

## КОМПАКТНЫЕ МОДЕЛИ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ ДЛЯ СБИС

## ЧАСТЬ 2. ТОЧНОСТЬ. ДОСТОВЕРНОСТЬ. ТИПИЧНЫЕ ОШИБКИ

Предлагаемая вторая часть статьи\* посвящена оценкам точности и достоверности моделей, а также типичным ошибкам, которыми сопровождаются разработка, внедрение и применение моделей. Чтобы "не наступать на грабли", разработчики СБИС должны иметь представление о возможностях и ограничениях моделей МОП-транзисторов. Здесь публикуется сокращенный вариант обзора этих проблем, а более детальный их анализ можно найти по адресу [http://www.RLDA.ru/MOSFET\\_Simulation.pdf](http://www.RLDA.ru/MOSFET_Simulation.pdf).

Компактные модели МОП-транзисторов предназначены для использования в программах схемотехнического (электрического) моделирования. Схемотехническое моделирование принято называть точным. Считается, что методы решения системы нелинейных дифференциальных уравнений, определяющих электрическую модель схемы, не вносят значительной погрешности, и точность полученного результата в основном определяется точностью используемых моделей электронных компонентов, в том числе и моделей МОП-транзисторов.

### ТОЧНОСТЬ

Под точностью модели обычно понимают степень соответствия модельных характеристик транзистора, рассчитанных с использованием параметров модели, полученных в результате экстракции, экспериментальным характеристикам транзистора. Количественной мерой точности является погрешность. Экстракцию параметров обычно выполняют, используя группу транзисторов. Поскольку в группе всегда существует статистический разброс, модель описывает характеристики некоторого абстрактного транзистора, не являющегося элементом группы. При попытке оценить точность модели возникает парадокс. Если точность рассматривать как меру соответствия модели и объекта, то непонятно, с каким конкретно транзистором производить сравнение, поскольку среднеквадратическое отклонение относительного разброса тока стока двух рядом расположенных транзисторов с номинальной длиной канала 0,18 мкм может достигать 30% [1]. Таким образом, погрешность, определенная по разнице ординат, как это было принято для длинноканальных транзисторов, не всегда адекватно отражает результирующую точность моделирования субмикронных транзисторов [2].

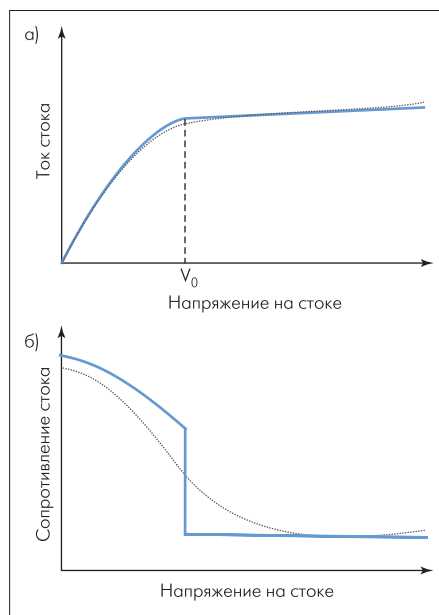
Пример несовершенства оценки точности по степени совпадения кривых приведен на рис. 1. На первый взгляд, вольт-амперные характеристики (рис. 1а) практически совпадают, но при моделировании выходной проводимости транзистора точность модели чрез-

В.Денисенко  
Victor@RLDA.ru



вычайно низкая (рис. 1б). Приведенный пример характерен для большинства моделей, использующих разные функции для описания крутой и пологой областей вольт-амперных характеристик МОП-транзистора, в частности, для модели Level 3. Точка  $V_0$  является точкой "сшивания" двух функций, в которой производная имеет разрыв.

Подобных ситуаций, когда, казалось бы, "точная" модель дает совершенно неправильные результаты, за время существования МОП-транзисторов возникло немало. И сегодня, после внесения нескольких десятков правок и официальной стандартизации модели BSIM3v3, в ней продолжают выявляться существен-



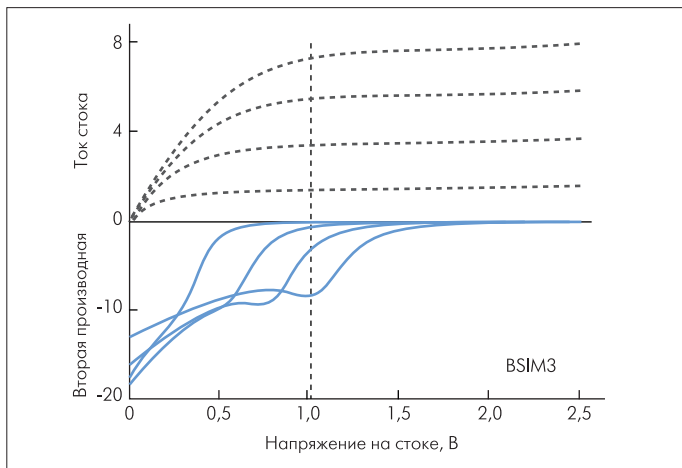
**Рис. 1. Пример несовершенства оценки точности модели по степени совпадения кривых (пунктиром показаны экспериментальные характеристики)**

ные ошибки. Даже физико-технологические модели, учитывающие большинство эффектов, связанных с малыми размерами, могут давать результаты, не согласующиеся с экспериментом [3]. Таким образом, для субмикронных транзисторов большую роль начинает играть не точность, а достоверность моделирования.

### ДОСТОВЕРНОСТЬ

Достоверность характеризует степень доверия к полученным с помощью модели результатам. В более узком смысле достоверность можно рассматривать как вероятность того, что в конкретном применении фактическая точность модели соответствует ожидаемой. Несмотря на огромную работу в области усовершенствования моделей, многие разработчики до сих пор больше доверяют проверкам фрагментов ИС на кремнии, чем моделированию [4]. Это связано с тем, что на достоверность моделей МОП-транзисторов наряду с субъективным "человеческим фактором" и фактором опережающего развития технологии влияют следующие объективные причины:

\* Первая часть статьи, в которой рассмотрены общие вопросы классификации и стандартизации моделей МОП-транзисторов, опубликована в предыдущем номере журнала – ЭЛЕКТРОНИКА:НТБ, 2004, №5, с.76–78.



**Рис.2. Выброс на графике второй производной модели BSIM3v.3, не связанный с физикой работы транзистора**

- верификация модели в процессе ее разработки всегда выполняется не для тех транзисторов, которые используются при изготовлении проектируемой ИС;
- объем верификации всегда ограничен, поэтому существует возможность неучтенных ситуаций. Например, после многих лет эксплуатации моделей первого и второго поколения обнаружилось, что они давали выбросы, не имеющие физического смысла, а передаточная проводимость и малосигнальная проводимость сток-исток могли стать отрицательными [5]. После этого в процесс верификации стали обязательно включать не только количественные, но и качественные тесты;
- требования простоты и вычислительной эффективности принуждают разработчиков модели двигаться по грани ее достоверности. Например, модель, разработанная для технологии 0,25 мкм, уже непригодна для 0,18-мкм транзисторов;
- для обеспечения гладкости при переходе из крутой области в пологую (рис. 2) приходится использовать сглаживающие функции [6], которые получены не из физических представлений, а исходя из требований гладкости, поэтому выбросы на графике второй производной (нижнее семейство кривых на рис. 2) никак не связаны с реальными процессами в транзисторе. Модели MISNAN и BNR [7] в этом режиме имеют нереалистичное поведение проводимости [8].

Опережающее развитие технологии связано с проявлениями новых физических эффектов, которые не были учтены в моделях. На сегодняшний день влияние новых технологий проявляется в следующем:

- уменьшение размеров элементов транзистора приводит к тому, что принятые ранее допущения теряют силу. Напряженность электрического поля увеличивается, и уменьшается количество электронов, участвующих в переносе заряда, начинают проявляться новые физические эффекты. Эффект узкого канала становится существенно трехмерным и технологически зависимым [9], поэтому одна и та же аналитическая модель не может описать его для приборов, выполненных по разным технологиям;
- учет квантовомеханических эффектов становится необходимым при переходе к нанометровой технологии. Модели процесса туннелирования постоянно уточняются. Толщина окисла становится сравнимой с толщиной слоя заряда в окисле, что приводит к необходимости использовать статистику Ферми-Дирака и уравнения Шредингера и Пуассона;
- топология транзистора начинает сильно влиять на его электрические характеристики. Затвор уже нельзя считать плоским

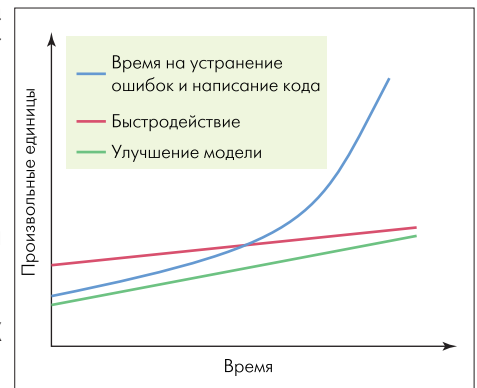
и нужно учитывать емкость между боковой поверхностью затвора и истоком/стоком [10]. Приборы, отличающиеся не шириной и длиной канала, а только топологией, могут иметь 30%-ное различие вольт-амперных характеристик [11];

- неквазистатические эффекты не могут быть игнорированы в гигагерцевом диапазоне частот и должны быть представлены в модели;
- новые технологии или нетрадиционные конструкции транзисторов [2] требуют разработки новых моделей или модифицирования методики идентификации их параметров.

## КЛАССИФИКАЦИЯ ОШИБОК

Помимо объективных причин, на достоверность влияют ошибки, возникающие при разработке и применении моделей МОП-транзисторов. Причины возникновения и характер ошибок весьма разнообразны.

**Ошибки программирования.** Сложность моделей приводит к появлению ошибок при их разработке, написании программного кода и тестировании программы. Программный код последней версии модели BSIM3 на языке Си содержит 20 тыс. строк. Улучшение свойств модели происходит медленнее, чем увеличение количества появляющихся при этом ошибок (рис.3) [6]. В условном обозначении версии BSIM4.XX третья цифра изменяется при очередном исправлении ошибок ежеквартально. Рассмотрим характерные примеры.



**Рис.3. Свойства модели улучшаются медленнее устранения ошибок и написания кода**

- В модели BSIM3 версии 3.1 по сравнению с версией 3.0 устранена проблема деления на ноль или появления отрицательного числа под знаком корня [6].
- В коммерческой версии программы PSpice из пакета Design Lab 8.0 не распознаются параметры DVTW1, DVTW2, поскольку на самом деле они должны называться DVT1W, DVT2W.
- В версии BSIM3v3 пропущена производная в операторе if-else при capMod=3 [12].

При программировании моделей могут встречаться такие ошибки, как накопление вычислительной погрешности, выход за разрядную сетку, появление разрывности уравнений, вызванное исключительно ошибками программирования [6].

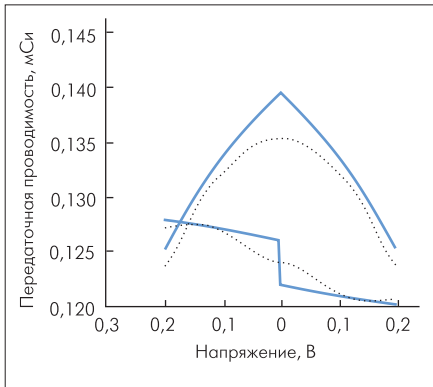
**Нефизическое поведение.** Как уже говорилось, верификация модели не может быть стопроцентной. Вот некоторые примеры ошибок, связанных с нефизическим поведением моделей, пропущенных при их верификации.

- При двухтональном воздействии на радиочастотную КМОП-схему в выходном спектре появлялся шум, который не связан с физикой работы схемы, а вызван разрывностью производной в уравнениях [4].
- На графике стоковой проводимости и тока стока модели BSIM3.2 наблюдался выброс, отсутствующий у реальных приборов, при переходе из линейной области в область насыщения [6].
- Несмотря на долгую историю и массу публикаций по обеспечению гладкости моделей, даже такие известные модели, как

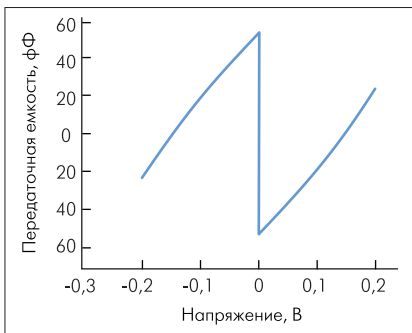
BSIM3v3, EKV, MOS9, PCIM, имеют разрыв производных при переходе от прямого включения к инверсному (рис. 4, 5) [13], что у реальных приборов не наблюдается.

**Ошибки при вычислениях.** Наиболее распространенное проявление такого рода ошибок – отсутствие правильной сходимости в программе моделирования и, как следствие, появление ложных результатов. Это поясняется следующими примерами.

- При переходе от подпороговой области к области сильной инверсии в некоторых моделях возникает острый выброс на зависимости отношения передаточной проводимости к току стока от напряжения затвор-исток, а на границе между линейной областью и областью насыщения появляется острый изгиб на зависимости выходного сопротивления от напряжения на стоке.



**Рис. 4. Ошибочное поведение передаточной проводимости при изменении полярности напряжения. На нижней кривой показана вторая производная. Сплошные линии – характеристики модели, пунктирные – реального транзистора**



**Рис. 5. Ошибочное поведение передаточной емкости при изменении полярности напряжения**

Предполагается, что эти выбросы появляются не только вследствие погрешности модели, но и вследствие расхождений вычислительного процесса, вызванной разрывностью производных [6].

- Отсутствие гладкости вольт-амперных характеристик модели может приводить к локальной расхождению вычислительного процесса и, как следствие, к появлению дополнительной неконтролируемой погрешности моделирования. Поэтому в набор тестов для верификации модели были включены проверки на гладкость в точке перехода напряжения через ноль, при переходе из подпороговой области в режим сильной инверсии и при переходе из линейной области в область насыщения [14].

**Организационные ошибки.** В процессе эксплуатации моделей возникает проблема согласованности версии модели у пользователя с версией модели у поставщика параметров, согласованного исправления ошибок в уже проданных программах моделирования, единообразного понимания процедуры экстракции параметров пользователями и разработчиками моделей. Приведем некоторые характерные проявления организационных ошибок.

- В силу организационных причин возможны ситуации, когда параметры, экстрагированные для модели одной версии, используются для другой версии. В программе экстракции параметров может быть использована не та версия модели, которая используется в моделирующей программе.
- После модификации BSIM3.1 и появления BSIM3.2 часть кода модели ошибочно выполнялась из версии 3.1, а часть – из версии 3.2 [15].

- На совещании совета по компактным моделям проходила дискуссия о том, что следует предпринять, чтобы ошибки, о которых поступила информация, одновременно исправлялись всеми поставщиками программ моделирования, использующими модель BSIM. Список ошибок был размещен на Интернет-странице Калифорнийского университета в Беркли, но в исходных кодах эти ошибки своевременно учтены не были [15].
- Чтобы снизить затраты, связанные с детальной экстракцией параметров моделей, кремниевая мастерская иногда выдает пользователю параметры для наихудшего случая [16], что ведет к снижению качества проектов. В связи со сложностью корректной экстракции параметров они выдаются кремниевой мастерской с большим запозданием или не выдаются вообще [11].
- При поставке параметров модели, как правило, не указывают допустимый диапазон изменения параметров, способ их экстракции, допустимые конструкции транзисторов, процедуру верификации и диапазон токов и напряжений на выводах. Поэтому пользователь может ошибочно работать с моделью за пределами ее применимости.

**Ошибки пользователей.** Книга, содержащая описание модели BSIM3, занимает уже 460 страниц [6], а число параметров моделей удваивается каждые десять лет [10]. Неудивительно, что пользователи допускают ошибки. Вот несколько примеров.

- В моделирующих программах различные модели имеют одинаковые обозначения некоторых параметров, например VTO. Однако значения этих параметров для разных моделей на самом деле различны. Неопытные пользователи этого не знают и могут использовать одни и те же величины для разных моделей [8].
- Многие модели используют несколько вариантов моделей емкости, шума, подвижности. Пользователь должен иметь достаточно высокую квалификацию, чтобы выбрать вариант, подходящий для конкретной задачи.
- Экстракция параметров уже сейчас является слишком трудным делом и может стать вообще невыполнимым по причине сложности [17].
- Для получения достоверных результатов моделирования пользователь должен знать, какие именно параметры транзистора и режимы его работы наиболее важны в конкретной схеме, степень влияния вариации параметров техпроцесса на параметры модели и ожидаемый разброс характеристик модели. В работе [8] представлено несколько примеров, когда неправильный учет особенностей конфигурации транзистора приводил к грубым ошибкам, достигающим 100%.

Таким образом, причины, влияющие на получение ошибочного результата моделирования при использовании "точной" модели, нельзя рассматривать как досадное недоразумение. Они имеют систематический характер и оказывают существенное влияние на качество модели, а потому должны быть систематизированы, охарактеризованы и приняты во внимание как пользователями, так и разработчиками компактных моделей. Многие меры по преодолению перечисленных здесь проблем кажутся очевидными и связаны с организацией процесса разработки и эксплуатации модели. Однако существует и альтернативный путь – использование метода макетирования, когда вместо математических моделей используется реальный транзистор. В этом методе нужно сохранить только идею – реальный транзистор, и добавить все необходимые возможности математического моделирования, в том числе регулировку параметров, моделирование динамики, встраивание в стандартные про-

граммы схемотехнического моделирования ИС [18]. При этом устаревает этап экстракции параметров и этап разработки уравнений модели, которые являются наиболее частыми источниками ошибок.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Croon J. A., Rosmeulen M., Decoutere S., Sansen W., Maes H.E.** An Easy-to-Use Mismatch Model for the MOS Transistor. – IEEE Journ. of Solid-State Circuits, Aug. 2002, Vol.37, №8, p.1056–1064.
2. **Денисенко В.В.** Особенности субмикронных МОП-транзисторов. – Chip News, 2002, №7, с.27–37.
3. **Duane M.** The role of TCAD in compact modeling. – Workshop on Compact Modeling, 5-th Int. Conf. on Modeling and Simulation of Microsystem, April 22–25, MSM 2002, p.719–721.
4. **Razavi B.** CMOS Technology Characterization for Analog and RF Design. – IEEE Journ. on Solid-State Circuits, March 1999, Vol.34, №3, p. 268–276.
5. **Tsividis Y.P., Suyama K.** MOSFET Modeling for Analog Circuit CAD: Problems and Prospects. – IEEE Journal of Solid-State Circuits, March 1994, vol.29, p.210–216.
6. **Cheng Y., Hu C.** MOSFET modeling &BSIM3 user's guide. – Kluwer Academic Publishers, 1999. – 461 p.
7. **Miura-Mattausch M., Feldmann W., Rahm A., Bollu M., Savignac D.** Unified complete MOSFET model for analysis of digital and analog circuits. – IEEE Trans. Computer-Aided Design, 1996, vol.15, p.1–7.
8. **McAndrew C. C.** Practical Modeling for Circuit Simulation. – IEEE Journal of Solid-State Circuits, March 1998, Vol.33, №3, p.439–448.
9. **Loiko K.V., Peidous I.V., Ho H.M. Lim D.H.** Simulation of narrow-width effect in sub-half-micron n-MOSFET with LOCOS isolation. – 1998 intern. Conf. MSM'98, Santa Clara, Calif., April 6–8, 1998, p.443–446.
10. **Foty D.P.** MOSFET Modeling with Spice. Principle and Practice. – Prentice Hall PTR, 1997, NJ. – 653 p.
11. **Owen Li.** Fidelity Beyond Accuracy. – Fabless Forum, Vol.6, June 1999, p.1–3.
12. **Liu W. and Hu C.** Notes and Bug Fixes for BSIM3v3.2.2. – UC Berkeley, April 20, 1999.
13. **Joardar K., Gullapalli K.K., McAndrew C.C., Burnham M.E., Wild A.** An Improved MOSFET Model for Circuit Simulation. – IEEE Transaction on Electron Devices, January 1998, Vol. 45, №1, p.134–148.
14. Benchmarks for Compact MOSFET Models. August 16, 1995. <http://www.eigroup.org/cmc/>
15. Compact Model Council Meeting December 1998, San Francisco, 1998.
16. **Sharam M.** Calibrating simulation tools for nanometer design. – IEEE Spectrum, June 1999, Vol. 36, №6, p.77–82.
17. **Gildenblat G.** Trends in surface-potential-based compact MOSFET models. – Fabless Forum, Vol.6, March 1999, p.37–38.
18. **Denisenko V.V.** Spice-like simulation using real devices instead of their mathematical models. – Proc. 1998 Intern. Conf. on Modeling and Simulation of Microsystems, Semiconductors, Sensors and Actuators, April 6–8, 1998, Santa Clara, CA, USA, p. 257–262.