модели является многообразие характеристик, по которым можно оценивать точность. Суть проблемы состоит в следующем. Ток стока модели в статике описывается уравнением с 6 переменными

$$i_d = f(V_{ds}, V_{gs}, V_{bs}, L, W, T) \quad (1)$$

где V_{ds} , V_{gs} , V_{bs} — напряжение на стоке, затворе и подложке относительно истока; L , W — длина и ширина канала, T — температура. Если модель используется для предсказания характеристик транзистора в будущих технологиях, то в число переменных должны входить еще и технологические параметры T_{ox} , ΔL , ΔW , N_{sub} , V_{fb} , μ , ρ_{slp} , X_j (толщина окисла, уход длины и ширины канала, концентрация примеси в подложке, напряжение плоских зон, подвижность носителей, поверхностное сопротивление, глубина залегания p-n-переходов). В современных транзисторах не менее важно моделирование тока утечки затвора и подложки, которые в общем случае также являются функциями указанных выше переменных.

Точность моделирования тока еще не говорит о точности моделирования производных функции (1), которые являются важной величиной для аналоговых и малосигнальных цепей. Для моделирования радиочастотных схем и анализа коэффициента интермодуляционных искажений важно знать точность второй и третьей производной функции (1) [37].

Для оценки погрешности функции многих переменных строят семейство характеристик, в котором одна переменная изменяется непрерывно, вторая принимает несколько дискретных значений, остальные переменные принимают фиксированные значения. Однако общее количество графиков даже для одной функции с 6 переменными и ее производными составит несколько тысяч. Поэтому на практике идут на снижение достоверности оценки погрешности и выбирают наиболее информативные графики. Так, в работе [38] использовано около сотни графиков, по которым сравнивались модели EKV, SP и BSIM3v3 с реальным транзистором. В их числе: $i_d(V_{gs})$, $\log(i_d(V_{gs}))$, $g_m(V_{gs})$ при $V_{bs} = 0 \dots 1,5$, $V_{ds} = 0$; $i_d(V_d)$, $g_{ds}(V_d)$, $\log(g_{ds}(V_d))$ для значений $W/L = 10/10, 10/0,13, 0,24/0,13$ (длина и ширина указаны в мкм), всего 36 графиков. Кроме того, оценивается погрешность моделирования зависимости порогового напряжения от длины канала $V_{th} = f(L)$ для транзисторов с разным соотношением длины и ширины и отношение передаточной проводимости к току истока $g_{ms}/i_s = f(i_s)$ при разных геометрии и напряжениях на выводах

$$\left(\text{здесь } g_{ms} = \frac{\partial i_s}{\partial V_{sb}} \right).$$

Таким образом, погрешность подгонки должна характеризоваться вектором погрешностей. Грубой оценкой погрешности может служить норма вектора, однако она слишком малоинформативна. С практической точки зрения, типы кривых, по которым оценивается погрешность, нужно выбирать не формально, а исходя из смысла решаемой задачи.

Важно также отметить, что ценность каждого компонента вектора погрешности различна для каждого конкретного применения транзистора. Например, при моделировании цифровых ИС производные тока стока по напряжениям влияют только на сходимость метода Ньютона, но не на точность полученного результата. При моделировании генераторов тока во входном каскаде операционного усилителя главным параметром является погрешность моделирования выходной малосигнальной проводимости и неважны параметры режима слабой инверсии. При моделировании коэффициента интермодуляционных искажений радиочастотного усилителя важно знать погрешность моделирования третьей производной тока стока по напряжению на затворе. При моделировании выходных каскадов усилителей может интересовать погрешность моделирования статической выходной проводимости G_o .

Количественное описание погрешностей

Во всех описанных случаях, когда оценивается погрешность подгонки кривых, выполняется сравнение пары кривых, одна из которых, $y = f(x)$, принадлежит модели, а вторая — $y^o = f^o(x)$ — объекту моделирования.

Погрешность оценивают в точках

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2)$$

расстояние между которыми выбирают равномерным или в соответствии со смыслом

решаемой задачи. Например, на крутых участках кривой эти точки можно брать гуще, на пологих участках — реже. Теперь можно вычислить значения функции, описывающей модель, и измерять данные реального транзистора в выбранных точках x . В результате получим векторы значений функций

$$y = f(x); \\ y^o = f^o(x).$$

Теперь можно сформировать вектор абсолютных погрешностей

$$\Delta y = y - y^o \quad (3)$$

Вектор погрешностей несет в себе самую подробную информацию о точности модели, однако на практике погрешность оценивают чаще как норму этого вектора:

$$E = \|\Delta y\|$$

Норму вектора можно определить тремя способами, имеющими наглядную практическую интерпретацию:

$$E = \max |\Delta y_k| \quad (4)$$

$$E = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |\Delta y_k| \quad (5)$$

$$E = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{k=1}^n |\Delta y_k|^2} \quad (6)$$

Первый вариант — максимум модуля текущей погрешности — наиболее широко распространен, и по умолчанию, когда не указывают, каким образом определена погрешность, имеют в виду именно этот вариант. Он гарантирует, что в процессе использования модели никогда не встретится погрешность больше E . Недостаток такого критерия проявляется в случае, когда обе кривые проходят близко на большей части интервала изменения x , но в одном месте, например, на границах, что типично для аппроксимации спайном, имеют резкий выброс. Этот выброс может даже лежать за границей диапазона, в котором используется модель. Тем не менее критерий (5) даст большее значение погрешности, хотя модель хорошо аппроксимирует объект в диапазоне ее применения. Такой критерий дает слишком пессимистическую оценку погрешности и поэтому может привести к проектированию ИС с низкой конкурентоспособностью.

Второй вариант имеет смысл средней погрешности. Он используется реже, но в вышеописанном примере дает оценку, которая более правдоподобно соотносится со смыслом задачи моделирования. Недостатком его является слишком оптимистическая оценка погрешности, которая может быть в несколько раз меньше максимальной.

Третий вариант — среднеквадратическая погрешность — распространен достаточно широко, и он дает оценку, которая в смысле «оптимистичности» занимает промежуточное положение между первыми двумя, поскольку

после возведения отдельных компонентов погрешности в квадрат возрастает вес компонент с большей погрешностью. Главным достоинством среднеквадратичной оценки погрешности является сопоставимость с понятием среднеквадратической погрешности измерений и гладкость функции, которая позволяет использовать эту оценку в задачах минимизации погрешности и в аналитических исследованиях.

Погрешности могут быть абсолютными $\Delta y = y - y^0$, относительными $\gamma_y = (y - y^0)/y^0$ и приведенными $\tilde{\gamma}_y = (y - y^0)/y_m^0$, где y_m^0 — обычно либо верхняя граница динамического диапазона, либо среднее (максимальное) значение по диапазону, либо другая величина — в соответствии со смыслом решаемой задачи. Абсолютная погрешность более информативна при малых токах или напряжениях на выводах транзистора, сравнимых с величиной шумов, когда относительная погрешность стремится к бесконечности. Относительная погрешность наиболее удобна, когда величина абсолютной погрешности пропорциональна значению функции и поэтому относительная погрешность является константой. Понятие относительной погрешности иногда путают с приведенной погрешностью. Например, при моделировании цифровых схем с помощью упрощенных моделей, состоящих из переключаемого резистора и линейных емкостей, часто декларируют «погрешность моделирования не более 5%». Однако, очевидно, это не означает, что абсолютная погрешность при напряжении на стоке 10 мВ составляет 0,5 мВ. В этих случаях имеют в виду погрешность, приведенную к верхней границе динамического диапазона, когда в знаменателе используется не текущее, а максимальное значение нормирующей величины.

Реальные схемы всегда работают в условиях шумов и электромагнитных помех, которые позволяют ослабить требования к точности модели при напряжениях, сравнимых с напряжением шумов. Например, при моделировании цифровых цепей, когда помехи на шине «земли» превышают 100 мВ, а разработчика интересуют только временные задержки и логические уровни, требовать относительной погрешности 5% во всем диапазоне изменения переменных нет смысла. В этих случаях погрешность удобно задавать одновременно с помощью двух составляющих: абсолютной и относительной.

В общем случае величина погрешности является функцией переменных x или y . Правильный выбор функциональной зависимости погрешности позволяет снизить требования к точности модели при одновременном увеличении точности получаемого результата. Если эту зависимость аппроксимировать прямой линией, то итоговую погрешность можно записать в виде

$$E = \gamma \times x + \delta \quad (7)$$

где γ и δ — мультипликативная и аддитивная погрешности. Аддитивная погрешность является ограничителем погрешности в обла-

сти малых токов (напряжений), когда $x = 0$. Мультипликативная погрешность более информативна в области больших токов (напряжений). Примером мультипликативной погрешности является погрешность передаточной проводимости g_m МОП-транзистора: погрешность тока стока при постоянной погрешности передаточной проводимости пропорциональна напряжению на затворе.

Выше был рассмотрен случай, когда обе функции вычисляются при одном и том же значении аргумента x . Однако это удобно только для пологих участков функции $y = f(x)$, на которых производная $\partial y/\partial x$ меньше единицы (рис. 2). На противоположных участках, где $\partial y/\partial x > 1$, малые погрешности в задании координаты x будут приводить к усилению погрешности x , которая будет складываться с погрешностью y . Кроме того, в зависимости от смысла решаемой задачи может быть более информативной оценка рассогласования между кривыми по x при заданном (рис. 3).

Величина погрешности сильно зависит от того, какую из величин x и y считать независимой переменной, а какую — зависимой. Так, если на рис. 2 при некотором заданном x найти $\Delta y/y$, а затем при заданном y найти $\Delta x/x$,

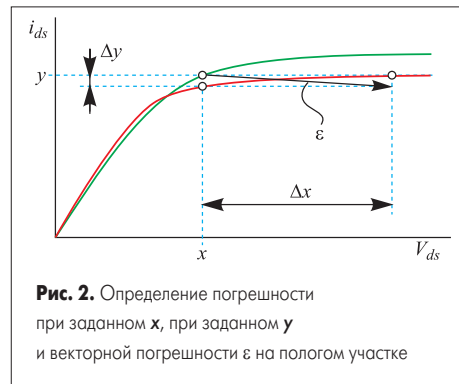


Рис. 2. Определение погрешности при заданном x , при заданном y и векторной погрешности ϵ на пологом участке

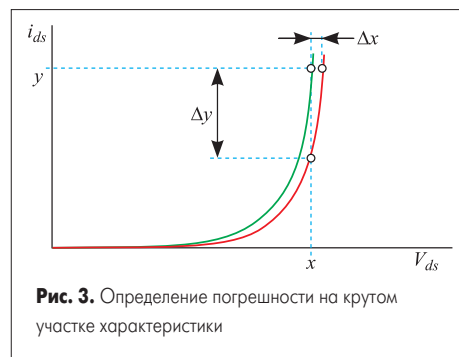


Рис. 3. Определение погрешности на крутом участке характеристики

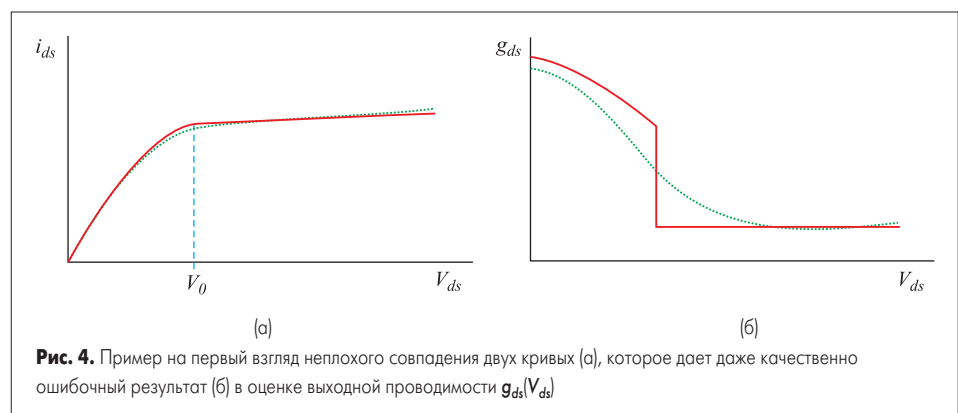


Рис. 4. Пример на первый взгляд неплохого совпадения двух кривых (а), которое дает даже качественно ошибочный результат (б) в оценке выходной проводимости $g_{ds}(V_{ds})$

то получим существенно (иногда на несколько порядков) различающиеся значения. Противоположные свойства имеют погрешности, определенные на крутом участке кривой (рис. 3).

Определение погрешности на практике следует выбирать исходя из смысла решаемой задачи. Так, если в схеме токового зеркала нас интересует коэффициент передачи тока, то мы должны знать погрешность модели по току. В этом случае целесообразно при фиксированном напряжении x (рис. 2) определить разность токов модели и объекта и погрешность в виде $\Delta y/y$, поскольку погрешность по напряжению на стоке слабо влияет на характеристики токового зеркала. Если с той же моделью и теми же транзисторами мы хотим оценить напряжение смещения нуля дифференциального усилителя, мы должны при заданном токе стока найти погрешность моделирования напряжения на затворе $\Delta x/x$ (рис. 3). Оценка же погрешности в виде $\Delta y/y$ даст слишком пессимистический результат.

В тех случаях, когда заранее неизвестно, какое из определений погрешности больше подходит к смыслу решаемой задачи, можно пользоваться понятием модуля вектора погрешности:

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2} \quad (8)$$

Достоинством этой оценки является то, что ни одна из составляющих не может превысить объявленное значение погрешности, а в предельных частных случаях, когда один из компонентов много больше другого, мы получаем приведенные выше определения погрешностей по x или по y .

Поскольку характеристики обычно представляются в виде семейства кривых, общая погрешность семейства может быть определена как максимальная из погрешностей по семейству, как средняя или среднеквадратичная погрешность — аналогично (4) — (6).

Однако знания погрешностей по току и напряжению совсем не достаточно для описания точности подгонки кривых. На рис. 4 приведен пример, когда две характеристики, имеющие на первый взгляд очень хорошее совпадение, дают чрезмерно низкую точность при моделировании выходной проводимости транзистора и даже качественно ошибочный результат при попытке моделирования усилителя с рабочей точкой V_0 .

Приведенный пример характерен для большинства моделей, использующих разные функции для описания крутой и пологой области вольт-амперных характеристик МОП-транзистора, в частности, для модели Level 3. Точка V_0 является точкой «сшивания» двух функций, в которой первая производная имеет разрыв. Аналогичные графики можно получить для границы области слабой и сильной инверсии, а также в точке, где напряжение на стоке изменяет свою полярность. Выходное сопротивление МОП-транзистора определяет коэффициент усиления усилительного каскада, а вид его зависимости от напряжения определяет нелинейность усилителя. Существующие модели учитывают этот эффект с погрешностью более 50% [39].

Таким образом, при описании точностных параметров модели необходимо указывать погрешность моделирования первых производных тока стока по напряжениям на выводах транзистора. Для расчета коэффициента нелинейных искажений или зависимости коэффициента ослабления синфазного сигнала усилителя от величины тока в рабочей точке необходима информация о точности моделирования второй производной тока стока по напряжениям на выводах транзистора. В радиочастотных схемах требуется точное моделирование производных третьего порядка.

Итак, понятие погрешности подгонки модели к характеристикам объекта достаточно сложное и трудно формализуемое. В общем случае, чем более формализованным и универсальным становится определение погрешности, тем меньше полезной информации в нем содержится.

В связи с изложенными выше проблемами для субмикронных транзисторов большую роль начинает играть не точность, а достоверность моделирования.

Окончание следует

Литература

30. McAndrew C. C. Practical Modeling for Circuit Simulation // IEEE Journal of Solid-State Circuits. Vol. 33. No. 3. March 1998.
31. Kim B., Ko J.-S., Lee K. A New Linearization Technique for MOSFET RF Amplifier Using Multiple Gated Transistors // IEEE Microwave And Guided Wave Letters. Vol. 10. No. 9. September 2000.
32. Foty D., Bendix P. An Executive Guide to MOS Transistor Modeling. FSA Fabless Forum. June 2001.
33. Thewes R., Linnenbank, Kollmer U., Burges S., Schaper U., Brederlow R., Weber W. Mismatch of MOSFET Small Signal Parameters Under Analog Operation // IEEE Electron Device Letters. Vol. 21. No. 12. Dec. 2000.
34. Croon J. A., Rosmeulen M., Decoutere S., Sansen W., Maes H. E. An Easy-to-Use Mismatch Model for the MOS Transistor // IEEE Journal of Solid-State Circuits. Vol. 37. No. 8. Aug. 2002.
35. Biesemans S., Hendriks M., Kubicek S., De Meyer K. Practical accuracy analysis of some existing effective channel length and series resistance extraction methods for MOSFET's // Electron Devices, IEEE Transactions on. Vol. 45. No. 6. June 1998.
36. Денисенко В. В. Особенности субмикронных МОП-транзисторов // Chip News. № 7. 2002.
37. Langevelde R., Scholten A. J., Klaassen D. B. M. MOS Model 11 // MSM Workshop on Compact Modeling. San Juan, PR. April 2002.
38. Bendix P. Detailed comparison of the SP2001, EKV and BSIM3 Model // Modeling and simulation of microsystems. 2002.
39. Razavi B. CMOS Technology Characterization for Analog and RF Design // IEEE Journal on Solid-State Circuits. Vol. 34. No. 3. March 1999.