ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СУБМИКРОННЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ ДЛЯ РАСЧЕТА НИЗКОВОЛЬТНЫХ И МИКРОМОЩНЫХ КМОП СБИС

SPECIAL ASPECTS OF SUBMICROMETER MOSFETS SIMULATION FOR LOW VOLTAGE, ULTRA-LOW POWER CMOS IC DESIGN

УДК 621.382.323: 536.48

ЛЕБЕДЕВ СЕРГЕЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ¹LEBEDEV SERGEY V.¹ПЕТРОСЯНЦ КОНСТАНТИН ОРЕСТОВИЧ^{2,3}PETROSYANTS KONSTANTIN O.^{2,3}

kpetrosyants@hse.ru

kpetrosyants@hse.ru

СТАХИН ВЕНИАМИН ГЕОРГИЕВИЧ¹STAKHIN VENIAMIN G.¹

stakhin@idm-plus.ru

stakhin@idm-plus.ru

ХАРИТОНОВ ИГОРЬ АНАТОЛЬЕВИЧ²KHARITONOV IGOR A.²¹ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1¹ National Research University of Electronic Technology
1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia² Научно-исследовательский университет² National Research University "Higher School of Economics"

«Высшая школа экономики»

(Moscow Institute of Electronics and Mathematics,

(Московский институт электроники и математики)

Department of Electronics Engineering)

123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34

34 Tallinskaya St., Moscow, 123458, Russia

³ Институт проблем проектирования в микроэлектронике
РАН (ИППМ РАН)³ Institute of Design Problems
in Microelectronics RAS (IPPM RAS)

124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3

3 Sovetskaya St., Zelenograd, Moscow, 124365

Приведены требования к моделям, особенностям определения их параметров, пакетам схемотехнического моделирования при проектировании низковольтных и микромощных КМОП СБИС. Представлены результаты схемотехнического моделирования характеристик КМОП схемы ($L = 0,35$ мкм) 2И-НЕ при уменьшении напряжения питания от 0,7 до 0,3 В. Показана работоспособность (выполнение логических функций) указанных схем при наименьшем значении питания с соответствующим значительным снижением быстродействия.

Ключевые слова: низковольтные схемы; микромощные схемы; КМОП транзисторы; САПР; SPICE модели; предпороговый режим работы; BSIM; BSIMSOI; EKV; параметры моделей.

The paper summarizes requirements to SPICE models, simulation tools, aspects of model parameter extraction for design of low voltage, ultra-low power CMOS ICs. It presents the results of 2NAND circuit ($L = 0.35\mu\text{m}$) simulation for supply voltage reduced from 0.7V to 0.3V. Their logical performance capabilities have been shown for the lowest value of supply voltage, with greatly reduced working frequency.

Keywords: low voltage circuits; ultra-low power; CMOS FETs; ICs; CAD Tools; SPICE models; model parameter extraction; subthreshold mode; BSIM; BSIMSOI; EKV.

Схемы с ультранизким энергопотреблением (микромощные схемы) широко используются в аппаратуре с автономным питанием и длительным сроком работы: кардиостимуляторах, различных датчиках, носимой аппаратуре и др. [1]. Известно, что для существенного снижения потребляемой мощности необходимо как снижать напряжение питания (менее 1 В), так и уменьшать потребляемый ток, переводя МОП транзисторы в предпороговый режим работы. Существенное уменьшение рабочих токов приводит, соответственно, и к существенному увеличению длительностей фронтов сигналов и существенному снижению рабочих частот схемы. В результате, минимальное энергопотребление достигается балансом между динамической потребляемой мощностью и статическим током потребления [1, 2]. При этом корректность описания предпорогового режима МОП транзистора является основным требованием к схемотехническим моделям,

используемым для проектирования микромощных схем [2, 3]. Это сводится к следующим конкретным требованиям к моделям и пакетам схемотехнического моделирования.

ТРЕБОВАНИЯ К SPICE МОДЕЛЯМ

- гладкость описания перехода от предпороговой к надпороговой сток-затворной характеристике (как для самой модели, так и для программ схемотехнического анализа);
- точность описания наклона предпороговой сток-затворной ВАХ;
- точность учета зависимости порогового напряжения от различных факторов: смещения подложки, длины и ширины канала, концентрации примеси и др.;
- точность описания токов утечки стока и его зависимости от электрического режима работы.

Для проектирования аппаратуры, работающей при значительном изменении температуры, возникают дополнительные требования к моделям и пакетам моделирования. Они заключаются в требованиях к точности описания зависимостей порогового напряжения, наклона предпороговой характеристики, токов утечки от температуры.

ТРЕБОВАНИЯ К ПРОЦЕДУРАМ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕСТОВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ И ЭКСТРАКЦИИ ПАРАМЕТРОВ ИХ МОДЕЛЕЙ

Приведенные выше требования в полной мере предъявляются к процедурам, аппаратуре и диапазону измерения характеристик тестовых МОП транзисторов и методик экстракции параметров их моделей.

ТРЕБОВАНИЯ К СРЕДСТВАМ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

При анализе больших схем дополнительно возникают вопросы выполнения указанных требований при использовании ускоренных (упрощенных) моделей и методов расчета.

Из распространенных моделей МОП транзисторов модель EKV имеет более гладкие характеристики, чем модели линии BSIM (BSIMSOI) [4], поэтому она более предпочтительна для расчетов микромощных КМОП схем. При этом модели линии BSIM (BSIMSOI) имеют большее распространение, обладают достаточно гладкими предпороговыми характеристиками, и интересно исследовать их применимость для расчета микромощных КМОП схем.

ТЕСТОВЫЕ КМОП ТРАНЗИСТОРЫ И СХЕМЫ

Для анализа применимости модели BSIMSOI и пакета HSPICE для анализа работы микромощных схем использовались отечественные тестовые КНИ МОП транзисторы и схемы инвертора 2И-НЕ с проектной нормой 0,18 мкм с номинальным напряжением питания 1,8 В, толщиной активного слоя $t_{Si} = 88$ нм, толщиной подзатворного оксида 3,4 нм, длиной канала 0,35 мкм [5]. Набор исследуемых транзисторов и их характеристики соответствовали стандартной методике экстракции параметров их SPICE моделей в пакете IC-CAP. Затем, определенные с использованием

а — напряжение питания 1,5 В, период 13 нс

б — напряжение питания 0,7 В, период 78 нс

в — напряжение питания 0,5 В, период 10 мкс

г — напряжение питания 0,3 В, период 10 мс

Рис. 1. Смоделированные переходные характеристики потребляемого тока, входного и выходного напряжений КМОП схемы 2И-НЕ при напряжении питания 1,5 В (а), 0,7 В (б), 0,5 В (в), 0,3 В (г).

измерительного комплекса [6] параметры модели BSIMSOI3 использовались для моделирования работы цифровых микро-мощных схем.

С помощью пакета HSPICE анализировалась цепочка из трех одинаковых последовательно включенных схем инвертора, 2И-НЕ: формирующей сигнал, основной и нагрузочной при снижении напряжения питания до 0,3 В. На рис. 1 приведены смоделированные переходные характеристики КМОП схемы 2И-НЕ (основной) (потребляемого тока, входного и выходного напряжений) при уменьшении напряжения питания от 1,5 В до 0,3 В.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Из рис. 1 видно, что КМОП КНИ схемы 2И-НЕ сохраняют свою работоспособность (правильно выполняют логику работы) при снижении напряжения питания до 300 мВ; с соответствующим снижением рабочих частот значительным (на 6 порядков) и потребляемого тока (на 2 порядка). Кроме того, результаты подтверждают применимость модели BSIMSOI и пакета HSPICE для расчета микро-мощных КМОП схем.

ВЫВОДЫ

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:

1. Показана принципиальная применимость отечественной 0,18 мкм КМОП КНИ технологии для создания микро-мощных цифровых КМОП схем;

2. Подтверждена применимость модели BSIMSOI3, комплекса и методик для экстракции ее параметров и пакета HSPICE для моделирования работы микро-мощных цифровых КМОП схем при уменьшении напряжения питания до 0,3 В.

ЛИТЕРАТУРА

1. Piguet Ch. *Low-Power CMOS Circuits: Technology, Logic Design and CAD Tools*. Taylor & Francis Group, 2006.
2. Alioto M. *Ultra-Low Power VLSI Circuit Design Demystified and Explained: A Tutorial*. *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, Vol. 59, No. 1, 2012, pp. 3–39.
3. Rakus M., Stopjakov V., Arbet Daniel. *Analysis of MOSFET Model for Low-Voltage Applications*. In Proc of 2016 International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA), Vysoke Tatry, Slovakia, 2016.
4. BSIMSOI3.2 MOSFET Model User's Manual. BSIM Group, UC Berkeley.
5. Петросянц К. О., Харитонов И. А., Самбурский Л. М., Попов Д. А., Стахин В. Г., Лебедев С. В. Моделирование КНИ МОП-транзисторов для высокотемпературных КМОП интегральных схем (до 300 °С) // В кн.: Международная конференция «Микроэлектроника 2015». г. Алушта, Крым, 28 сентября — 3 октября 2015 г. — М.: Техносфера, 2015. — С. 239–240.
6. Петросянц К. О., Самбурский Л. М., Харитонов И. А., Кожухов М. В. Измерения электрических характеристик биполярных и МОП-транзисторов под действием радиации // Измерительная техника. 2016. № 10. с. 55–60.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"

Цена 517 руб.

СХЕМОТЕХНИКА АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ (АЦП) В.Б. Топильский

М: ТЕХНОСФЕРА, 2014. — 288 с.
ISBN 978-5-94836-383-7

В учебном пособии, состоящем из двух частей, рассматриваются схемотехника аналого-цифровых преобразователей электрических величин для систем сбора данных и схемотехника аналого-цифровых преобразователей перемещений (преобразователи линейных и угловых перемещений, построенные на различных физических принципах) для информационно-управляющих систем.

Пособие может быть рекомендовано при изучении смежных дисциплин в области промышленной автоматики, робототехники, приборостроения, электротехники и радиоэлектроники.

Книга может быть полезна не только студентам и аспирантам, но и специалистам, так как она соответствует современному уровню развития техники.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

☎ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 (495) 234-0110; ☎ +7 (495) 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru