УДК 621.382.323

**ОБОБЩЕНИЕ КОМПАКТНОЙ МОДЕЛИ MOSFET LEVEL 1 ПРИ НЕНУЛЕВОЙ**

**ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТИ В РЕЖИМЕ НАСЫЩЕНИЯ НА**

**СЛУЧАЙ НЕНУЛЕВЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ИСТОКА И СТОКА**

**1Турин В. О., 2Зебрев Г. И., 3Макаров С.В., 4Инигез Б., 5Шур М.С.**

1*Россия, г. Орёл, Госуниверситет-УНПК*

2*Россия, г. Москва, НИЯУ «МИФИ»*

3*Россия, г. Москва, Зеленоград, ООО «Интегральные Решения»*

4*Испания, г. Тарагона, УниверситетРовира и Вирджинии*

5*США, г. Трой, Нью-Йорк, Ренсселаеровский политехнический институт*

*Получено уравнение для асимптотического поведения тока стока МОП-транзистора в режиме насыщения с учётом ненулевой дифференциальной проводимостидля случая с аналитическим учётом сопротивлений истока и стока. Разработана итерационная процедура его решения. Это уравнение, линеаризацией выражения для тока насыщения, преобразовано в квадратное уравнение, решение которого позволяет построить компактную модель, являющуюся обобщением модели MOSFETLevel 1.*

*Ключевые слова: МОП-транзистор, компактная модель, дифференциальная проводимость в режиме насыщения, сопротивление истока и стока.*

*Weobtained an equation for the drain current asymptote for the MOSFET in the saturation regime with account of a non-zero differential conductivity for the case with an analytical account of the source and drainresistances.To solve this equation we developed an iteration procedure. This equation, by the linearization of the expressions for the saturation current, is transformed into a quadratic equation, the solution of which allowsus to build a compact model that is a generalization of the MOSFET Level 1 model.*

*Key words: MOSFET, compact model, differential conductivity in saturation regime, source and drain resistances.*

Модель MOSFET Level 1, несмотря на свои недостатки, устранённые в улучшенной модели [1], [2], очень проста, сохраняет практическое и методическое значение и доступна во всех современных электронных САПР. На основе этой модели построена RPI TFTмодель. Соответственно, обобщение этой модели на «внешней» случай (с аналитическим учётом сопротивлений истока *RS* и стока *RD*) актуально. Кроме того, мы отрабатываем методику для обобщения улучшенной модели [1], [2] на «внешний» случай.

Используемые обозначения: - напряжение затвор-исток; - напряжение сток-исток; - пороговое напряжение; - центрированное напряжение на затворе; *RT*=*RS* + *RD* - суммарное сопротивление истока и стока; - ширина затвора; - толщина подзатворного окисла; - относительная диэлектрическая проницаемость подзатворного окисла; -электрическая постоянная; - безразмерный параметр, связанный со значением напряжения на подложке транзистора; - скорость насыщения дрейфовой скорости; *µ* - подвижность.

Напряжённость электрического поля и характерное напряжение, связанные с эффектом насыщения дрейфовой скорости:

,.

Удельная крутизна МОП-транзистора:

, .

Зависимость тока стока от малых напряжений на стоке:

.

Уравнения для тока насыщения [3]:

*.*

Если дифференциальная проводимость в режиме насыщения равна нулю, то крутизна в режиме насыщения определяется уравнением:

.

Асимптота для тока стока при ненулевой дифференциальная проводимость в режиме насыщения определяется уравнением:

.

Для тока стока используется аппроксимация:

.

Для обобщения этого уравнения на «внешний» случай необходимо преобразовать во «внешний» случай уравнения для *IL*, *IA*и *ISAT* и подставить их в это уравнение. Для этого надо использовать уравнения, связывающие «внутреннее» и «внешнее» напряжения на контактах транзистора:

,.

Для линейного режима легко получить уравнение:

.

Это уравнение является квадратным относительно *Il* и его решение известно и имеет вид:

.

Для тока насыщения при нулевом значении параметра *λ* получаем уравнение:

.

Это уравнение является квадратным относительно *Isat*, и его решение известно и имеет вид:

.

Для асимптоты тока стока в режиме насыщения получаем уравнение:

.

Это уравнение не решается легко аналитически, но его можно решать численным методом. Мы разработали итерационный метод решения этого уравнения, переписав его так:

.

На основе этого уравнения можно реализовать итерационную процедуру:

.

Для первой итерации в правую часть уравнения можно подставить:

.

Такой пересчёт асимптоты для тока стока в режиме насыщения во «внешний» случай может потребовать большого количества итераций, что нежелательно при компактном моделировании. Соответственно, вместо вычисления тока стока методом итераций, можно свести уравнение для *Ia* к квадратному уравнению, линеаризовав уравнение для *ISAT*. Решение соответствующего квадратного уравнения и является основой обобщения модели MOSFET Level 1 на «внешний» случай.

За приближённое значение для *Ia* возьмём значение *Ia, j* , полученное на *j*-ой итерации. Соответственно *Ia* можно представить в виде:

.

Заметим, что наши расчёты показывают, что хорошая точность получается даже при *j =* 0:

.

Для центрированного напряжения на затворе получаем:

,

где

, .

Линеаризуем уравнение для :

.

Соответственно, для *Ia* получаем приближенное уравнение:

или

.

Это уравнение преобразуется кквадратному уравнению с коэффициентами

;

;

.

Итоговое уравнение для тока стока получается после подстановки *Il*, *Ia* и *Isat* в уравнение:

.

Работа выполнена при поддержке Госуниверситета-УНПК в рамках реализации проектной части государственного задания в сфере научной деятельности 16.1117.2014/К, гранта РФФИ и Администрации Орловской области № 12.02-97534, а также Программы развития нанотехнологий университета [4].

Список литературы

1. Intrinsic compact MOSFET model with correct account of positive differential conductance after saturation. / Turin V.O., Sedov A.V., Zebrev G.I [и др.]. Proc. SPIE 7521. 2009, 75211H: с. 1-9.

2. The correct account of nonzero differential conductance in the saturation regime in the MOSFET compact model. / Turin V.O., Zebrev G.I., Makarov S.V. [и др.]. - International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields. 2014, 27: с. 863-874.

3. Shur, M.S. Physics of Semiconductor Devices [Текст] / M.S. Shur.-Prentice Hall, New. Jersey, 1990.

4. Степанов, Ю.С. Научно-образовательный центр нанотехнологий в структуре учебно-научно-производственного университетского комплекса /Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, Е.Ю. Степанова //Наноинженерия. - № 5. – 2012. – С. 3-6.

**Турин Валентин Олегович**, канд. физ.-мат. наук, заведующий кафедрой «Физика», Госуниверситет-УНПК, Наугорское шоссе 29, г. Орёл, 302020, Россия. E-mail: [voturin@ostu.ru](mailto:voturin@ostu.ru)

**Зебрев Геннадий Иванович**, д-р техн. наук, профессор кафедры микро- и наноэлектроники, НИЯУ «МИФИ», Каширское шоссе 31, г. Москва, 115409, Россия. E-mail: [gizebrev@mephi.ru](mailto:gizebrev@mephi.ru)

**Макаров Сергей Викторович**, канд. техн. наук, генеральный директор, ООО «Интегральные Решения», Георгиевский проспект (проезд 4806), дом 4, строение 1, Зеленоград, г. Москва, Россия. E-mail: makarov@is-eda.ru

**Инигез Бенжамин**, профессор, Университет Ровира и Вирджинии, г. Тарагона, Испания. E-mail:benjamin.iniguez@urv.cat

**Шур Михаил Саулович**, профессор, Ренсселаеровский политехнический институт, г. Трой, Нью-Йорк, США. E-mail:shurm@rpi.edu