

УДК 621.372.061

В.И. Туев

Учет насыщения дрейфовой скорости носителей при аппроксимации вольт-амперных характеристик полевых транзисторов

При совместном использовании формальных аппроксимаций и результатов анализа физических процессов, протекающих в полупроводниковом материале транзисторов с затвором на основе МДП-структуры и барьера Шоттки, получены аналитические функции, описывающие совокупности вольт-амперных характеристик полевых транзисторов. В предложенных функциях учтена полевая зависимость подвижности носителей в кремнии и арсениде галлия.

В слабых электрических полях дрейфовая скорость носителей в полупроводнике пропорциональна напряженности электрического поля [1]:

$$V_{\text{др}} = ?_0 E, \quad (1)$$

где $V_{\text{др}}$ — дрейфовая скорость носителей; $?_0$ — подвижность носителей в слабых полях; E — напряженность электрического поля.

При увеличении напряженности электрического поля зависимость дрейфовой скорости отклоняется от линейной [1].

Напряженность электрического поля в канале полевого транзистора (ПТ) тем больше, чем больше разность напряжений на электродах и меньше геометрические размеры транзисторной структуры. В связи с этим влияние насыщения дрейфовой скорости носителей в кремнии необходимо учитывать при описании вольт-амперных характеристик (ВАХ) мощных полевых транзисторов со структурой затвора металл-диэлектрик-полупроводник (МДП), имеющих рабочие напряжения затвора и стока, измеряемые десятками вольт [2, 3], а полевую зависимость подвижности носителей в арсениде галлия — при аппроксимации ВАХ полевых транзисторов с затвором Шоттки (ПТШ) с коротким каналом [1, 4].

Цель работы — разработка аналитической функции для аппроксимации вольт-амперных характеристик полевых транзисторов с учетом полевой зависимости дрейфовой скорости носителей.

Учет насыщения дрейфовой скорости носителей проведен при использовании упрощенной внутренней структуры ПТ, представленной на рис. 1.

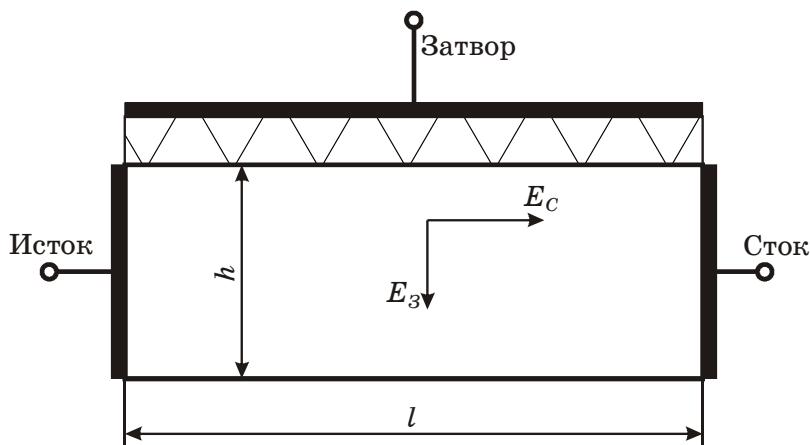


Рис. 1. Упрощенная структура полевого транзистора

Заштрихованная область под затвором представляет диэлектрик, изолирующий затвор от проводящего канала. Электрические поля, создаваемые электродами стока и затвора, обозначены соответственно E_c , E_3 . При условии постоянной глубины канала h по всей длине канала l ток в канале транзистора определяется по формуле [5]

$$I_c = ahqn? (E)E_c, \quad (2)$$

где a — ширина канала; q — заряд электрона; n — концентрация носителей; $? (E)$ — подвижность носителей, зависящая от напряженности поля в канале E .

Зависимость подвижности электронов от напряженностей полей затвора E_3 и стока E_c в кремнии описывается выражением [6]

$$? (E) = \frac{?_0}{1 + k_? (E_c E_3)^N}, \quad (3)$$

где $?_0$ — подвижность носителей в слабых полях; $k_?$, N — коэффициенты.

В рамках рассматриваемой структуры транзистора (рис.1) при пренебрежении толщиной диэлектрического слоя

$$E_c = \frac{U_c}{l}, \quad E_3 = \frac{U_3}{h}, \quad (4)$$

где U_c , U_3 — напряжения на стоке и затворе соответственно.

Подставляя (3) и (4) в (2), получим

$$I_c = \frac{I'_c}{1 + \left(\frac{U_3 U_c}{P} \right)^N}, \quad (5)$$

где $I'_c = ahqn\mu_0 E_c$; $P = hlk_?^{-\frac{1}{N}} = \text{const}$.

Сомножитель I'_c определяет ток в канале транзистора при условии постоянной подвижности, что соответствует условиям работы маломощных МДП-транзисторов и описанию их ВАХ выражением [7]

$$I'_c = A (U_3 - U_0)^B \left(1 - e^{-\frac{DU_c}{U_3 - U_0}} + FU_c \right), \quad (6)$$

где U_0 — пороговое напряжение; A , B , D , F — коэффициенты аппроксимации.

Подставляя (6) в (5), получим

$$I_c = \frac{A (U_3 - U_0)^B}{1 + \left(\frac{U_3 U_c}{P} \right)^N} \left(1 - e^{-\frac{DU_c}{U_3 - U_0}} + FU_c \right). \quad (7)$$

На рис. 2 приведены экспериментальная [8] и рассчитанные по (7) и формулам, приведенным в [9], передаточные характеристики МДП-ПТ типа КП907. В расчете по (7) использованы значения коэффициентов аппроксимации: $A = 138,2 \cdot 10^{-3}$ А/В^{1,21}; $B = 1,21$; $D = 0,81$; $F = 0,024$ В⁻¹, $P = 328$ В²; $N = 1$; $U_0 = 0$. Из сравнения приведенных графиков следует, что погрешность аппроксимации при использовании выражения (7) составляет 20 % и не превышает величины погрешности аппроксимации с помощью выражений из [9], полученных на основе решения интегрального уравнения тока в канале с учетом электрофизических параметров и особенностей топологической структуры мощных МДП-ПТ. Неточность, обусловленная принятым в приведенном выше анализе упрощенным представлением структуры ПТ, компенсируется в (7) подбором значений коэффициентов аппроксимации.

Преимущество предложенной аппроксимации (7) состоит в том, что она одним аналитическим выражением, а не двумя, как это предложено в [9], описывает всю совокупность ВАХ мощного МДП-ПТ. В подтверждение этого на рис. 3 приведено семейство экспериментальных и рассчитанных по (7) ($A = 34,8 \cdot 10^{-3}$ А/В^{1,2}; $B = 1,2$; $D = 0,6$; $F = 0,013$ В⁻¹, $P = 115,4$ В²; $N = 0,68$; $U_0 = 0$) характеристик МДП-ПТ типа КП907.

Арсенид галлия (GaAs) относится к полупроводниковым материалам, в которых под действием электрического поля возможен переход электронов зоны проводимости из низкоэнергетической долины с большой величиной подвижности в высокоэнергетические долины с меньшей подвижностью [1].

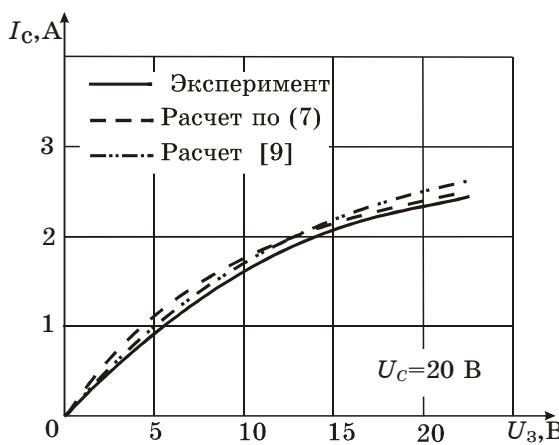


Рис. 2. Передаточные характеристики полевого транзистора

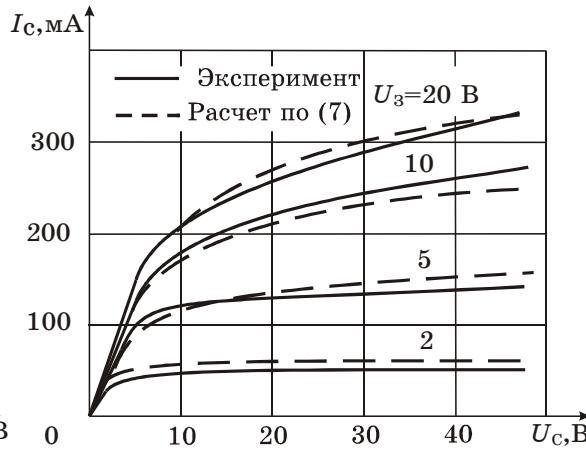


Рис. 3. Семейство ВАХ МДП-ПТ

На рис. 4 приведены графики зависимости дрейфовой скорости носителей V_{dp} , относительных заселенностей верхней $n_2 / (n_1 + n_2)$ и нижней $n_1 / (n_1 + n_2)$ долин от напряженности электрического поля E ($n_1 + n_2$ — общее количество носителей). Основываясь на упрощенной структуре ПТ (рис. 2), при использовании двухдолинной модели зоны проводимости [1] ток в канале определяется выражением

$$I_c = abq(n_1?_1 + n_2?_2)E_c, \quad (8)$$

где b — ширина канала; q — заряд электрона; $n_1, ?_1$ — заселенность и подвижность электронов в нижней долине; $n_2, ?_2$ — заселенность и подвижность электронов в верхней долине.

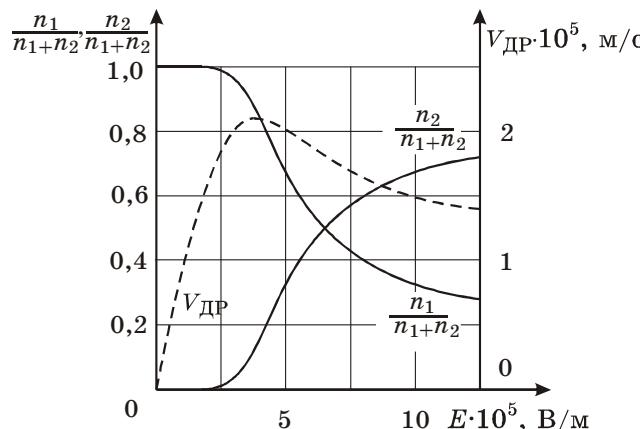


Рис. 4. Зависимость дрейфовой скорости носителей и заселенностей верхней и нижней долин от напряженности электрического поля

Введя в (8) обозначение $I_1 = abqn_2?_2E_c$, получим

$$I_c = I_1 \left[1 + \frac{?_1}{?_2} f(E) \right], \quad (9)$$

где $f(E) = \frac{n_1(E)}{n_2(E)}$ — зависимость отношения заселенностей электронов в нижней и верхней долинах от напряженности поля в канале ПТ.

График функции $f(E)$, построенный с использованием численных данных, приведенных в [1], показан на рис. 5 сплошной линией.

Предлагается эту зависимость аппроксимировать функцией

$$f(E) = k_1 e^{-k_2 E}, \quad (10)$$

где k_1, k_2 — коэффициенты.

График функции (10) при численных значениях коэффициентов, равных $k_1 = 5,65$ и $k_2 = 0,249$, изображен на рис. 5 пунктиром.

Электрическое поле в канале транзистора определяется векторной суммой двух взаимно перпендикулярных составляющих, образованных напряжениями на стоке и затворе [10]:

$$E = \sqrt{(E_c)^2 + (E_z)^2}. \quad (11)$$

Подставляя (10) и (11) в (9) с учетом (4) получим

$$I_c = I_1 \left[1 + Q e^{-\sqrt{R U_c^2 + T (|U_3| + \varphi_T)^2}} \right], \quad (12)$$

где $Q = \frac{k_1}{k_2} k_1$, $R = \frac{k_2^2}{l^2}$, $T = \frac{k_2^2}{h^2}$ — коэффициенты; φ_T — контактная разность потенциалов.

Составляющая тока стока I_1 образована носителями, находящимися в верхней долине и имеющими постоянное значение подвижности γ_1 . Электрофизические процессы образования этой составляющей аналогичны процессам формирования тока ПТ с «длинным» каналом, в котором полевая зависимость подвижности носителей не наблюдается. Следовательно, составляющая тока I_1 может быть описана выражением [7]

$$I_1 = A (U_3 - U_0)^B \left(1 - e^{-\frac{D U_c}{U_3 - U_0}} \right), \quad (13)$$

где U_0 — напряжение отсечки; A, B, D — коэффициенты аппроксимации.

Принятое в приближенной модели ПТ (см. рис. 1) допущение о постоянной глубине канала на практике не выполняется [1]. Эмпирически установлено, что неточность, вызванная принятым допущением, корректируется варьированием показателей степени подкоренного выражения (12) в пределах 1...3.

С учетом изложенного, выражение (12) преобразуется к следующему виду:

$$I_c = A (U_3 - U_0)^B \left(1 - e^{-\frac{D U_c}{U_3 - U_0}} \right) \left(1 + Q e^{-\sqrt{R U_c^{\Psi_1} + T (|U_3 + \varphi_T|)^{\Psi_2}}} \right), \quad (14)$$

где $A, B, D, Q, R, T, \Psi_1, \Psi_2$ — коэффициенты аппроксимации.

Экспериментально измеренные и рассчитанные по (14) ($A = 45,4 \cdot 10^{-3} \text{ A/B}^{1,44}$; $B = 1,44$; $D = 3,16$; $Q = 24,44$; $R = 9,41 \text{ B}^{-1,5}$; $T = 3,09 \text{ B}^{-2}$; $\Psi_1 = 1,5$; $\Psi_2 = 2$; $U_0 = -3,3 \text{ В}$) характеристики ПТШ типа АП602 приведены на рис. 6.

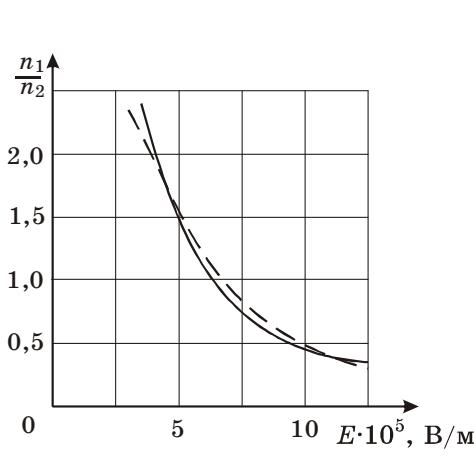


Рис. 5. Зависимость соотношения количества носителей в верхней и нижней долинах от напряженности электрического поля

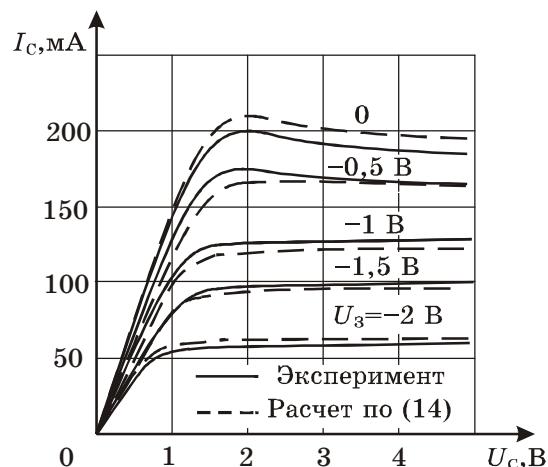


Рис. 6. Семейство ВАХ ПТШ

Погрешность аппроксимации не превышает 20 % в области допустимых напряжений на электродах ПТ, включая область выходных ВАХ, имеющую «падающие» участки, что принципиально отличает разработанную аппроксимацию от известных [11–13], не позволяющих описать отрицательный наклон ВАХ.

Предложенные аналитические выражения, описывающие семейства вольт-амперных характеристик, являются основой для построения нелинейных эквивалентных схем ПТ, с помощью которых осуществляется анализ нелинейных искажений сигналов в радиотехнических устройствах [14].

Таким образом, на основе совместного использования формальных аппроксимаций и результатов анализа физических процессов, протекающих в полупроводниковом материале транзисторов с затворами на основе МДП-структурь и барьера Шоттки, получены аналитические функции, описывающие совокупности вольт-амперных характеристик полевых транзисторов. В предложенных функциях учтена полевая зависимость подвижности носителей в кремнии и арсениде галлия.

Литература

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов / С. Зи. – Ч. 1. – М. : Мир, 1984. – 453 с.
2. Окснер Э.С. Мощные полевые транзисторы и их применение / Э.С. Окснер ; пер. с англ. под ред. В.Н. Мышляева. – М. : Радио и связь, 1985. – 287 с.
3. Мощные ВЧ и СВЧ МДП-транзисторы — импульсные приборы наносекундного диапазона / О.В. Сопов [и др.] // Электронная техника. Сер. 2. Полупр. приборы. – 1978. – Вып. 5–6. – С. 103–116.
4. Егудин А.Б. Расчет вольт-амперных характеристик полевого транзистора с коротким каналом / А.Б. Егудин // Электронная техника. Сер. 2. Полупр. приборы. – 1978. – Вып. 1. – С. 109–118.
5. Бочаров Л.Н. Полевые транзисторы / Л.Н. Бочаров. – М. : Радио и связь, 1984. – 80 с.
6. Молчанов А.А., Ходош Л.С. Влияние зависимости подвижности от поперечного поля на характеристики МДП-транзисторов / А.А. Молчанов, Л.С. Ходош // Изв. высш. учебн. зав. Сер. Радиоэлектроника. – 1970. – № 7. – С. 892–895.
7. Жаркой А.Г., Туев В.И. Аппроксимация вольт-амперных характеристик МДП-полевых транзисторов / А.Г. Жаркой, В.И. Туев // Изв. высш. учебн. зав. Сер. Радиоэлектроника. – 1988. – № 5. – С. 69–70.
8. Полупроводниковые приборы: транзисторы / В.А. Аронов [и др.] ; под ред. Н.Н. Горюнова. – М. : Энергоиздат, 1982. – 904 с.
9. Бачурин В.В. Нелинейная статическая модель мощного МДП-транзистора / В.В. Бачурин, В.П. Дьяконов, Т.А. Самойлова // Изв. высш. учебн. зав. Сер. Радиоэлектроника. – 1983. – № 11. – С. 44–46.
10. Chua L.O. Nonlinear lumped circuit model of GaAs MESFET / L.O. Chua, Y.W. Sing // IEEE Trans. : v. ED-30, 1983. – № 7. – Р. 825–833.
11. Копаенко В.К. Эквивалентная схема ПТШ для расчета нелинейных СВЧ-устройств / В.К. Копаенко, В.А. Романюк // Изв. высш. учебн. зав. Сер. Радиоэлектроника. – 1987. – № 1. – С. 47–50.
12. Tajima Y. GaAs FET large-signal model and its application to circuit design / Y. Tajima, B. Wrona, K. Mishima // IEEE Trans., 1981. – V. ED-28. – P. 171–175.
13. Старосельский В.И. Нелинейная модель арсенид-галлиевого полевого транзистора с затвором Шоттки / В.И. Старосельский // Радиотехника и электроника. – 1981. – № 6. – С. 1299–1300.
14. Жаркой А.Г., Туев В.И. Аппроксимация вольт-амперных характеристик GaAs ПТШ со стабильными областями отрицательного сопротивления / А.Г. Жаркой, В.И. Туев // Техника средств связи. Сер. Радиоизмерительная техника. – 1988. – Вып. 8. – С. 36–39.

Туев Василий Иванович

Докторант кафедры средств радиосвязи ТУСУРа
Телефон: (3822) 54 18 00
Эл. почта: tvi@tv2.tomsk.ru

V. Tuev

Carrier drift velocity saturation in approximations of FET's volt-ampere characteristic

In the base of joint use formal approximations and results of analysis of physical processes, going in semiconductor material of MOSFET and GaAs FET analytical functions, describing collections of FET's volt-ampere characteristic are received. In offereded functions mobility dependence of electrostatic intensity in silicon and arsenide gallium is taken into consideration.
