

Моделирование параметров МОП-транзисторов в широком температурном диапазоне

А.М. Пилипенко, В.Н. Бирюков

Введение

В настоящее время для реализации избирательных усилителей в системах на кристалле широко используются МОП-транзисторы, которые позволяют расширить диапазон рабочих частот усилителей и существенно упростить согласование их звеньев [1]. Для улучшения основных характеристик МОП-транзисторов и повышения их надежности усилительные устройства часто работают при низких (криогенных) температурах. Охлаждение устройства позволяет увеличить крутизну МОП-транзистора и уменьшить собственные шумы [2]. Последнее особенно важно для малошумящих усилителей, которые используются в радиоприемных устройствах оптического и инфракрасного диапазона на астрономических спутниках, радиотелескопах и космических обсерваториях [3, 4]. Охлаждение до температур меньше 100 К может быть достигнуто при помещении усилителя в криогенные жидкости, полученные при ожижении газов (кислорода, азота, неона, водорода или гелия) [5].

Основными достоинствами МОП-транзисторов перед другими типами транзисторов являются наиболее развитая технология серийного производства, широкое коммерческое использование и низкая стоимость. К недостаткам МОП-транзисторов можно отнести аномальное поведение вольт-амперных характеристик (ВАХ) *n*-канальных МОП-транзисторов («гистерезис» и «kink-эффект»), которое наблюдается при температурах ниже 40 К [4].

Аналитические выражения для температурных зависимостей параметров МОП-транзисторов известны только для комнатных и высоких температур (290 ... 420 К) [6, 7]. Для низких температур разработан ряд моделей, позволяющих описать статические и дифференциальные

характеристики МОП-транзисторов [8, 9]. Целью настоящей работы является измерение и аппроксимация температурных зависимостей основных параметров моделей p -канальных МОП-транзисторов в широком диапазоне температур – от криогенных до комнатных (20 ... 300 К). Указанные зависимости предназначены для моделирования температурных режимов усилителей на МОП-транзисторах в электронных симуляторах *SPICE*-типа. Решение данной задачи позволит прогнозировать время работоспособности устройства при изменении температуры в случаях аварийных или внештатных ситуаций, а также оптимизировать выбора хладагента и повысить надежность усилителя в условиях криогенных температур.

Описание МОП-транзисторов и их модели

В данной работе проведено измерение параметров моделей для ряда температур и получены зависимости параметров от температуры для двух тестовых образцов p -канальных МОП-транзисторов с поликремниевым затвором. Первый транзистор с размерами $W \approx 50$ мкм и $L \approx 50$ мкм ($W/L = 50/50$), где W и L – ширина и длина канала соответственно был изготовлен специально для целей измерения параметров. Второй транзистор с размерами $W \approx 10$ мкм и $L \approx 6$ мкм ($W/L = 10/6$) соответствовал транзисторам усилительного устройства. Выбор сравнительно большой длины канала объясняется необходимостью снижения собственных шумов транзисторов.

В работе [9] показано, что для достаточно точного описания статических ВАХ МОП-транзистора при низких температурах можно использовать компактную пятипараметрическую модель, которая имеет следующий вид

$$I = \beta(2V_G - V_{DE}) V_{DE} \frac{1 + \lambda V_{DL}}{1 + \kappa V_{DE}} \cdot \frac{1}{1 + \theta V_G} \quad (1)$$

где I – ток стока; V_{GS} , V_{DS} – напряжения затвор-исток и сток-исток соответственно; $V_G = V_{GS} - V_{T0}$ – напряжение отсечки; $V_S = (\sqrt{1 + 2\kappa V_G} - 1)/\kappa$ –

напряжение насыщения; $V_{DE} = 0,5 \left[V_{DS} - \sqrt{V_{\varepsilon 0}^2 + (V_{DS} - V_S)^2} + \sqrt{V_{\varepsilon 0}^2 + V_S^2} \right]$;
 $V_{DL} = 0,5 \left[V_{DS} + \sqrt{V_{\varepsilon 1}^2 + (V_{DS} - 0,9V_S)^2} - \sqrt{V_{\varepsilon 1}^2 + (0,9V_S)^2} \right]$; $V_{\varepsilon 0} = 10$ мВ и
 $V_{\varepsilon 1} = 10V_{\varepsilon 0}$ – формальные константы; β , V_{T0} , λ , κ , θ – параметры модели.

Все параметры модели (1) являются физическими: β – удельная крутизна; V_{T0} – пороговое напряжение; λ – коэффициент модуляции длины канала напряжением стока; κ – параметр, учитывающий снижение подвижности носителей заряда в продольном электрическом поле канала; θ – параметр учитывающий влияние поперечного поля на подвижность носителей заряда. Следует отметить, что для повышения точности моделирования ВАХ, вместо модели (1) можно использовать таблично-аналитическую модель, описанную в работе [10] и имеющую те же физические параметры.

Методика измерения параметров модели

Основными параметрами модели МОП-транзистора являются удельная крутизна, пороговое напряжение и коэффициент модуляции длины канала – β , V_{T0} и λ [9]. Параметры, учитывающие зависимость подвижности носителей заряда от величины поперечной и продольной составляющих электрического поля существенно влияют на точность модели, но являются плохо обусловленными (их величина наиболее сильно зависит от выбранной для измерения области ВАХ и числа измерений) [11]. Классификация параметров необходима для организации их измерений. Если все параметры определять одновременно, то оптимизация целевой функции в методе наименьших квадратов при различных температурах приводит к значительному хаотическому изменению параметров. Для повышения обусловленности параметрической идентификации вспомогательные параметры определялись приближенно на образцах транзисторов с размерами $W \approx 50$ мкм и $L \approx 50$ мкм и далее считались заданными. Падение точности моделирования оказывается

при этом несущественным, а процедура численной оптимизации значительно упрощается за счет снижения размерности задачи.

Численные эксперименты показали, что для получения наибольшей точности моделирования ВАХ исследуемых в данной работе МОП-транзисторов следует положить $\kappa = 0,02 \text{ В}^{-1}$, $\theta = 0,1 \text{ В}^{-1}$. В качестве целевой функции использовалась сумма квадратов относительных погрешностей моделирования тока

$$S = \sum_{k=1}^N \left[\frac{I(V_{GS,k}, V_{DS,k}) - I_k}{I_k} \right]^2,$$

где $\{I_k, V_{GS,k}, V_{DS,k}\}$, $k = 1, 2, \dots, N$ – экспериментальная ВАХ МОП-транзистора в табличной форме, N – количество точек ВАХ.

Следует отметить, что параметр λ определяет наклон пологого участка выходных ВАХ и не имеет физического смысла на крутом участке, поэтому для его идентификации использовались только те точки экспериментальной ВАХ, которые лежат на пологом участке. При $W/L = 50/50$ значение λ оказалось значительно меньше единицы ($\lambda \approx 10^{-4} \dots 10^{-3} \text{ В}^{-1}$), поэтому зависимость $\lambda(T)$ в этом случае достоверно измерить не удалось. При $W/L = 10/6$, как показано ниже, значение λ значительно больше, чем 10^{-3} В^{-1} и зависит от температуры.

ВАХ исследуемых МОП-транзисторов измерялись при пяти температурах – 20, 40, 80, 160 и 300 К. На рис. 1 приведены экспериментальные (прямоугольники) и расчетные (линии) ВАХ МОП-транзистора с размерами $W \approx 50 \text{ мкм}$ и $L \approx 50 \text{ мкм}$ при температурах 20 и 300 К, а на рис. 2 приведены аналогичные ВАХ МОП-транзистора с размерами $W \approx 10 \text{ мкм}$ и $L \approx 6 \text{ мкм}$. Во всех случаях определялись среднеквадратические погрешности моделирования ВАХ $\sigma = \sqrt{S/N}$: при $W/L = 50/50$ – $\sigma < 0,5 \%$, при $W/L = 10/6$ – $\sigma < 3,2 \%$.

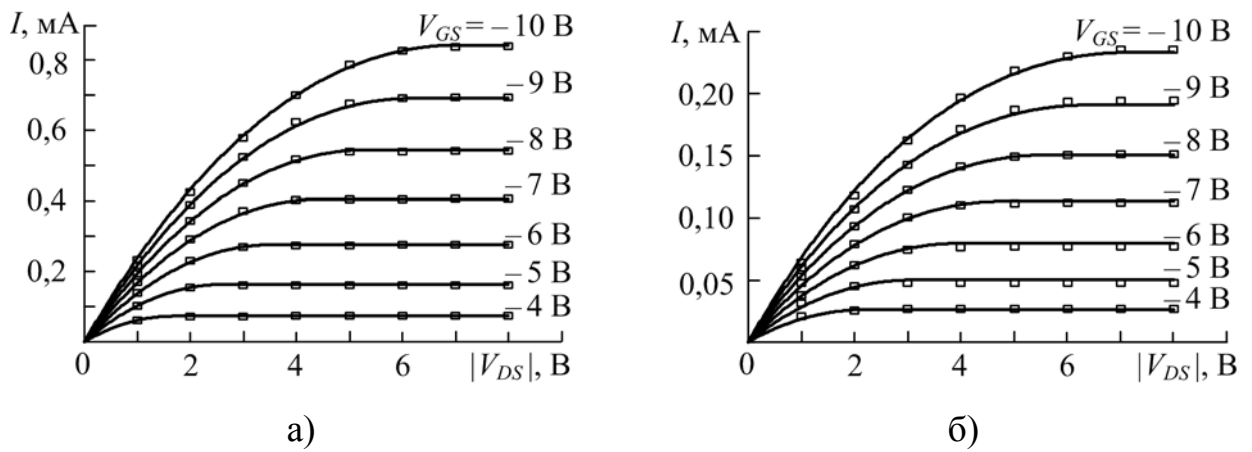


Рис. 1. – Расчетные и экспериментальные ВАХ МОП-транзистора с размерами $W \approx 50$ мкм и $L \approx 50$ мкм при $T = 20$ К (а) и 300 К (б)

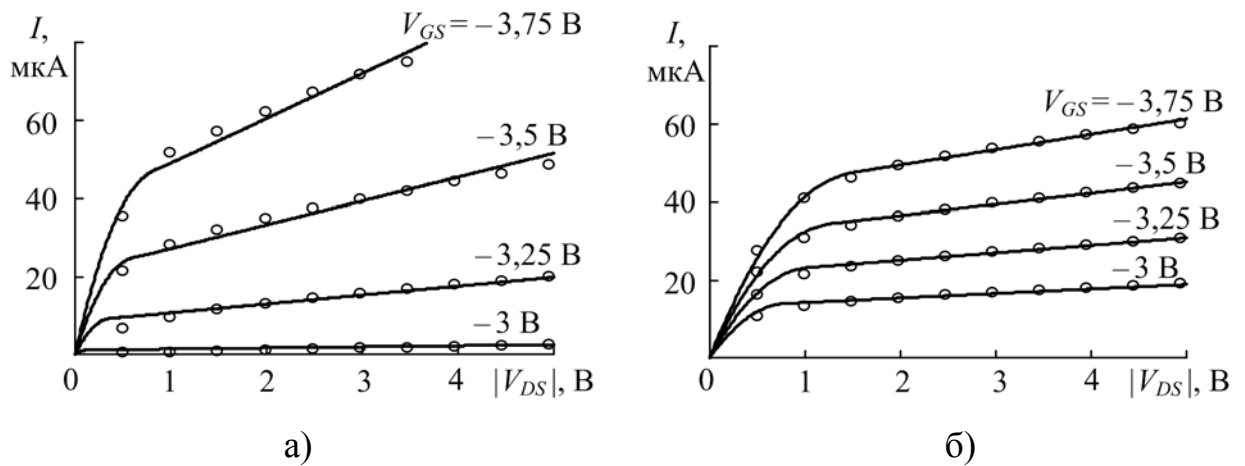


Рис. 2. – Расчетные и экспериментальные ВАХ МОП-транзистора с размерами $W \approx 10$ мкм и $L \approx 6$ мкм при $T = 20$ К (а) и 300 К (б)

Аппроксимация температурных зависимостей параметров модели

Температурные зависимости параметров моделей аппроксимируются или физически или формально. Разработка физической температурной модели крайне трудоемка и такая модель требует постоянной проверки и корректировки при изменении технологического процесса изготовления транзисторов. Формальная аппроксимация максимально оперативна и максимально достоверна. В настоящей работе использована аппроксимация зависимостей основных параметров модели МОП-транзистора от температуры дробно-рациональной функцией

$$y(T) = \frac{a + b \cdot T + c \cdot T^2}{1 + d \cdot T}, \quad (2)$$

где a, b, c, d – параметры аппроксимации.

Относительная погрешность аппроксимации при температуре T_i имеет вид

$$\delta_i = \left| \frac{y(T_i) - y_i}{y_i} \right|, \quad (3)$$

где $y(T_i)$ – значение параметра МОП-транзистора, полученное с помощью функции (2); y_i – измеренное значение параметра МОП-транзистора при температуре T_i .

Вид аппроксимирующей функции выбран таким образом, чтобы при использовании метода наименьших квадратов задача параметрической оптимизации всегда имела единственное решение, – три из четырех параметров входят в выражение (2) линейно, то есть задача численного спуска сводится к одномерной (аналогичный прием использован в [11]). На рис. 3 представлены измеренные зависимости параметров МОП-транзисторов от температуры и функции, аппроксимирующие эти зависимости (сплошные линии), кривая 1 соответствует $W/L = 10/6$, кривая 2 – $W/L = 50/50$.

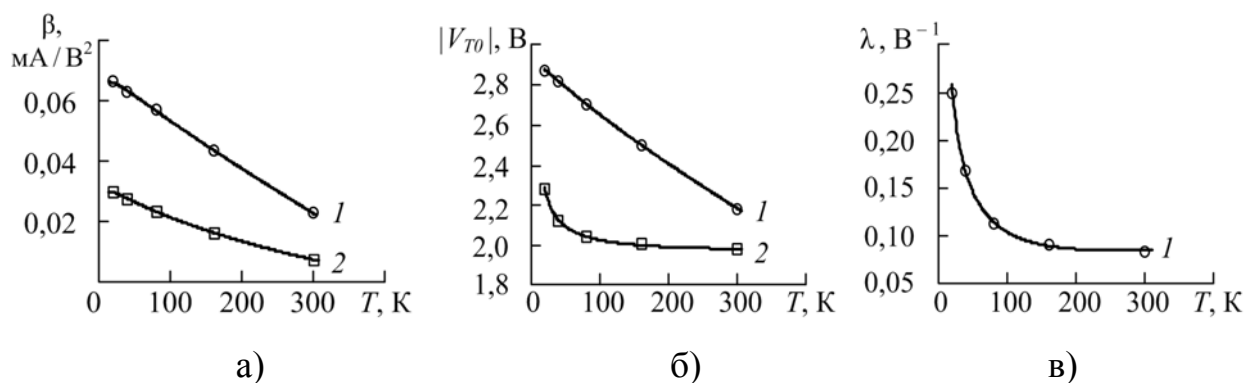


Рис. 3. – Зависимости параметров β , $|V_{T0}|$ и λ от температуры при $W/L = 10/6$ (кривая 1) и $W/L = 50/50$ (кривая 2)

В рассмотренных выше примерах задача оптимизации оказалась очень хорошо обусловленной, что позволило получить параметры аппроксимации не только в среднеквадратическом, но и в равномерном приближении. Такой подход позволяет минимизировать максимальную относительную погрешность аппроксимации и одновременно получить ее апостериорную оценку. На рис. 4 показаны вычисленные по формуле (3) зависимости от температуры относительных погрешностей аппроксимации параметров МОП-транзистора с размерами $W \approx 10$ мкм и $L \approx 6$ мкм, кривая 1 соответствует параметру β , кривая 2 – $|V_{T0}|$, кривая 3 – λ .

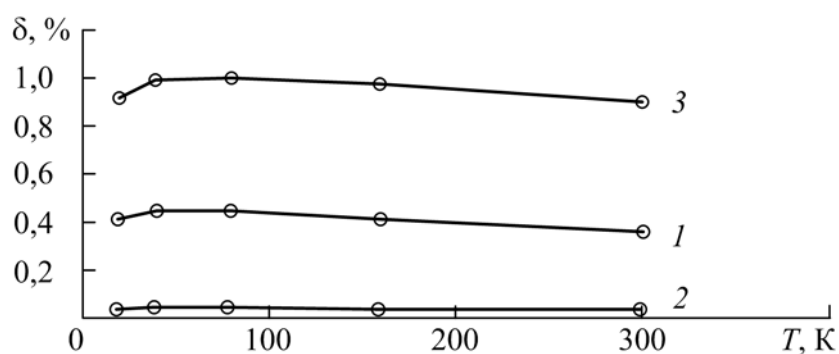


Рис. 4. – Зависимости от температуры относительных погрешностей аппроксимации параметров β (кривая 1), $|V_{T0}|$ (кривая 2) и λ (кривая 3)

Из результатов, приведенных на рис. 4 следует, что максимальная относительная погрешность аппроксимации температурных зависимостей параметров МОП-транзистора с помощью формальной модели (2) не превышает 1 %. Погрешность аппроксимации не растет на краях интервала наблюдения, что позволяет при необходимости увеличить его без замены аппроксимирующей функции.

Выводы

В работе получены экспериментальные зависимости основных параметров МОП-транзистора от температуры в широком диапазоне температур – от 20 до 300 К. Предложена модель в виде дробно-рациональной функции, позволяющая с высокой точностью

аппроксимировать все измеренные температурные зависимости. При использовании предложенной аппроксимирующей функции ошибка определения параметров МОП-транзистора может быть получена существенно меньше разброса параметров в технологическом процессе.

Работа выполнена при поддержке стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования по приоритетным направлениям модернизации российской экономики (СП-398.2012.5).

Литература:

1. Жебрун Е.А., Миляева С.И., Прокопенко Н.Н. Высокочастотные избирательные усилители и полосовые фильтры на КМОП транзисторах SiGe техпроцесса [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона, 2012, № 3. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/1033> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

2. Бирюков В.Н., Пономарев А.М., Ципис Н.Л. Исследование вольтамперных и шумовых характеристик полевых транзисторов с изолированным затвором при низких температурах // Известия вузов МВ и ССО СССР. Радиоэлектроника, 1986, Т. 29, № 11. – С. 92-94

3. Fanson J. L., Fazio G. G., Houck J. R., Kelly T., Rieke G. H., Tenerelli D. J., Whitten T. Space infrared telescope facility (SIRTF) // Proceedings of SPIE, 1998, V. 3354. – P. 57-65.

4. Nagata H., Shibai H., Hirao T., Watabe T., Noda M., Hibi Y., Kawada M., Nakagawa T. Cryogenic Capacitive Transimpedance Amplifier for Astronomical Infrared Detectors // IEEE Transactions on Electron Devices, 2004, V. 51, N. 2. – P. 270-278.

5. Алфеев В.Н. Полупроводники, сверхпроводники и параэлектрики в криоэлектронике: свойства и применение в криоэлектронных интегральных схемах и приборах структур на основе контактов полупроводников, сверхпроводников и параэлектриков [Текст]. – М.: Сов. радио, 1979. – 408 с.

6. Cheng Y., Imai K., Jeng M., Liu Z., Kai C., Hu C. Modelling temperature effects of quarter micrometre MOSFETs in BSIM3v3 for circuit simulation // Semiconductor Science and Technology, 1997, V. 12, No. 11. – P. 1349-1354.

7. HSPICE® Reference Manual: MOSFET Models. Version D-2010.12 – Synopsys, Inc., 2010. – 768 p.

8. Kan J., Weifeng S., Longxing S. A sub-circuit MOSFET model with a wide temperature range including cryogenic temperature // Journal of Semiconductors, V. 32, N. 6. – Available at: <http://dx.doi.org/10.1088/1674-4926/32/6/064002>.

9. Пилипенко А.М. Бирюков В.Н. Исследование параметров полевых транзисторов с изолированным затвором при низких температурах [Текст] // Успехи современной радиоэлектроники, 2011, № 9. – С. 66-70.

10. Бирюков В.Н., Пилипенко А.М., Семерник И.В. Таблично-аналитическая модель полевого транзистора для криогенных температур [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона, 2012, № 4, Ч. 2. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1402> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

11. Бирюков В.Н. Оценка точности определения параметров моделей полевого транзистора [Текст] // Известия вузов. Электроника, 2010, № 5. – С. 39-44.