

# Методы идентификации параметров моделей интегральных транзисторов

## Часть 4. Идентификация параметров модели Шихмана–Ходжеса полевого транзистора с р–п-переходом

Олег Дворников, Юрий Шульгевич (г. Минск, Беларусь)

Рассмотрена модель Шихмана–Ходжеса, приведены математические соотношения для расчёта параметров модели с помощью конструктивно-технологических и электрофизических параметров, описана идентификация параметров на основе результатов электрических измерений.

### Модель Шихмана–Ходжеса полевого транзистора с р–п-переходом

Характеристики полевого транзистора с р–п-переходом чаще всего описываются известной моделью Шихмана–Ходжеса (Shichman H., Hodges D.A.) [23]. Эквивалентная электрическая схема полевого транзистора с р–п-переходом (ПТП) приведена на рисунке 33, а малосигнальная электрическая схема с источниками шумов – на рисунке 34.

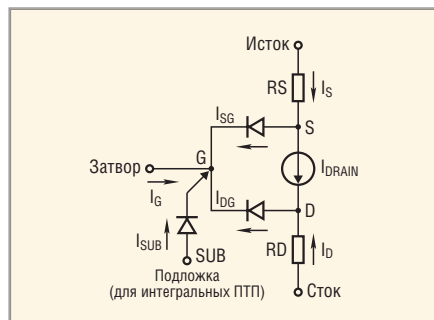


Рис. 33. Эквивалентная электрическая схема интегрального р-ПТП с учётом влияния подложки

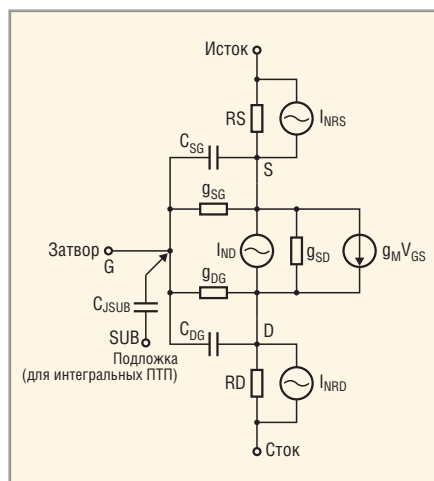


Рис. 34. Малосигнальная эквивалентная электрическая схема ПТП с источниками шумов

на–Ходжеса (Shichman H., Hodges D.A.) [23]. Эквивалентная электрическая схема полевого транзистора с р–п-переходом (ПТП) приведена на рисунке 33, а малосигнальная электрическая схема с источниками шумов – на рисунке 34.

Положительным считается ток, втекающий в транзистор. Здесь и далее выражения относятся к наиболее применяемому в полупроводниковых микросхемах р-канальному ПТП (р-ПТП).

В соответствии с упрощённой электрической моделью Шихмана–Ходжеса для «внутреннего» транзистора [10]:

$$I_G = -I_{SG} - I_{DG}, \quad (103)$$

$$I_S = I_{DRAIN} + I_{SG}, \quad (104)$$

$$I_D = -I_{DRAIN} + I_{DG}, \quad (105)$$

$$I_{SG} = IS \left( \exp \frac{V_{SG}}{N\phi_T} - 1 \right), \quad (106)$$

$$I_{DG} = IS \left( \exp \frac{V_{DG}}{N\phi_T} - 1 \right). \quad (107)$$

При прямом включении для р-ПТП ( $V_{SD} > 0$ ):

$$I_{DRAIN} = 0, \quad (108)$$

в области отсечки, при  $V_{GS} > V_{TO}$

$$I_{DRAIN} = BETA(1 + V_{SD}LAMBDA) \times V_{SD}[2(V_{TO} - V_{GS}) - V_{SD}]; \quad (109)$$

в линейной области ВАХ, при  $0 < V_{SD} < V_{TO} - V_{GS}$ ,  $V_{GS} < V_{TO}$

$$I_{DRAIN} = BETA(1 + V_{SD}LAMBDA) \times (V_{TO} - V_{GS})^2; \quad (110)$$

в области насыщения ВАХ, при  $V_{SD} > V_{TO} - V_{GS}$ ,  $V_{GS} < V_{TO}$ .

Здесь  $I_G$ ,  $I_D$ ,  $I_S$ ,  $I_{SG}$ ,  $I_{DG}$ ,  $I_{DRAIN}$  – токи затвора, стока, истока, р–п-перехода исток–затвор, сток–затвор, источника тока эквивалентной схемы ПТП соответственно;  $V_{GS}$ ,  $V_{SD}$  – напряжение на «внутреннем» р–п-переходе затвор–исток и промежутке исток–сток.

В электрической модели на рисунке 34 используются источники шумов, ёмкости р–п-переходов, малосигнальные параметры (проводимость р–п-перехода исток–затвор  $g_{SG}$ , сток–затвор  $g_{DG}$ , передаточная проводимость (крутизна)  $g_M$ , выходная проводимость  $g_{SD}$ ), определяемые соотношениями [10]:

$$S_{NRS}^2 = \frac{dI_{NRS}^2}{df} = \frac{4kT'}{RS}, \quad (111)$$

$$S_{NRD}^2 = \frac{dI_{NRD}^2}{df} = \frac{4kT'}{RD}, \quad (112)$$

$$S_{ND}^2 = \frac{dI_{ND}^2}{df} = \frac{8kT}{3} g_M + \frac{I_{DRAIN}'^2 KI'}{f}, \quad (113)$$

$$C_{DG} = \frac{CGD}{\left(1 - \frac{V_{DG}}{PB}\right)^M} \text{ при } V_{DG} < FC PB, \quad (114)$$

$$C_{SG} = \frac{CGS}{\left(1 - \frac{V_{SG}}{PB}\right)^M} \text{ при } V_{SG} < FC PB, \quad (115)$$

$$g_{SG} = \frac{dI_{SG}}{dV_{SG}}, \quad (116)$$

$$g_{DG} = \frac{dI_{DG}}{dV_{DG}}, \quad (117)$$

$$g_{SD} = \frac{dI_{DRAIN}}{dV_{SD}}, \quad (118)$$

$$g_M = \frac{dI_{DRAIN}}{dV_{GS}}, \quad (119)$$

где  $S_{ND}$  – спектральная плотность дробового шума тока стока.

Полная модель Шихмана–Ходжеса дополнительно учитывает следующие основные факторы [9]:

1. Влияние ионизации на величину основных токов с помощью параметров  $ISR, NR, ALPHA, VK$  и выражений:

$$I_G = -I_{SG} - ISR \left( \exp \frac{V_{SG}}{NR\phi_T} - 1 \right) \left[ \left( 1 - \frac{V_{SG}}{PB} \right)^2 + 0,005 \right]^{0,5M} - I_{DG} - ISR \left( \exp \frac{V_{DG}}{NR\phi_T} - 1 \right) \left[ \left( 1 - \frac{V_{DG}}{PB} \right)^2 + 0,005 \right]^{0,5M} - I_I, \quad (120)$$

$$I_D = -I_{DRAIN} + \left\{ I_{DG} + \right. \\ \left. + ISR \left( \exp \frac{V_{DG}}{NR\phi_T} - 1 \right) \left[ \left( 1 - \frac{V_{DG}}{PB} \right)^2 + 0,005 \right]^{0,5M} + I_I \right\}, \quad (121)$$

$$I_S = I_{DRAIN} + \left\{ I_{SG} + ISR \left( \exp \frac{V_{SG}}{NR\phi_T} - 1 \right) \right.$$

$$\left. - 1 \right) \left[ \left( 1 - \frac{V_{SG}}{PB} \right)^2 + 0,005 \right]^{0,5M} + I_I \right\}. \quad (122)$$

В области насыщения ВАХ при нормальном включении

$$I_I = I_{DRAIN} ALPHA (V_{SD} - V_{SG} - VTO) \exp \frac{-VK}{V_{SD} - V_{SG} - VTO}; \quad (123)$$

в остальных случаях  $I_I = 0$ ;

2. Барьерные ёмкости прямо смещённых р–п-переходов:

$$C_{SG} = \frac{CGS}{(1-FC)^{1+M}} \times \left( 1 - FC(1+M) + \frac{V_{SG}M}{PB} \right) \text{ при } V_{SG} > FC PB, \quad (124)$$

$$C_{DG} = \frac{CGD}{(1-FC)^{1+M}} \times \left( 1 - FC(1+M) + \frac{V_{DG}M}{PB} \right) \text{ при } V_{DG} > FC PB; \quad (125)$$

3. Температурные зависимости параметров  $VTO(T), BETA(T), IS(T), ISR(T), PB(T), EG(T), CGS(T), CGD(T), KF(T), AF(T)$ .

Параметры Spice-модели ПТП и их величины, принятые по умолчанию, приведены в таблице 4.

Основные параметры модели ПТП можно определить по выражениям, аналогичным БТ, а именно [10]:  $IS$  – по

(36);  $ISR$  – по (38);  $CGS, CGD$  – по (39)–(41);  $PB$  – по (41);  $I_{NRS}, I_{NRD}, I_{ND}$  – по (25) с использованием спектральной плотности шума. Кроме того, допустимо применять значения напряжения отсечки и удельной крутизны, полученные из соотношений [10]:

$$BETA = \frac{4\epsilon\epsilon_0\mu_{CH}Z}{3al}, \quad (126)$$

$$VTO = \frac{qN_{CH}a^2}{2\epsilon\epsilon_0}, \quad (127)$$

$$VTO_{OG} = \frac{2qN_{CH}a^2}{\epsilon\epsilon_0}, \quad (128)$$

$$BETA_{OG} = \frac{\epsilon\epsilon_0\mu_{CH}Z}{3al}, \quad (129)$$

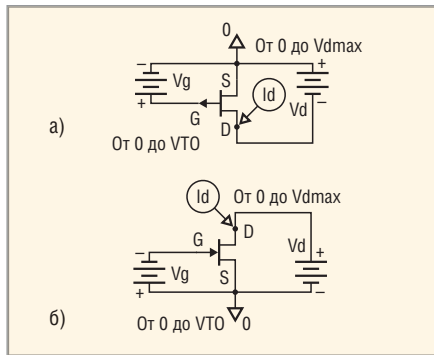
где  $VTO, BETA$  – параметры модели при модуляции толщины канала двумя р–п-переходами;  $VTO_{OG}, BETA_{OG}$  – параметры модели при модуляции толщины канала одним р–п-переходом;  $\mu_{CH}$  – подвижность основных носителей заряда в канале;  $N_{CH}$  – концентрация ионизированной примеси в канале;  $Z, L$  – ширина и длина затвора соответственно;  $a$  – половина толщины токопроводящей части канала при отсутствии внешнего напряжения.

При использовании модели Шихмана–Ходжеса необходимо учитывать следующие соображения (пп. 1–5):

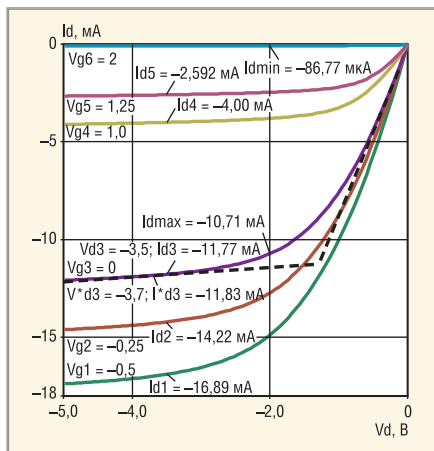
1. Модель Шихмана–Ходжеса неточна для интегральных ПТП, поскольку не учитывает влияния ряда факторов: подпороговой области ВАХ [24], паразитной ёмкости ПТП – подложка,

Таблица 4. Параметры Spice-модели ПТП

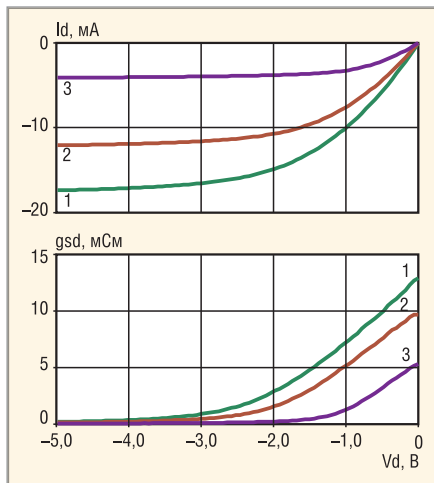
Обозначение	Описание	Единица измерения	Значение по умолчанию
AF	Показатель степени избыточного низкочастотного шума (фликер-шума)	–	1,0
ALPHA	Коэффициент, характеризующий зависимость тока ионизации от величины обратного напряжения на р–п-переходе затвор–сток	В <sup>-1</sup>	0
BETA	Коэффициент пропорциональности (удельная крутизна)	А/В <sup>2</sup>	10 <sup>-4</sup>
BETATCE	Температурный коэффициент BETA	С <sup>-1</sup>	0
CGD, CGS	Барьерные ёмкости переходов затвор–сток, затвор–исток при отсутствии внешнего напряжения на р–п-переходах	Ф	0
EG	Ширина запрещённой зоны	эВ	1,11
FC	Коэффициент, характеризующий диапазон напряжения, в котором определена величина барьерной ёмкости прямо смещённого перехода	–	0,5
IS	Обратный ток насыщения р–п-перехода затвор–канал	А	10 <sup>-14</sup>
ISR	Обратный ток насыщения, обусловленный процессами генерации–рекомбинации в ОПЗ р–п-перехода затвор–канал	А	0
KF	Коэффициент избыточного низкочастотного шума	–	0
LAMBDA	Коэффициент модуляции длины канала	В <sup>-1</sup>	0
M	Показатель степени в зависимости барьерной ёмкости перехода затвор–канал от обратного напряжения	–	0,5
N	Коэффициент неидеальности для IS	–	1,0
NR	Коэффициент неидеальности для ISR	–	2,0
PB	Контактная разность потенциалов перехода затвор–канал	В	1,0
RD	Сопротивление полупроводниковой области стока	Ом	0
RS	Сопротивление полупроводниковой области истока	Ом	0
VK	Напряжение, характеризующее наступление ионизации в переходе затвор–канал	В	0
VTO	Напряжение отсечки	В	-2,0
VTOTC	Температурный коэффициент VTO	В/°С	0
XTI	Температурный коэффициент IS	–	3,0



**Рис. 35. Схема включения для измерения выходной вольт-амперной характеристики с общим истоком для а) р-ПТП и б) п-ПТП**  
S (source) – исток, G (gate) – затвор, D (drain) – сток



**Рис. 36. Выходная ВАХ в схеме п-ПТП с общим истоком при  $V_S = 0$**



**Рис. 37. Зависимость тока стока (вверху) и выходной проводимости (внизу) р-ПТП от напряжения стока  $V_D$  при  $V_S = 0$**   
Кривая 1 соответствует  $V_G = -0,5$  В; кривая 2 –  $V_G = 0$ ; кривая 3 –  $V_G = 1$  В

топологической асимметрии истока и стока, конструктивно-технологического различия верхнего и нижнего затворов, неоднородного распределения примеси в канале.

2. Модель Шихмана–Ходжеса приводит к погрешности расчёта уровня

шумов в линейной области ВАХ. Так, пренебрегая фликер-шумом из (113) и (119), получим, что спектральная плотность шума сопротивления канала ПТП ( $S_{ND}$  в линейной области ВАХ) описывается выражением:

$$S_{ND} \approx \sqrt{\frac{8kT}{3}} g_M \leq \sqrt{\frac{8kT}{3}} g_{MMAX} = \sqrt{\frac{8kT}{3 R_{CH}}}, \quad (130)$$

где  $R_{CH} = (2BETA VTO)^{-1}$  – сопротивление канала ПТП.

В то же время известно (см. (20)), что спектральная плотность теплового шума резистора  $S_{NR}$  определяется соотношением:

$$S_{NR} = \sqrt{\frac{4kT}{R}}. \quad (131)$$

Приближённая оценка уровня шума ПТП в линейной области известна давно [25] и может быть уточнена только при модернизации модели;

3. Во многих случаях достаточную для инженерных применений точность моделирования можно получить следующим образом:

- влияние подложки учесть с помощью полупроводникового диода, например, как показано на рисунке 33 для интегрального р-ПТП;
  - характеризовать топологическую асимметрию с помощью разных значений параметров модели для истока и стока (обычно  $RS < RD, CGS > CGD$ );
  - определить несколько наборов параметров модели одного и того же ПТП для описания его ВАХ в диапазоне изменения тока стока;
4. Наличие сопротивлений полупроводниковых областей истока  $RS$  и стока  $RD$  приводит к уменьшению измеренного значения крутизны. Так, для схемы с общим истоком [26]:

$$g_M = \frac{g_{MEXT}}{1 - g_{MEXT} RS}, \quad (132)$$

где  $g_{MEXT}$  – крутизна «внешнего» транзистора, учитывающего сопротивления полупроводниковых областей, в схеме с общим истоком.

На измеренное значение крутизны короткоканальных ПТП значительно влияет выходная проводимость  $g_{SD}$  [26]:

$$g_M = \frac{g_{MEXT}^0}{1 - g_{SD} R_{SD} (1 + g_{MEXT}^0 RS)}, \quad (133)$$

$$g_{MEXT}^0 = \frac{g_{MEXT}}{(1 - g_{MEXT} RS)}, R_{SD} = RS + RD. \quad (134)$$

Учитывая изложенное, при идентификации параметров короткоканальных ПТП, а также мощных ПТП, работающих с большими токами стока, рекомендуется особое внимание уделять корректному определению  $RS, RD$  и  $LAMBDA$ ;

5. Большинство интегральных ПТП имеют два разных по характеристикам затвора. Если изменяющееся напряжение поступает на верхний затвор, а постоянное напряжение – на нижний затвор, то функционирование и параметры двухзатворного ПТП можно упрощённо моделировать в Spice-подобных программах при помощи коэффициента  $SCALE_{BG}$ . При этом параметры Spice-модели  $VTO$  и  $BETA$  рассчитываются из соотношений [10]:

$$VTO = VTO_{TGO} SCALE_{BG}^2, \quad (135)$$

$$BETA = \frac{BETA_{TGO}}{SCALE_{BG}}, \quad (136)$$

$$SCALE_{BG} = 1 - \frac{\left(1 + \frac{V_{BGS}}{V_{JBG}}\right)^{M/JBG} - 1}{\left(1 + \frac{VTO_{BGO}}{V_{JBG}}\right)^{M/JBG} - 1}, \quad (137)$$

где  $VTO_{TGO}$  – напряжение отсечки при управлении верхним затвором и  $V_{BGS} = 0$ ;  $BETA_{TGO}$  – удельная крутизна ПТП при управлении верхним затвором и  $V_{BGS} = 0$ ;  $V_{BGS}, V_{TGS}$  – напряжение на переходах нижний затвор–исток и верхний затвор–исток;  $VTO_{BGO}$  – напряжение отсечки при управлении нижним затвором и  $V_{TGS} = 0$ ;  $V_{JBG}$  – контактная разность потенциалов р–n-перехода нижний затвор–канал;  $M/JBG$  – показатель степени для р–n-перехода нижний затвор–канал.

### ИЗМЕРЕНИЕ ВЫХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПТП В СХЕМЕ С ОБЩИМ ИСТОКОМ

Для регистрации выходной ВАХ полевых транзисторов, так же как и биполярных транзисторов, применяются измерители параметров полупроводниковых приборов [19, 20], встроенные в осциллографы блоки наблюдения ВАХ [22], а также специализированные электроизмерительные приборы. Если полярность напряжения источников задана в соответствии с рисунком 35, то возможно измерение выходной ВАХ ПТП с общим истоком. Так, на рисунке 36 показано семейство графи-

ков для р-ПТП. В отличие от базы БТ, на затвор ПТП следует подавать ступеньки обратного напряжения, при этом с увеличением  $|V_{GS}|$  ток стока  $|I_D|$  уменьшается. Отрицательная величина тока стока на рисунке 36 обусловлена тем, что ток вытекает из стока р-ПТП, а графики при  $V_{GS1} = -0,5$  В,  $V_{GS2} = -0,25$  В соответствуют работе р-ПТП с прямым смещением р–n-перехода затвор–исток. В приведённых ниже математических соотношениях применяется абсолютное значение тока стока.

С помощью результатов измерений выходной ВАХ допустимо рассчитать некоторые параметры модели Шихмана–Ходжеса и определить характеристики ПТП, обычно приводимые в справочных данных:

1. Часто напряжение отсечки  $V_{TO}$  определяют как точку перегиба графика зависимости  $I_D = f(V_{SD})$  при  $V_{GS} = 0$ . Если эта точка не очевидна, то за величину  $V_{TO}$  принимают абсциссу точки пересечения касательных, построенных в линейной области и области насыщения ВАХ (на рисунке 36 касательные показаны пунктиром). Такая идентификация напряжения отсечки наглядна, но для ин-

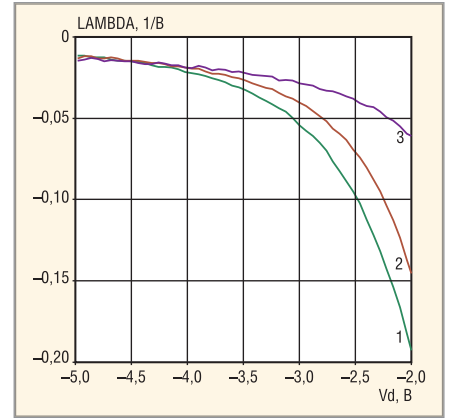
тегральных ПТП, особенно короткоканальных, приводит к недопустимо большой погрешности, поэтому предпочтительным является определение параметра  $V_{TO}$  как напряжения затвор–исток, при котором ток стока не превышает заданного минимального значения  $I_{DMIN}$ :

$$\begin{aligned} V_{TO} &= V_{GS} \text{ при } I_D = I_{DMIN}, \\ V_{SD} &= \text{const} > V_{TO}, \end{aligned} \quad (138)$$

причём напряжение  $V_{SD}$  выбирается за точкой перегиба (на рисунке 36  $I_{DMIN} = 86,77$  мкА при  $V_D = -2$  В,  $V_{G6} = 2$  В). Значение минимального тока стока для регистрации  $V_{TO}$  устанавливается в зависимости от максимального тока стока  $I_{DMAX}$  ( $I_{DMIN} < 0,01 I_{DMAX}$ ). Для маломощных, среднемощных и мощных ПТП типовое значение минимального тока стока обычно составляет 10, 50 и 100 мкА соответственно;

2. Максимальный ток стока  $I_{DMAX}$  – это ток стока, соответствующий точке перегиба графика зависимости  $I_D = f(V_{SD})$  при  $V_{GS} = 0$ . Для интегральных ПТП целесообразно принять, что:

$$I_{DMAX} = I_D \text{ при } V_{GS} = 0, V_{SD} = V_{TO}. \quad (139)$$



**Рис. 38. Зависимость рассчитанного по формуле (143) параметра LAMBDA от напряжения стока  $V_D$  при  $V_S = 0$**

Кривая 1 соответствует  $V_G = -0,5$  В; кривая 2 –  $V_G = 0$ ; кривая 3 –  $V_G = 1$  В

По известным значениям  $I_{DMAX}$ ,  $V_{TO}$  допустимо рассчитать параметр модели БETA:

$$\begin{aligned} \text{BETA} &= \frac{I_{DMAX}}{V_{TO}^2 (1 + \text{LAMBDA } V_{TO})} \approx \\ &\approx \frac{I_{DMAX}}{V_{TO}^2}; \end{aligned} \quad (140)$$

3. Выходная проводимость  $g_{SD}$ , в соответствии с рисунком 36, будет равна:

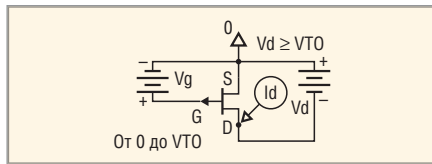


Рис. 39. Схема включения для измерения передаточной характеристики р-ПТП с общим истоком

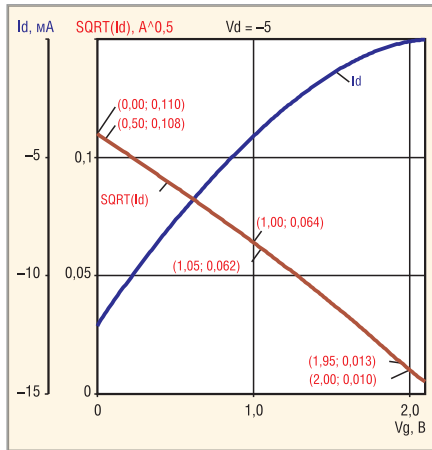


Рис. 40. Зависимости тока стока и квадратного корня из тока стока от напряжения на затворе при  $V_S = 0, V_D = -5 В$

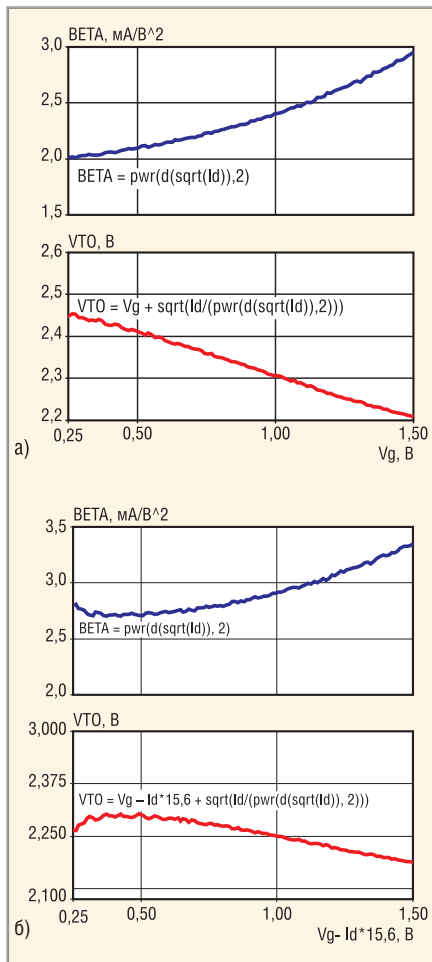


Рис. 41. Рассчитанные по формулам (144), (145) параметры BETA и VTO при  $V_S = 0, V_D = -5 В$   
 а) без учёта падения напряжения на сопротивлении истока, б) с учётом падения напряжения на  $RS = 15,6 Ом$

$$g_{SD}(V_{SD3}, I_{D3}) = \frac{I_{D3} - I_{D3}^*}{V_{SD3} - V_{SD3}^*}$$

при  $V_{GS} = const, V_{SD} \geq V_{TO} - V_{GS}$ , (141)

где  $(V_{SD3}, I_{D3}), (V_{SD3}^*, I_{D3}^*)$  – координаты точек на одной и той же кривой при  $V_{GS} = const$ .

Расчёт  $g_{SD}$  рекомендуется выполнять для небольших приращений тока стока  $I_{D3} - I_{D3}^* < 0, I_{D3}$ . Если выходную проводимость определить по графику  $I_D = f(V_{SD})$  при  $V_{GS} = 0$  в той её области, где проводимость сохраняет постоянное значение, т.е.  $g_{SD} \approx const$ , то возможно идентифицировать параметр LAMBDA:

$$LAMBDA = \frac{1}{\frac{I_{DMAX}}{g_{SD}} - V_{TO}} \approx \frac{g_{SD}}{I_{DMAX}}$$

при  $V_{GS} = 0, V_{SD} \geq V_{TO}, g_{SD} \approx const$ . (142)

Приближённое равенство в соотношении (142) справедливо для любых графиков  $V_{GS}$  в области насыщения ВАХ, т.е.

$$LAMBDA \approx \frac{g_{SD}(I_D)}{I_D}$$

при  $V_{SD} \geq V_{TO} - V_{GS}, g_{SD} \approx const$ . (143)

Справедливость выполненного анализа подтверждают результаты измерений, обработанные графическим постпроцессором PSpice simulator and Probe waveform viewer системы OrCad [21] (см. рисунки 37 и 38). Так, для отображения выходной проводимости в соответствии с правилами графического постпроцессора [9] на ось Y рисунка 37 выведена переменная  $D(Id)$ , а для получения параметра LAMBDA на ось Y рисунка 38 –  $D(Id)/Id$ . Очевидно, что выражение (143) является правильным в диапазоне токов стока от 4 до 17 мА как при прямом, так и обратном смещении р-п-перехода затвор-исток.

Расчёт параметров в соответствии с (138), (139) и (141) применяется во многих электроизмерительных приборах (например, типа Л2-78).

Для результатов измерений, показанных на рисунке 36:  $I_{DMAX} = 10,71 мА$ ;  $I_{DMIN} = 86,77 мкА$ ;  $V_{TO} = 2 В$ ;  $LAMBDA = 0,025 В^{-1}$ ;  $BETA = 2,678 мА/В^2$ ;

4. Для увеличения точности идентификации параметров целесообразно выполнять расчеты для малых приращений  $\Delta I_D, \Delta V_{SD}, \Delta V_{GS}$  в широком диапазоне токов стока  $I_D$  и применять соотношения, вытекающие из модели Шихмана-Ходжеса, а именно:

$$BETA(I_{D4}) = \frac{\left(\frac{\sqrt{I_{D4}} - \sqrt{I_{D5}}}{V_{GS5} - V_{GS4}}\right)^2}{1 + V_{SD} LAMBDA} \approx$$

$$\approx \left(\frac{\sqrt{I_{D4}} - \sqrt{I_{D5}}}{V_{GS5} - V_{GS4}}\right)^2$$

при  $V_{SD} = const \geq V_{TO} - V_{GS}$ , (144)

$$V_{TO} = V_{GS1} + \sqrt{\frac{I_{D1}}{BETA(I_{D4})}}$$

при  $V_{SD} = const \geq V_{TO} - V_{GS}$ , (145)

где  $I_{D4}, I_{D5}$  – ток стока при одном и том же напряжении  $V_{SD}$  и  $V_{GS4}, V_{GS5}$ .

Кроме того, необходимо учесть сильное влияние на ВАХ сопротивления истока, величину которого можно рассчитать как:

$$RS = \frac{V_{GS2} - V_{GS1}}{I_{D1} - I_{D2}} - \frac{1}{2\sqrt{I_{D1} BETA(I_{D4})}}$$

при  $V_{SD} = const \geq V_{TO} - V_{GS}$ , (146)

где  $I_{D1}, I_{D2}$  – ток стока при одном и том же напряжении  $V_{SD}$  и  $V_{GS1}, V_{GS2}$  (см. рис. 36),  $BETA(I_{D4})$  – величина параметра BETA, рассчитанная с помощью соотношения (144) при токе стока, равном  $I_{D4}$ .

Выражение (146) получено с использованием (132). Для уменьшения погрешности идентификации RS рекомендуется:

- измерения  $I_{D1}, I_{D2}$  проводить для малых приращений тока стока и напряжения затвор-исток около максимально возможного тока стока или небольшого прямого смещения р-п-перехода затвор-исток, при котором прямой ток через затвор не превышает ориентировочно 1 нА;
- параметр BETA рассчитывать из результатов измерений при малых токах стока.

В соответствии с результатами измерений, показанных на рисунке 36, и соотношениями (144)–(146):  $BETA(I_{D4}) = 2,434 мА/В^2$ ;  $V_{TO} = 2,28 В$ ;  $RS(I_{D1}) = 15,6 Ом$ ;  $RS(I_{D2}) = 17,05 Ом$ . С нашей точки зрения, результаты расчёта параметров по (144)–(146) более адекватно описывают ВАХ по сравнению с (138)–(140).

### ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПТП В СХЕМЕ С ОБЩИМ ИСТОКОМ

Расчёт параметров по соотношениям (144), (145) проще выполнить с использованием результатов измерений передаточной характеристики ПТП в схеме с общим истоком в области насыщения, т.е. зависимости  $I_D = f(V_{GS})$  при  $V_{SD} = const \geq$

$\geq V_{TO} - V_{GS}$ , зарегистрированной по схеме, приведённой на рисунке 39.

В соответствии с моделью Шихмана–Ходжеса для области насыщения ПТП справедливо соотношение:

$$\sqrt{I_D} \approx \sqrt{\text{BETA}}(V_{TO} - V_{GS}). \quad (147)$$

Исходя из зависимости  $\sqrt{I_D} = f(V_{GS})$  в области насыщения ПТП, напряжение отсечки допустимо определить как точку пересечения касательной к графику зависимости  $\sqrt{I_D} = f(V_{GS})$  с осью  $V_{GS}$ , а по тангенсу угла наклона касательной – рассчитать величину  $\sqrt{\text{BETA}}$ , что идентично расчёту по соотношениям (144), (145).

Для мощных ПТП зависимость  $\sqrt{I_D} = f(V_{GS})$  является нелинейной вследствие падения напряжения на сопротивлении истока  $RS$  в области больших токов стока. В этом случае измерения ВАХ для определения параметров  $V_{TO}$ ,  $\text{BETA}$  рекомендуется выполнять при малых токах стока. В микромощных ПТП даже при  $V_{GS} \approx 0$  на зависимость  $I_D = f(V_{GS})$  оказывает влияние существование подпороговой области ВАХ, поэтому для идентификации параметров  $V_{TO}$  и  $\text{BETA}$  целесообразно использовать результаты измерений, получен-

ные при небольшом прямом смещении р–п-перехода исток–затвор (ориентировочно, до  $|V_{GS}| < 0,3$  В).

Указанные особенности идентификации параметров ПТП поясняют результаты измерений (см. рисунки 40 и 41), выполненных с помощью прибора ИППП-1 и обработанных графическим постпроцессором. Возможности графического постпроцессора позволили отобразить на одном рисунке две оси  $Y$ , одна из которых соответствует току стока  $I_D$ , а вторая – квадратному корню из тока стока, обозначенному в соответствии с принятыми в постпроцессоре правилами как  $\text{SQRT}(I_d)$ . На рисунке 41а показаны рассчитанные в постпроцессоре по соотношениям (144), (145) параметры  $\text{BETA}$  и  $V_{TO}$ , т.е. на оси  $Y$  отображены переменные  $\text{pwr}(d(\text{sqrt}(I_d)), 2)$  и  $Vg + \text{sqrt}(I_d/(\text{pwr}(d(\text{sqrt}(I_d)), 2)))$ .

Чтобы учесть падение напряжения на сопротивлении истока, уменьшающее  $V_{GS}$ , с помощью графического постпроцессора переменная  $V_G$  была заменена на  $V_G - I_D RS$  (см. рис. 41б).

Анализ рисунков 41 позволяет сделать вывод о том, что модель Шихмана–Ходжеса не вполне адекватно описывает характеристики интегрального ПТП. Так,

согласно этой модели, параметры  $\text{BETA}$  и  $V_{TO}$  должны быть постоянными, а в реальном транзисторе они зависят от режима работы. В связи с этим рекомендуется либо определить несколько различных наборов параметров модели одного и того же ПТП для описания его ВАХ в диапазоне изменения тока стока, либо идентифицировать параметры модели по касательной, наилучшим образом совпадающей с зависимостью  $\sqrt{I_D} = f(V_{GS})$ , причём в обоих случаях целесообразно учесть влияние параметра  $RS$ , заменив переменную  $V_G$  на  $V_G - I_D RS$ .

## ЛИТЕРАТУРА

23. *Antognetti P.* Semiconductor Device Modeling with SPICE. McGraw-Hill, 1988.
24. *Brewer R.J.* The barrier mode behavior of a junction FET at low drain currents. Solid-State Electronics. 1975. Vol. 18, No. 11. PP. 1013–1017.
25. *Tsividis Y.P.* MOSFET modeling for analog circuit CAD: problems and prospects. IEEE J. of Solid-State Circuits. 1994. Vol. 29, No. 3. PP. 210–216.
26. *Chou S.Y.* Relation between measured and intrinsic transconductances of FETs. IEEE Transactions on Electron Devices. 1987. Vol. 34, No. 2. PP. 448–450.