

Применение гибридной аналитической модели для аппроксимации вольт-амперных характеристик МОП-транзисторов в широком диапазоне температур

08, август 2014

DOI: [10.7463/0814.0720709](https://doi.org/10.7463/0814.0720709)

Пилипенко А. М.^{1,a}

УДК 621.382.323+519.677

¹Россия, Россия, Южный федеральный университет

^aampilipenko@sfedu.ru

Рассмотрена возможность применения гибридной аналитической модели для аппроксимации вольт-амперных характеристик МОП-транзисторов в широком диапазоне температур – от криогенных до комнатных (20 ... 300 К). Гибридная аналитическая модель является компактной и предназначена для МОП-транзисторов, использующихся в малошумящих усилителях радиоприемных устройств оптического и инфракрасного диапазонов. Показано, что гибридная аналитическая модель, содержащая наряду с физическими параметрами дополнительные формальные параметры, позволяет аппроксимировать экспериментальные вольт-амперные характеристики МОП-транзисторов с относительной среднеквадратической погрешностью менее 0,1 % независимо от температуры, при которой проводились измерения.

Ключевые слова: МОП-транзистор, криогенные температуры, аппроксимация, вольт-амперная характеристика, идентификация параметров

Введение

Полевые транзисторы с изолированным затвором, имеющие структуру металл-оксид-полупроводник (МОП), в настоящее время широко используются в качестве элементной базы современных радиоэлектронных устройств. Преимущества МОП-транзисторов перед другими типами транзисторов следующие [1]: 1) наиболее развитая технология серийного производства; 2) широкое коммерческое использование; 3) низкая стоимость, как с точки зрения разработки, так и массового производства.

В данной работе рассматриваются проблемы моделирования МОП-транзисторов, предназначенных для работы в качестве активных элементов малошумящих усилителей, которые, в свою очередь, используются в радиоприемных устройствах оптического и инфракрасного диапазонов на астрономических спутниках, радиотелескопах и космических обсерваториях [2, 3]. Малошумящие усилители применяются как при температурах близких к комнатным ($T \approx 300\text{К}$), так и при низких (криогенных) температурах ($T < 12\text{К}$), поскольку охлаждение устройства позволяет увеличить его коэффициент усиления и

уменьшить собственные шумы. В связи с этим при проектировании усилителя возникает проблема описания модели МОП-транзистора в широком диапазоне температур, включая криогенные.

В настоящее время разработано большое количество статических моделей, аппроксимирующих вольт-амперные характеристики (ВАХ) МОП-транзисторов. Непрерывное развитие моделей электронных компонентов обусловлено совершенствованием технологии их производства и связанным с этим уменьшением размеров компонентов. С другой стороны, МОП-транзисторы, предназначенные для малошумящих усилителей, работающих при низких температурах, имеют достаточно большие размеры канала (1 ... 20 мкм) [3], поэтому применение для таких транзисторов современных моделей не гарантирует высокую точность моделирования [4]. Кроме того, модель достаточно точно аппроксимирующая ВАХ МОП-транзистора при комнатных температурах не может также точно воспроизводить его свойства при низких температурах [5].

Целью данной работы является доказательство эффективности применения компактной гибридной модели (содержащей как физические, так и формальные параметры) для аппроксимации ВАХ МОП-транзисторов в широком диапазоне температур – от криогенных до комнатных (20 ... 300 К).

1. Описание гибридной аналитической модели МОП-транзистора

Современные аналитические модели МОП-транзисторов получают, как правило, за счет введения новых элементов в их схемы замещения [5], что порождает сложную проблему идентификации параметров, поскольку при этом модель описывается системой нелинейных уравнений, т. е. перестает быть компактной. При использовании табличных моделей ВАХ аппроксимируется формально – с помощью сплайнов [6], которые не содержат физических параметров транзистора. Описанная ниже гибридная модель позволяет найти компромисс между требованиями физичности, точности, сложности и возможности точного и быстрого определения параметров и при этом является аналитической и компактной.

Один из вариантов гибридной модели был сформулирован в работе [7], где ВАХ МОП-транзистора (зависимость тока стока I от напряжений сток-исток V_{DS} и затвор-исток V_{GS}) предложено аппроксимировать следующей функцией

$$I_n(V_{DS}, V_{GS}) = I_0(V_{DS}, V_{GS}) \cdot K_n(V_{DS}, V_{GS}), \quad (1)$$

где $I_0(V_{DS}, V_{GS})$ – четырехпараметрическая аналитическая модель МОП-транзистора [7]; $K_n(V_{DS}, V_{GS})$ – поправочная функция в виде двумерного степенного полинома n -го порядка.

Из работы [7] следует, что гибридная модель (1) позволяет повысить точность аппроксимации ВАХ МОП-транзистора, измеренной при температуре кипения гелия ($T \approx 4,2\text{K}$), в несколько раз по сравнению с четырехпараметрической аналитической моделью. Следует отметить, что модели аналогичные (1) также применялись для аппрокси-

мации ВАХ полупроводниковых диодов в работе [8], но при этом в качестве поправочной функции использовался одномерный быстросходящийся степенной ряд.

В настоящей работе для построения гибридной аналитической модели в качестве функции $I_0(V_{DS}, V_{GS})$ предлагается использовать компактную пятипараметрическую модель МОП-транзистора, описанную в работе [9]:

$$I_0(V_{DS}, V_{GS}) = \beta(2V_G - V_{DE}) V_{DE} \frac{1 + \lambda V_{DL}}{1 + \kappa V_{DE}} \cdot \frac{1}{1 + \theta V_G}, \quad (2)$$

где $V_{GS} = V_{GS} - V_{T0}$ – напряжение отсечки; β , V_{T0} , λ , κ , θ – физические параметры модели;

$$V_{DE} = 0,5 \left[V_{DS} - \sqrt{V_{\varepsilon 0}^2 + (V_{DS} - V_S)^2} + \sqrt{V_{\varepsilon 0}^2 + V_S^2} \right]; V_{DL} = 0,5 \left[V_{DS} + \sqrt{V_{\varepsilon 1}^2 + (V_{DS} - 0,9V_S)^2} - \sqrt{V_{\varepsilon 1}^2 + (0,9V_S)^2} \right];$$

$V_S = (\sqrt{1 + 2\kappa V_G} - 1)/\kappa$ – напряжение насыщения; $V_{\varepsilon 0} = 10 \text{ мВ}$ – формальная константа, определяющая протяженность промежуточного участка ВАХ между линейной областью и областью насыщения; $V_{\varepsilon 1} = 10V_{\varepsilon 0}$ – формальная константа, служащая для компенсации погрешности используемого приближенного выражения для напряжения насыщения V_S .

Параметры модели (2) имеют следующий физический смысл: β – удельная крутизна проходной характеристик МОП-транзистора; V_{T0} – пороговое напряжение; λ – коэффициент модуляции длины канала напряжением сток-исток, пропорциональный выходной проводимости МОП-транзистора в области насыщения; κ – коэффициент насыщения поля, учитывающий снижение подвижности носителей заряда в продольном электрическом поле канала; θ – коэффициент модуляции подвижности носителей, учитывающий влияние поперечного поля на носителей заряда.

С учетом выражений (1) и (2) гибридную модель МОП-транзистора можно представить в виде

$$I_n(V_{DS}, V_{GS}) = \beta(2V_G - V_{DE}) V_{DE} \frac{1 + \lambda V_{DL}}{1 + \kappa V_{DE}} \cdot \frac{K_n(V_{DS}, V_{GS})}{1 + \theta V_G}. \quad (3)$$

Как было указано выше, поправочная функция $K_n(V_{DS}, V_{GS})$ представляет собой двумерный степенной полином. В качестве примера ниже приведены поправочные функции в виде двумерных степенных полиномов второго и третьего порядка соответственно

$$K_2(V_{DS}, V_{GS}) = a_{00} + a_{10}V_{DS} + a_{01}V_{GS} + a_{20}V_{DS}^2 + a_{02}V_{GS}^2 + a_{11}V_{DS}V_{GS}; \quad (4)$$

$$K_3(V_{DS}, V_{GS}) = a_{00} + a_{10}V_{DS} + a_{01}V_{GS} + a_{20}V_{DS}^2 + a_{02}V_{GS}^2 + a_{11}V_{DS}V_{GS} + a_{30}V_{DS}^3 + a_{03}V_{GS}^3 + a_{21}V_{DS}^2V_{GS} + a_{12}V_{DS}V_{GS}^2, \quad (5)$$

где a_{00} , a_{10} , a_{01} , a_{20} , a_{02} , a_{11} , ... – коэффициенты поправочной функции.

2. Алгоритм идентификации параметров гибридной модели

Решение задачи аппроксимации экспериментальной ВАХ заключается в идентификации параметров выбранной модели МОП-транзистора. В данной работе рассматриваются ВАХ двух тестовых образцов p -канальных МОП-транзисторов с поликремниевым за-

твором измеренные для ряда температур (20, 40, 80, 160 и 300 К). Применение p -канальных МОП-транзисторов в малошумящих усилителях при низких температурах более предпочтительно, чем применение n -канальных, поскольку у последних при температурах ниже 40 К наблюдается аномальное поведение ВАХ («гистерезис» и «kink-эффект») [4].

Первый тестовый транзистор с размерами $W \approx 50 \mu\text{м}$ и $L \approx 50 \mu\text{м}$, где W и L – ширина и длина канала соответственно был изготовлен специально для целей измерения параметров. Второй тестовый транзистор с размерами $W \approx 10 \mu\text{м}$ и $L \approx 6 \mu\text{м}$ соответствовал транзисторам усилительного устройства. Выбор сравнительно большой длины канала объясняется необходимостью снижения собственных шумов транзисторов.

Из выражений (3) – (5) следует, что гибридная аналитическая модель МОП-транзистора содержит как физические параметры (β , V_{T0} , λ , κ , θ), так и формальные параметры (коэффициенты поправочной функции). Исходя из этого, идентификация параметров гибридной аналитической модели проводилась в два этапа.

На первом этапе определяются физические параметры из условия минимума целевой функции в виде суммы квадратов относительных погрешностей моделирования тока стока

$$S_0(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^N \left[\frac{I_0(V_{DS,k}, V_{GS,k}) - I_k}{I_k} \right]^2, \quad (6)$$

где $\mathbf{x} = \{\beta, V_{T0}, \lambda, \kappa, \theta\}$ – вектор физических параметров; $\{I_k, V_{GS,k}, V_{DS,k}\}$, $k = 1, 2, \dots, N$ – экспериментальная ВАХ МОП-транзистора в табличной форме, N – количество точек ВАХ.

Алгоритм минимизации целевой функции (6) подробно описан в работе [9] и заключается в раздельной идентификации основных (β , V_{T0} , λ) и вспомогательных (κ , θ) физических параметров. Вначале приближенно определяются вспомогательные параметры κ и θ на образцах транзисторов с размерами $W \approx 50 \mu\text{м}$ и $L \approx 50 \mu\text{м}$ и далее κ и θ считаются заданными. Затем при заданных κ и θ определяются основные параметры β , V_{T0} и λ . При этом процедура численной минимизации значительно упрощается за счет снижения размерности задачи, а падение точности моделирования оказывается несущественным.

На втором этапе определяются коэффициенты поправочной функции из условия минимума целевой функции аналогичной (6), но отличающейся от нее выражением для модели ВАХ:

$$S_n(\mathbf{a}) = \sum_{k=1}^N \left[\frac{I_n(V_{DS,k}, V_{GS,k}) - I_k}{I_k} \right]^2, \quad (7)$$

где $\mathbf{a} = \{a_{00}, a_{10}, a_{01}, \dots\}$ – вектор коэффициентов поправочной функции.

Минимизация целевой функции (7) осуществляется при найденных на первом этапе физических параметрах. Благодаря этому коэффициенты поправочной функции можно определить из системы линейных алгебраических уравнений, которую нетрудно получить исходя из необходимых условий минимума целевой функции (7):

$$\partial S_n / \partial a_{00} = 0, \partial S_n / \partial a_{10} = 0, \partial S_n / \partial a_{01} = 0, \dots \quad (8)$$

3. Результаты моделирования МОП-транзисторов

Для доказательства эффективности гибридной модели (3) была проведена аппроксимация ВАХ описанных выше тестовых МОП-транзисторов с помощью этой модели (3), а также с помощью исходной аналитической модели (2). В качестве критерия эффективности моделей в данной работе рассматривалась точность моделирования ВАХ, которую можно оценить с помощью относительных среднеквадратических погрешностей аппроксимации ВАХ

$$\sigma_0 = \sqrt{S_0(\mathbf{x}^*)} / N; \quad (9)$$

$$\sigma_n = \sqrt{S_n(\mathbf{a}^*)} / N, \quad (10)$$

где $\mathbf{x}^*$ и $\mathbf{a}^*$ – векторы параметров моделей (2) и (3), соответствующие минимумам целевых функций (6) и (7).

В табл. 1 приведены результаты моделирования тестового МОП-транзистора с размерами $W \approx 10 \mu\text{м}$ и $L \approx 6 \mu\text{м}$. На рис. 1 показаны зависимости относительных среднеквадратических погрешностей аппроксимации ВАХ того же транзистора от порядка поправочной функции ($n=0$ соответствует аналитической модели (2), $n \geq 1$ – гибридной модели (3)). Отметим, что значения коэффициентов поправочной функции $a_{ij} \ll 1$.

Таблица 1. Параметры и погрешности моделей МОП-транзистора с размерами $W \approx 10 \mu\text{м}$ и $L \approx 6 \mu\text{м}$

$T, \text{ К}$	20	40	80	160	300
$\beta, \text{ мкА/В}^2$	68,75	65,00	56,88	43,51	22,86
$V_{T0}, \text{ В}$	-2,870	-2,811	-2,702	-2,499	-2,184
$\lambda, \text{ В}^{-1}$	0,2477	0,1670	0,1130	0,0905	0,0839
$\kappa, \text{ В}^{-1}$	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
$\theta, \text{ В}^{-1}$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
$\sigma_0, \%$	3,188	1,918	1,081	0,755	0,453
$\sigma_2, \%$	1,091	0,623	0,300	0,265	0,311
$\sigma_4, \%$	0,224	0,154	0,133	0,140	0,149
$\sigma_6, \%$	0,051	0,062	0,056	0,062	0,068

Из табл. 1 и рис. 1 очевидно, что при увеличении порядка поправочной функции, точность гибридной модели возрастает, причем, чем меньше точность исходной аналитической модели, тем больше выигрыш от применения поправочной функции. Например, при $T = 20 \text{ К}$ среднеквадратическая погрешность аппроксимации ВАХ для исходной модели (2) $\sigma_0 \approx 3,2 \%$, а при использовании гибридной модели с поправочной функцией шестого порядка аналогичная погрешность уменьшилась примерно в 60 раз. При $T = 300 \text{ К}$ для исходной модели (2) было получено значение $\sigma_0 \approx 0,5 \%$ и применение поправочной функции шестого порядка позволило уменьшить погрешность всего в 7 раз. Кроме того, из рис. 1 следует, что при $n \geq 4$ среднеквадратическая погрешность аппроксимации ВАХ с помощью гибридной модели практически не зависит от температуры.

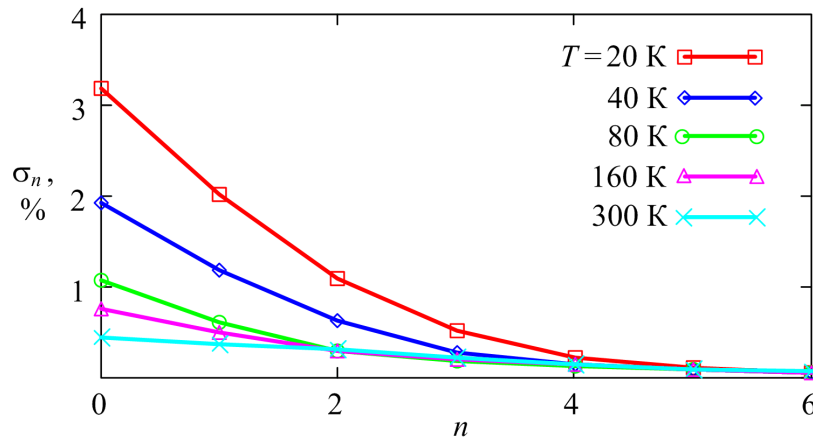


Рис. 1. Зависимости относительных среднеквадратических погрешностей аппроксимации ВАХ МОП-транзистора с размерами $W \approx 10$ мкм и $L \approx 6$ мкм от порядка поправочной функции

Для иллюстрации эффективности применения гибридной модели для аппроксимации ВАХ на рис. 2 приведена экспериментальная выходная ВАХ МОП-транзистора с размерами $W \approx 10$ мкм и $L \approx 6$ мкм при $T = 20$ К и ВАХ того же транзистора, рассчитанные с помощью моделей (2) и (3). Для гибридной модели (3) в этом случае использовалась поправочная функция в виде двумерного степенного полинома шестого порядка.

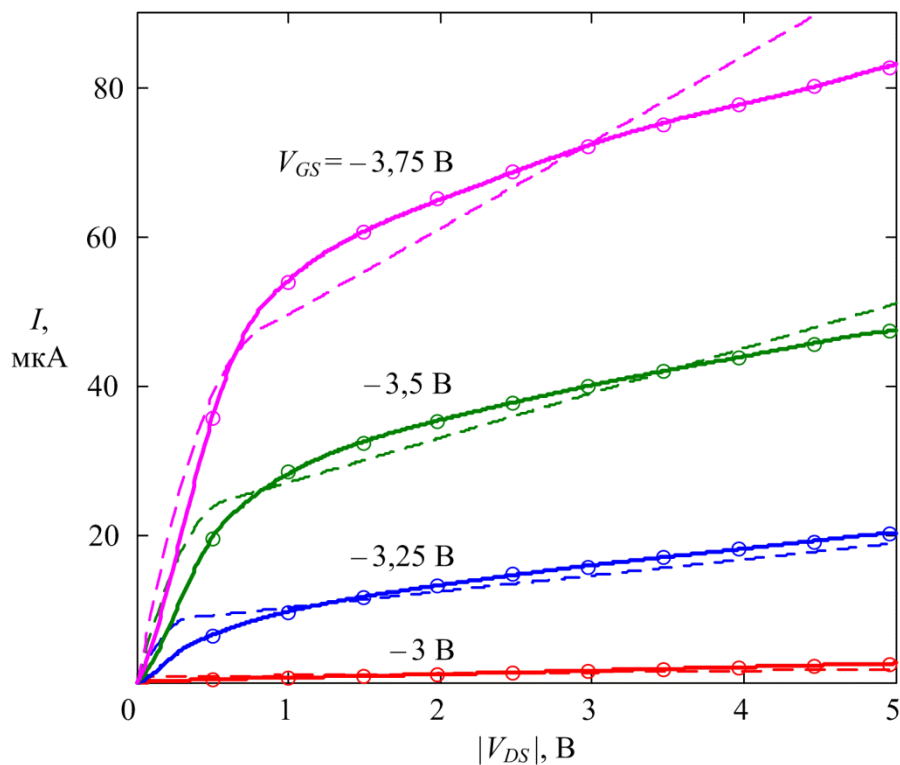


Рис. 2. ВАХ МОП-транзистора с размерами $W \approx 10$ мкм и $L \approx 6$ мкм при $T = 20$ К (кружки – экспериментальная ВАХ, штриховые линии – аналитическая модель (2), сплошные линии – гибридная модель (3))

В табл. 2 и на рис. 3 приведены результаты моделирования тестового МОП-транзистора с размерами $W \approx 50 \mu\text{м}$ и $L \approx 50 \mu\text{м}$. В этом случае исходная аналитическая модель более точно аппроксимирует ВАХ, чем в предыдущем ($\sigma_0 < 0,6\%$ во всем рассматриваемом диапазоне температур) и эффективность применения гибридной модели становится меньше, чем для транзистора с размерами $W \approx 10 \mu\text{м}$ и $L \approx 6 \mu\text{м}$. Например, при использовании в гибридной модели поправочной функции шестого порядка средне-квадратическая погрешность аппроксимации ВАХ МОП-транзистора с размерами $W \approx 50 \mu\text{м}$ и $L \approx 50 \mu\text{м}$ уменьшается всего в 3...5 раз относительно исходной модели (2) во всем рассматриваемом диапазоне температур.

Таблица 2. Параметры и погрешности моделей МОП-транзистора с размерами $W \approx 50 \mu\text{м}$ и $L \approx 50 \mu\text{м}$

T, K	20	40	80	160	300
$\beta, \text{мкА/В}^2$	29,93	27,79	23,61	16,65	7,77
$V_{T0}, \text{В}$	-2,273	-2,116	-2,039	-2,001	-1,973
$\lambda, \text{В}^{-1}$	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}
$\kappa, \text{В}^{-1}$	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
$\theta, \text{В}^{-1}$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
$\sigma_0, \%$	0,129	0,231	0,342	0,272	0,568
$\sigma_2, \%$	0,127	0,201	0,241	0,243	0,371
$\sigma_4, \%$	0,078	0,114	0,129	0,146	0,153
$\sigma_6, \%$	0,043	0,058	0,071	0,093	0,099

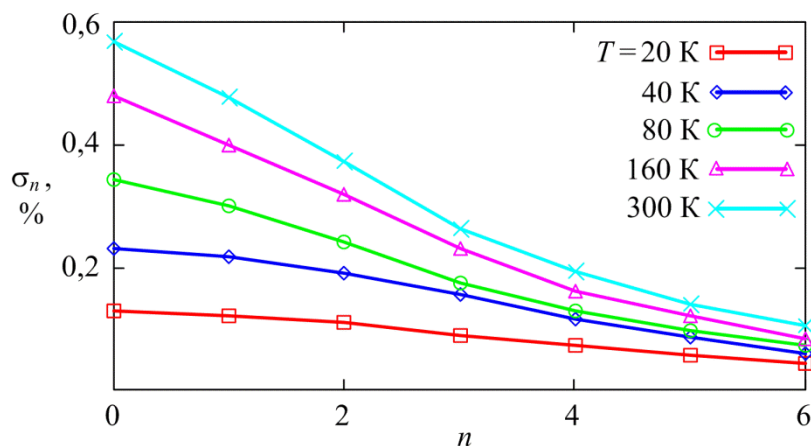


Рис. 3. Зависимости относительных среднеквадратических погрешностей аппроксимации ВАХ МОП-транзистора с размерами $W \approx 50 \mu\text{м}$ и $L \approx 50 \mu\text{м}$ от порядка поправочной функции

Выводы

Представленная в данной работе модель (3) является гибридной аналитической моделью, которая содержит как физические, так и формальные параметры, что позволяет найти компромисс между требованиями физичности, точности, сложности и возможности точного и быстрого определения параметров. Гибридная модель позволяет обеспечить требуемую точность аппроксимации ВАХ МОП-транзистора путем выбора порядка используемой в ней поправочной функции, причем коэффициенты поправочной функции определяются без использования методов нелинейной оптимизации.

Результаты аппроксимации ВАХ МОП-транзисторов с различными размерами показывают, что применение гибридной модели позволяет получить относительную средне-квадратическую погрешность моделирования ВАХ не более 0,1% независимо от транзистора и рабочей температуры. Дополнительные исследования точности моделирования ВАХ показали, что при этом максимальная относительная погрешность не превышает 1%.

Таким образом, результаты, представленные в данной работе, позволяют утверждать, что применение гибридной модели обеспечивает повышение точности аппроксимации ВАХ МОП-транзисторов в несколько раз по сравнению с исходной аналитической моделью в широком диапазоне температур – от 20 до 300 К. Следует отметить, что гибридная модель также эффективна и при более низких температурах, включая гелиевые [7]. Наибольшее повышение точности аппроксимации ВАХ достигается при использовании гибридной модели для МОП-транзисторов, предназначенных для работы в качестве активных элементов малошумящих усилителей при криогенных температурах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (стипендия Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования по приоритетным направлениям модернизации российской экономики, код СП-398.2012.5).

Список литературы

1. Григорьев Е.В., Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Кузьмин Л.В. Генератор хаоса на полевом транзисторе. Математическое и схемотехническое моделирование // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52, № 12. С. 1463-1471.
2. 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. Vol. 3356. P. 57-65. DOI: [10.1117/12.324471](https://doi.org/10.1117/12.324471)
3. 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. Vol. 51, no. 2. P. 270-278. DOI: [10.1109/TED.2003.821764](https://doi.org/10.1109/TED.2003.821764)
4. Tsividis Y.P., Suyama K. MOSFET modeling for analog circuit CAD: Problems and prospects // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1994. Vol. 29, no. 3. P. 210-216. DOI: [10.1109/4.278342](https://doi.org/10.1109/4.278342)
5. Kan J., Weifeng S., Longxing S. A sub-circuit MOSFET model with a wide temperature range including cryogenic temperature // Journal of Semiconductors. 2011. Vol. 32, no. 6. Art no. 064002. DOI: [10.1088/1674-4926/32/6/064002](https://doi.org/10.1088/1674-4926/32/6/064002)
6. Денисенко В.В. Компактные модели МОП-транзисторов в микро- и наноэлектронике. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 408 с.

7. Бирюков В.Н., Пилипенко А.М., Семерник И.В. Таблично-аналитическая модель полевого транзистора для криогенных температур // Инженерный вестник Дона. Электронный научный журнал. 2012. № 4-2. Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1402> (дата обращения 24.07.2014).
8. Бирюков В.Н., Пилипенко А.М. Диагностика нелинейных статических моделей диода // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 5. С. 604-610.
9. Пилипенко А.М. Бирюков В.Н. Исследование параметров полевых транзисторов с изолированным затвором при низких температурах // Успехи современной радиоэлектроники. 2011. № 9. С. 66-70.

Application of the Hybrid Analytical Model for Approximation of the Current-Voltage Characteristics of MOSFETs in a Wide Temperature Range

08, August 2014

DOI: [10.7463/0814.0720709](https://doi.org/10.7463/0814.0720709)

A. M. Pilipenko^{1,a}

¹Southern Federal University, Taganrog, Rostov Region, 347928, Russia

^aampilipenko@sfedu.ru

Keywords: [current-voltage characteristic](#), [cryogenic temperature](#), [approximation](#), [MOSFET](#), [parameters identification](#)

The paper considers a possibility to apply a hybrid model for approximation of the current-voltage characteristics of MOSFETs in a wide temperature range from cryogenic temperatures to regular (room) temperatures (20 ... 300 K). Being analytical and compact, the hybrid model contains additional formal parameters along with the physical ones. The hybrid analytical model, presented in this paper, is intended for the MOSFETs to be used as active components in low noise amplifiers. Low noise amplifiers, in turn, are used in radio-receivers of infrared and optical bands in astronomical satellites, radio-telescopes, and space observatories..

Low noise amplifiers are capable to work both at temperatures close to the room ones and at low (cryogenic) temperatures. Cooling a device allows improvement of the basic characteristics and the reliability of MOSFETs i.e. increasing a transconductance of the MOSFET and reducing self-noise. Demand to use the hybrid model is explained by the fact that modern models do not ensure a high accuracy of the current-voltage characteristics approximation for the MOSFETs which have a sufficiently large channel size and work in a wide temperature range, including cryogenic ones.

The hybrid model of the MOSFET represents a compact analytical model with only physical parameters and a correction function as a two-dimensional power polynomial. The coefficients of the correction function, actually, are formal parameters of the hybrid model and are defined without using the nonlinear optimization methods.

The hybrid analytical model allows approximation of MOSFET experimental current-voltage characteristics with the relative root-mean-square error less than 0,1 % independently of a temperature at which the measurements are carried out. The accuracy of the hybrid analytical model increases with increasing correction function order. The less an accuracy of the initial

model the more benefit from the hybrid model application. The greatest increase of accuracy is achieved for transistors to be used as active components in low noise amplifiers at cryogenic temperatures.

References

1. Grigor'ev E.V., Dmitriev A.S., Efremova E.V., Kuz'min L.V. Mathematical and general-circuit simulation of a chaos generator based on a field-effect transistor. *Radiotekhnika i elektronika*, 2007, vol. 52, no. 12, pp. 1463-1471. (English translation: *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2007, vol. 52, no. 12, pp. 1355-1362. DOI: [10.1134/S106422690712008X](https://doi.org/10.1134/S106422690712008X)).
2. 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, vol. 3356, pp. 57-65. DOI: [10.1117/12.324471](https://doi.org/10.1117/12.324471)
3. 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, vol. 51, no. 2, pp. 270-278. DOI: [10.1109/TED.2003.821764](https://doi.org/10.1109/TED.2003.821764)
4. Tsividis Y.P., Suyama K. MOSFET modeling for analog circuit CAD: Problems and prospects. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1994, vol. 29, no. 3, pp. 210-216. DOI: [10.1109/4.278342](https://doi.org/10.1109/4.278342)
5. Kan J., Weifeng S., Longxing S. A sub-circuit MOSFET model with a wide temperature range including cryogenic temperature. *Journal of Semiconductors*, 2011, vol. 32, no. 6, art no. 064002. DOI: [10.1088/1674-4926/32/6/064002](https://doi.org/10.1088/1674-4926/32/6/064002)
6. Denisenko V.V. *Kompaktnye modeli MOP-tranzistorov v mikro- i nanoelektronike* [Compact models of MOS transistors in micro-and nanoelectronics]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2010. 408 p. (in Russian).
7. Biriukov V.N., Pilipenko A.M., Semernik I.V. A New Hybrid Table/Analytical Approach to MOSFET Modeling for Cryogenic Technologies. *Inzhenernyi vestnik Dona = E-journal "Engineering journal of Don"*, 2012, no. 4-2. Available at: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1402> , accessed 24.07.2014. (in Russian).
8. Biriukov V.N., Pilipenko A.M. Diagnostics of the nonlinear static models of a diode. *Radiotekhnika i elektronika*, 2009, vol. 54, no. 5, pp. 604-610. (English translation: *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2009, vol. 54, no. 5, pp. 577-582. DOI: [10.1134/S1064226909050118](https://doi.org/10.1134/S1064226909050118)).

9. Pilipenko A.M. Biriukov V.N. Analysis of metal-oxide semiconductor field-effect transistors parameters by low temperature. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki = Achievements of Modern Radioelectronics*, 2011, no. 9, pp. 66-70. (in Russian).