

## Полевой транзистор с длинным каналом со свойствами короткоканального транзистора

© А.В. Каримов<sup>¶</sup>, Д.М. Ёдгорова, О.А. Абдулхаев

Физико-технический институт Научно-производственного объединения „Физика–Солнце“  
Академии наук Республики Узбекистан,  
100084 Ташкент, Узбекистан

(Получена 12 ноября 2012 г. Принята к печати 4 апреля 2013 г.)

Приведены типичные данные параметров исследуемых образцов полевых транзисторов с длинным каналом, результаты измерений их функциональных характеристик, а также рассмотрены возможные распределения подвижности носителей заряда по толщине канала. Проведен теоретический анализ вольт-амперных характеристик длинноканальных полевых транзисторов с произвольным профилем легирования и с градиентом подвижности носителей заряда, а также с учетом насыщения скорости носителей заряда.

Функциональные характеристики полевого транзистора зависят от режимов включения и при этом в большинстве случаев определяются крутизной передаточной характеристики [1]. Поэтому при разработке полевого транзистора особое внимание обращается на получение высоких значений крутизны в заданной рабочей точке. Несмотря на то что во многих работах отмечено получение высоких значений крутизны, эти значения соответствуют нулевому смещению на затворе. Тогда как в реальных рабочих схемах полевые транзисторы в зависимости от назначения всегда включаются с определенным напряжением смещения. В соответствии с нелинейной зависимостью тока стока от запирающего напряжения величина крутизны последовательно уменьшается и вблизи отсечки канала приобретает низкие значения, хотя работа полевого транзистора выгодна именно при работе вблизи отсечки канала. Поэтому исследования необходимо направить на управление передаточной характеристикой так, чтобы получить как можно в большем интервале напряжений постоянные значения крутизны. Для сохранения высоких значений крутизны при заданном значении максимального тока стока напряжение отсечки должно быть как можно более низким. Для выяснения принципов управления передаточной характеристикой необходимо провести исследования на транзисторах с различным профилем распределения примесей и подвижности в канале.

В зависимости от технологии получения полевого транзистора создается характерное распределение подвижности носителей по толщине канала [2]. В работе [3] без учета характерной зависимости подвижности по толщине канала для любого полевого транзистора получены передаточные характеристики, которые практически не дают отличающихся кривых при допущении неоднородного распределения легирующих примесей в канале. Эти результаты являются справедливыми для полевых транзисторов с длинным каналом на основе кремния. Одна-

ко при экспериментальном изучении длинноканальных арсенид-галлиевых полевых транзисторов для структур с различными профилями распределения примесей в канале были получены отличающиеся друг от друга передаточные характеристики, которые невозможно объяснить с помощью существующих теоретических подходов. В частности, в полученных нами полевых транзисторах с концентрацией носителей, убывающей к поверхности канала, передаточные характеристики имеют близкие к линейной зависимости. Аналогичная зависимость наблюдается в полевых транзисторах с коротким каналом, где за счет насыщения дрейфовой скорости и выбора профиля легирования ослабляется зависимость глубины обеднения от напряжения затвора за исключением гетероструктурных полевых транзисторов, в которых существенными становятся обратные токи [4,5].

Из вышеизложенного следует, что нерешенными остаются вопросы обработки экспериментальных данных, достоверно характеризующих передаточные характеристики, существенно отличающиеся от квадратичных зависимостей получаемых с применением новых технологических приемов.

Цель данной работы — теоретический расчет передаточных характеристик, коррелирующий с экспериментальными зависимостями, полученными за счет технологически созданного управляемого неоднородного канала (градиент примеси, градиент подвижности носителей заряда, поверхностный потенциал).

В разд. 1 приведены параметры и конструкции исследуемых образцов и результаты измерений их характеристик, а также рассмотрены возможные распределения подвижности носителей заряда по толщине канала полевого транзистора. В разд. 2 проведен теоретический анализ вольт-амперных характеристик длинноканальных полевых транзисторов с произвольным профилем легирования и с градиентом подвижности носителей заряда. Анализ вольт-амперных характеристик полевых транзисторов с учетом насыщения скорости носителей заряда приведен в разд. 3.

<sup>¶</sup> E-mail: karimov@uzsci.net

## 1. Исследуемые экспериментальные образцы

С целью установления взаимосвязи закономерности расширения слоя объемного заряда от технологически задаваемых параметров канала были изготовлены полевые транзисторы с использованием новой технологии создания канала, легированного традиционными примесями: теллуром, оловом, а также одновременно теллуром и кремнием.

В полученных полевых транзисторах в качестве  $p^+$ -области использовали монокристаллический  $p^+$ -GaAs с концентрацией носителей заряда  $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , а область  $p$ -типа толщиной  $\sim 0.5 \text{ мкм}$  получалась выращиванием из раствора-расплава Ga +  $p$ -GaAs, с использованием источника  $p$ -GaAs, легированного Zn с концентрацией носителей  $7.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Толщина выращенных эпитаксиальных слоев  $n$ -GaAs равнялась  $0.5\text{--}1.5 \text{ мкм}$ . На их поверхности, для формирования омических контактов, выполняющих роли стока и истока, через маску напыляли Sn, а затем Ni. После нанесения контактных площадок к эпитаксиальному слою и омического контакта к затворной области  $p^+$ -GaAs осуществляли травление канала на необходимую глубину.

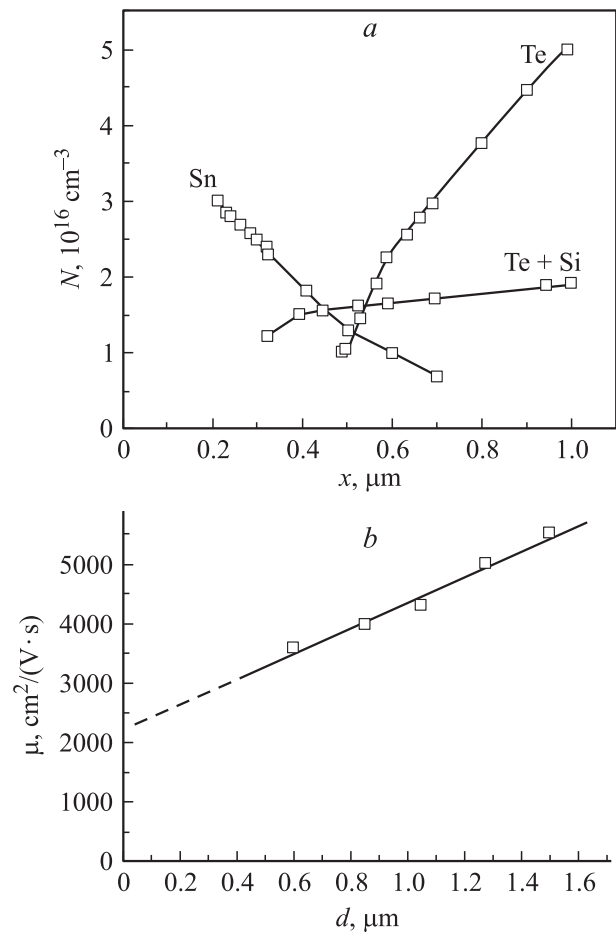
Технология получения исследуемых структур осуществлена по предложенному в работах [6,7] способу получения эпитаксиальных слоев концентрационным смешиванием растворов-расплавов, обеспечивающим получение заданного степенного распределения примесей (рис. 1, *a*).

Закономерности процесса смешивания растворов-расплавов задавались на основе формулы  $\xi = m_0 \gamma t^n$ . Путем подбора коэффициента  $\gamma$  и показателя степени  $n$  задавался профиль распределения примесей в канале в зависимости от состава легирующей примеси. На основании исследования зависимости емкости перехода затвор-канал от напряжения запирания были определены профили распределения носителей по толщине канала (рис. 1).

Для проверки существования в эпитаксиальных пленках градиента подвижности носителей по толщине пленки была исследована зависимость холловской подвижности от толщины эпитаксиального слоя (рис. 1, *b*). При этом толщина слоя управлялась постепенным прецизионным травлением этого слоя, а подвижность измеряли по методу тока Холла. Наблюдаемое уменьшение подвижности носителей по мере уменьшения толщины слоя можно объяснить увеличением плотности дефектов по мере приближения к границе подложка-пленка. Из этой зависимости можно найти действительный профиль подвижности носителей заряда:

$$\mu(x) = \bar{\mu}(x) + x\bar{\mu}'(x). \quad (1)$$

Как известно, поверхностные состояния, захватывая свободные носители заряда, приводят к образованию



**Рис. 1.** Профиль распределения примесей (*a*) и зависимость холловской подвижности носителей заряда от толщины слоя (*b*) в эпитаксиальных слоях, выращенных из растворов-расплавов.

поверхностного потенциала и к изгибу зон. В зависимости от знака поверхностного потенциала и типа основных носителей возможны два случая: аккумуляция основных носителей на поверхности или обеднение поверхности основными носителями, которые приводят к изменению проводимости слоя у поверхности. В обоих случаях изменение проводимости у поверхности можно представить как изменение „эффективной“ подвижности носителей заряда при сохранении однородности распределения концентрации носителей заряда. Такое представление влияния поверхности позволяет использовать при расчетах простую модель произвольного распределения легирующих примесей  $N(y)$  и подвижности носителей  $\mu(y)$  в канале полевого транзистора. В исследуемых нами образцах наблюдалось обеднение поверхности основными носителями, которую соответственно можно представить как отрицательный градиент „эффективной“ подвижности носителей. Передаточные характеристики, построенные на основе проведенных исследований стокзатворных вольт-амперных характеристик, приведены на рис. 2. Как видно из рисун-

ка, в зависимости от исследуемых полевых транзисторов, которые отличаются легирующими примесями (Te, Te + Si или Sn), передаточные характеристики характеризуются наряду с квадратичной зависимостью также линейностью в отличие от приведенных в литературе [3]. При этом токи насыщения некоторых структур (в частности, с отрицательным градиентом примесей) были значительно меньше, чем теоретически ожидаемые.

## 2. Расчет вольт-амперной характеристики полевого транзистора с неоднородным каналом

Принимая за основу предложенную Шокли модель полевого транзистора с  $p-n$ -переходом, имеющим два противоположно расположенных затвора, в работе [3] проведен анализ вольт-амперных характеристик. При этом принято приближение плавного канала, резкого края обедненного слоя и независимость подвижности носителей тока от электрического поля для различного распределения примеси по глубине канала. В результате для полевого транзистора с произвольным распределением примесей в канале получена близкая к квадратичной (со степенью 2–2.25) зависимость тока стока от запирающего напряжения [3], как показано на рис. 2, *a*. Откуда видно, что изменение профиля распределения примесей по глубине канала как при однородном, так и неоднородном распределении примесей дает близкие значения, т.е. не оказывает существенного влияния.

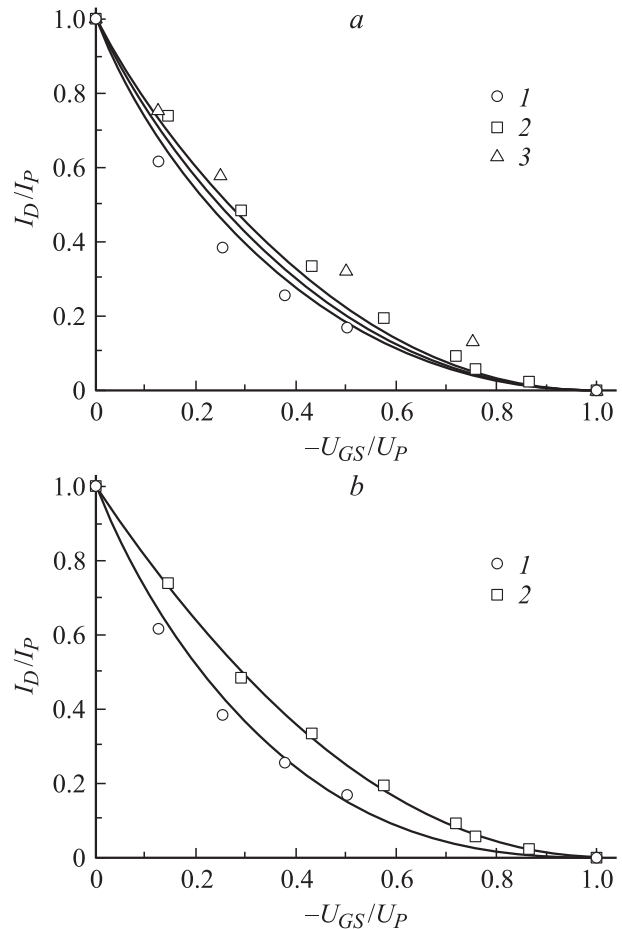
Нами проведен расчет вольт-амперной характеристики на основе модели полевого транзистора с произвольным распределением легирующих примесей  $N(y)$  и подвижностей носителей  $\mu(y)$  в канале (рис. 2, *b*). В этом случае приращение потенциала канала  $dV$  определяется как

$$dV = I_D dR = \frac{I_D dx}{qZ \int_a^0 N(y)\mu(y)dy}, \quad (2)$$

где  $I_D$  — ток канала,  $dR$  — приращение сопротивления канала,  $x$  — координата вдоль канала,  $y$  — координата по толщине канала,  $Z$  — ширина канала,  $a$  — толщина канала,  $h(x)$  — толщина области объемного заряда в точке  $x$ . Это приращение напряжения приводит, согласно уравнению Пуассона, к приращению толщины области объемного заряда управляющего перехода

$$dV = \frac{qhN(h)}{\epsilon\epsilon_0} dh. \quad (3)$$

Подставляя выражение (3) в (2) и интегрируя по  $x$  от 0 (истоковая граница канала) до  $L$  (стоковая граница канала), получим основное уравнение длинноканального



**Рис. 2.** Передаточные характеристики полевых транзисторов в отн. ед.: сплошные линии — расчет по формуле (7) при  $\mu = \text{const}$  (*a*) и при  $\mu = \mu_0 \pm \beta x$  (*b*); точки — экспериментальные данные: 1 — Te + Si ( $\mu = \mu_0 - \beta x$ ), 2 — Te ( $\mu = \mu_0 + \beta x$ ), 3 — Sn.

полевого транзистора:

$$I_D = \frac{q^2 Z}{\epsilon\epsilon_0 L} \int_{y_1}^{y_2} \left[ \int_0^a N(y)\mu(y)dy - \int_0^h N(y)\mu(y)dy \right] hN(h)dh. \quad (4)$$

Рассмотрим степенное распределение примесей в канале, который реализован в наших структурах и описывается формулой  $N = N_0 + ky^n$ , которую, введя обозначения ( $N = \tilde{N}/N_0$ ,  $y = \tilde{y}/a$ ,  $\alpha = N_a/N_0 - 1$ ), можно привести к безразмерному виду:

$$\tilde{N} = 1 + \alpha \tilde{y}^n. \quad (5)$$

Точно так же для подвижности носителей получим

$$\tilde{\mu} = 1 + \beta \tilde{y}^m. \quad (6)$$

Таким образом, для основного уравнения, описывающего ВАХ длинноканального полевого транзистора со

степенным профилем легирования в канале, из уравнения (4) получаем:

$$\begin{aligned} \tilde{I}_D &= f(u_1, u_2) \\ &= \left\{ 3 + \frac{3\alpha}{n+1} + \frac{3\beta}{m+1} + \frac{3\alpha\beta}{n+m+1} \right\} (u_2^2 - u_1^2) \\ &+ \left\{ \frac{6\alpha}{n+2} + \frac{6\alpha^2}{(n+1)(n+2)} + \frac{6\alpha\beta}{(n+2)(m+1)} \right. \\ &+ \left. \frac{6\alpha^2\beta}{(n+2)(n+m+1)} \right\} (u_2^{n+2} - u_1^{n+2}) - 2(u_2^3 - u_1^3) \\ &- \frac{6\alpha(n+2)}{(n+1)(n+3)} (u_2^{n+3} - u_1^{n+3}) - \frac{6\beta}{(m+1)(m+3)} \\ &\times (u_2^{m+3} - u_1^{m+3}) - \frac{6\alpha^2}{(n+1)(2n+3)} (u_2^{2n+3} - u_1^{2n+3}) \\ &- \frac{6\alpha\beta(n+2m+2)}{(m+1)(n+m+1)(n+m+3)} (u_2^{n+m+3} - u_1^{n+m+3}) \\ &- \frac{6\alpha^2\beta}{(n+m+1)(2n+m+3)} (u_2^{2n+m+3} - u_1^{2n+m+3}), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\tilde{I}_D = \frac{I_D}{I_{P0}}$  — ток стока в безразмерной единице,  $I_{P0} = \frac{Z(qN_0)^2\mu_0 a^3}{6\epsilon\epsilon_0 L}$  — ток отсечки канала для однородного распределения примесей. Введенные безразмерные величины  $u_1$  и  $u_2$  представляют отношение толщины области объемного заряда к общей толщине канала соответственно у истока и у стока ( $u_1 = \frac{h_{GS}}{a}$  и  $u_2 = \frac{h_{GD}}{a}$ ) и определяются из решения следующих уравнений:

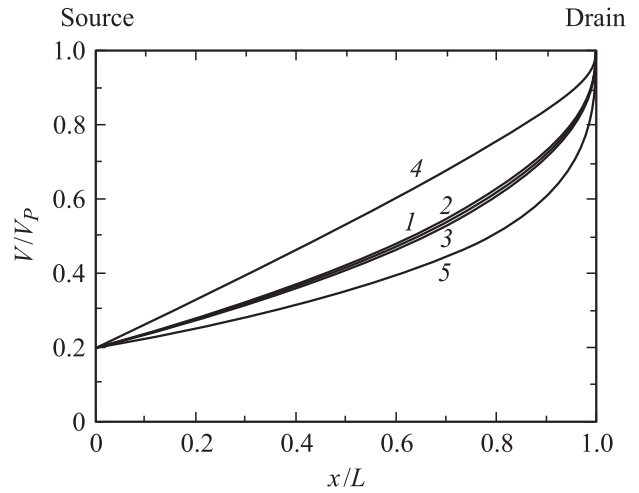
$$\frac{V_{GS} + V_K}{V_P} \left( 1 + \frac{2\alpha}{n+2} \right) = u_1^2 \left( 1 + \frac{2\alpha u_1^n}{n+2} \right), \quad (8)$$

$$\frac{V_{DS} + V_{GS} + V_K}{V_P} \left( 1 + \frac{2\alpha}{n+2} \right) = u_2^2 \left( 1 + \frac{2\alpha u_2^n}{n+2} \right). \quad (9)$$

Напряжение отсечки в полевом транзисторе со степенным распределением примесей можно определить, решив уравнение Пуассона:

$$\begin{aligned} V_P = V(h = a) &= \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \int_0^a yN(y)dy \\ &= \frac{qN_0 a^2}{2\epsilon\epsilon_0} + \frac{\alpha qN_0 a^2}{(n+2)\epsilon\epsilon_0} = V_{P0} \left( 1 + \frac{2\alpha}{n+2} \right), \end{aligned} \quad (10)$$

где  $V_{P0} = \frac{qN_0 a^2}{2\epsilon\epsilon_0}$  — напряжение отсечки для однородного распределения примесей. Как видно из формулы (10),  $V_P$  будет возрастать при положительном градиенте и будет иметь меньшие значения при отрицательном градиенте примесей. Соответственно ток отсечки канала увеличивается при положительном градиенте примеси и уменьшается при отрицательном.



**Рис. 3.** Распределение потенциала в канале при  $(V_{GS} + V_K)/V_P = 0.2$  и  $(V_{DS} + V_{GS} + V_K)/V_P = 1$ . 1 —  $N = \text{const}$  и  $\mu = \text{const}$ , 2 —  $N = N_0 + \alpha x$  и  $\mu = \text{const}$ , 3 —  $N = N_0 - \alpha x$  и  $\mu = \text{const}$ , 4 —  $N = \text{const}$  и  $\mu = \mu_0 + \beta x$ , 5 —  $N = \text{const}$  и  $\mu = \mu_0 - \beta x$ .

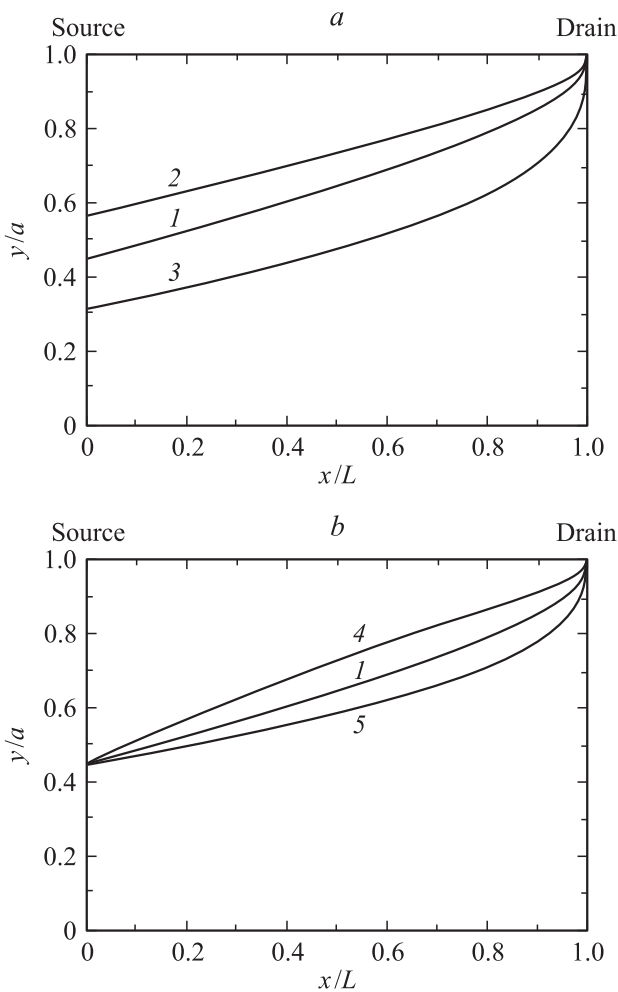
Уравнение (7) применимо только до точки, где еще существует нейтральный канал, т.е. при  $h(L) \leq a$ . При этом, когда

$$h(L) = a, \quad (11)$$

происходит „перекрытие“ канала и насыщение тока.

Таким образом, были проведены расчеты передаточных характеристик (по формуле (7) при  $u_2 = 1$ ) для длинноканальных полевых транзисторов с параметрами, которые соответствуют параметрам экспериментально исследованных структур: в предположении постоянной подвижности носителей по глубине канала (рис. 2, а) и в предположениях положительного и отрицательного градиента подвижности носителей по глубине канала (рис. 2, б). Как видно, результаты проведенных расчетов соответствуют экспериментальным данным только при предположении существования градиента подвижности носителей по глубине канала.

Так как толщина проникновения поверхностного потенциала зависит от концентрации атомов примеси у поверхности, для образца с положительным градиентом примеси влияние поверхности незначительно, и поэтому имеем положительный градиент подвижности, определяемый изменением плотности дефектов в выращенном слое, а для образцов с однородным распределением примесей или с отрицательным градиентом примеси влияние поверхности превалирует, и поэтому имеем отрицательный градиент подвижности носителей заряда. Эти выводы хорошо согласуются с наблюдаемыми экспериментальными зависимостями (рис. 2, б). Интегрируя уравнение (2) по  $x$  и принимая во внимание выражения (3) и (7), можно также найти распределение потенциала в канале и изменение толщины области объемного заряда управляющего перехода вдоль канала.



**Рис. 4.** Изменение толщины области объемного заряда управляющего перехода вдоль канала при  $(V_{GS} + V_K)/V_P = 0.2$  и  $(V_{DS} + V_{GS} + V_K)/V_P = 1$ . 1 —  $N = \text{const}$  и  $\mu = \text{const}$ , 2 —  $N = N_0 + \alpha x$  и  $\mu = \text{const}$ , 3 —  $N = N_0 - \alpha x$  и  $\mu = \text{const}$ , 4 —  $N = \text{const}$  и  $\mu = \mu_0 + \beta x$ , 5 —  $N = \text{const}$  и  $\mu = \mu_0 - \beta x$ .

Результаты таких расчетов для различных случаев неоднородного канала приведены на рис. 3, 4. Как видно, изменения в профиле распределения примесей, в отличие от изменений в профиле подвижности носителей заряда, практически не влияют на распределение потенциала в канале (рис. 3), что и приводит к независимости передаточной характеристики от профиля распределения примесей (рис. 2, а). Изменения в профиле распределения примесей влияют только на поперечную модуляцию толщины нейтральной части канала объемным зарядом управляющего перехода (рис. 4, а), тогда как изменения в профиле подвижности носителей заряда влияют на продольную модуляцию канала (рис. 4, б), и тем самым возникает возможность управления эффективной длиной канала (положительный градиент подвижности носителей увеличивает эффективную длину канала, и соответственно отрицательный градиент подвижности носителей укорачивает).

### 3. Влияние насыщения скорости носителей заряда на вольт-амперные характеристики полевого транзистора

При рассмотрении характеристик полевых транзисторов, как известно, надо также учесть зависимость подвижности носителей тока от величины электрического поля, которая приводит к насыщению дрейфовой скорости при больших значениях поля. Нами была использована традиционная кусочно-линейная аппроксимация этой зависимости. Насыщение скорости в первую очередь происходит на стоковой границе канала, где напряженность электрического поля наибольшая, т.е. при  $E(L) = E_s$ , которую, введя безразмерные переменные ( $\tilde{V} = V(x)/V_P$  и  $\tilde{x} = x/L$ ), можно привести к следующему виду:

$$\left. \frac{d\tilde{V}}{d\tilde{x}} \right|_{\tilde{x}=1} = \frac{1}{\gamma}, \tag{12}$$

где

$$\gamma = \frac{qa^2\bar{\mu}\bar{N}}{2\epsilon\epsilon_0v_sL}. \tag{13}$$

Следует отметить, что  $\gamma = 0$  соответствует приближению независимости подвижности от напряженности электрического поля, и чем больше  $\gamma$ , тем сильнее сказывается эффект насыщения дрейфовой скорости на характеристиках полевых транзисторов.

Как известно, ток насыщения полевого транзистора определяется толщиной области объемного заряда управляющего перехода ( $u_s = \frac{h_s}{a}$ ) в плоскости, разграничивающей область с постоянной подвижностью и с постоянной скоростью носителей, и, учитывая введенные обозначения, получаем

$$\tilde{I}_D = \frac{3}{\gamma} \left[ 1 - u_s + \frac{\alpha}{n+1}(1 - u_s^{n+1}) \right]. \tag{14}$$

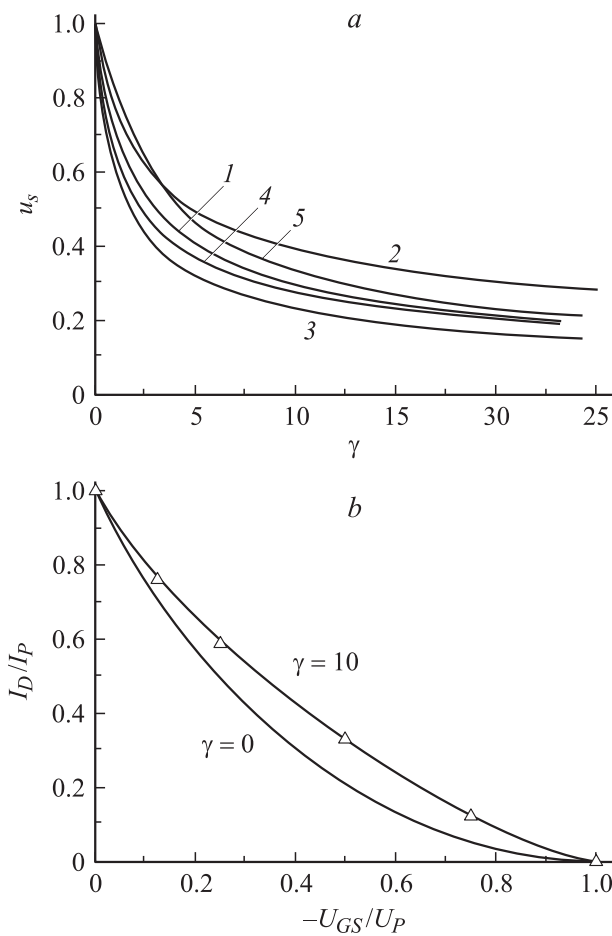
Также эта модель двух областей должна описывать и линейный участок вольт-амперных характеристик полевого транзистора, и следовательно в соответствии с уравнением (7)

$$\tilde{I}_D = \frac{L}{L_s} f(u_1, u_s), \tag{15}$$

где  $L_s$  — длина области с постоянной подвижностью носителей, также она определяется из условия непрерывности тока на границе областей с постоянной подвижностью и с постоянной скоростью носителей. Приравнивая выражения (14) и (15), получим соотношение, определяющее параметр  $\gamma$  через  $u_s$  и  $L_s$ :

$$\gamma = \frac{L_s}{L} \frac{3 \left[ 1 - u_s + \frac{\alpha}{n+1}(1 - u_s^{n+1}) \right]}{f(u_1, u_s)}. \tag{16}$$

Используя формулы (12)–(15), можно численно рассчитывать вольт-амперные характеристики таких структур,



**Рис. 5.** Зависимость толщины области объемного заряда управляющего перехода в плоскости, разграничивающей области с постоянной подвижностью и с постоянной скоростью носителей, от параметра  $\gamma$  (a) и передаточная характеристика полевого транзистора для различных значений параметра  $\gamma$  (точки — эксперимент) (b). 1 —  $N = \text{const}$  и  $\mu = \text{const}$ , 2 —  $N = N_0 + \alpha x$  и  $\mu = \text{const}$ , 3 —  $N = N_0 - \alpha x$  и  $\mu = \text{const}$ , 4 —  $N = \text{const}$  и  $\mu = \mu_0 + \beta x$ , 5 —  $N = \text{const}$  и  $\mu = \mu_0 - \beta x$ .

результаты соответствующих расчетов приведены на рис. 5. Там же для сравнения приведены данные эксперимента. Как видно, при малых значениях параметра модуляция канала (тем самым и вольт-амперная характеристика полевого транзистора) определяется преимущественно профилем подвижности носителей, тогда как при больших значениях параметра она определяется профилем концентрации примеси (рис. 5, a).

Следует отметить, что точки на рис. 5, b соответствуют полевому транзистору с каналом длиной 50 мкм, и легированному оловом с отрицательным градиентом, а также с высоким отрицательным градиентом подвижности носителей. При этом, хотя длина канала 50 мкм соответствует значению параметра  $\gamma$ , близкому нулю, высокий отрицательный градиент подвижности носителей приводит к укорочению эффективной длины канала и тем самым к увеличению значения параметра  $\gamma$  до 10.

## 4. Заключение

Проведен расчет передаточной характеристики длинно-канального полевого транзистора с управляющим  $p-n$ -переходом, объясняющий близкую к линейной зависимости передаточную характеристику, когда сток-затворные вольт-амперные характеристики становятся аналогичными, существующими у полевого транзистора с коротким каналом.

Показано, что при линейризации передаточной характеристики в области напряжений, близких к отсечке канала, крутизна транзистора будет больше, и при этом возрастает коэффициент усиления в энергетически выгодном режиме включения.

## Список литературы

- [1] А.В. Каримов. Электрон. техн., сер. 2. Полупроводниковые приборы, вып. 5, 93 (1990).
- [2] A.N. Aleshin, J.Y. Lee, S.W. Chu, J.S. Kim, Y.W. Park. Appl. Phys. Lett., **84** (26), 5383 (2004).
- [3] R.R. Vokemuehl. IEEE Trans. Electron. Dev., N 10, 31 (1963).
- [4] С.Б. Бурзин, Н.В. Гуминов, В.И. Старосельский, С.С. Шмелев. Микроэлектроника, **36** (4), 243 (2007).
- [5] С.Б. Бурзин, В.И. Старосельский, С.С. Шмелев. Микроэлектроника, **36** (5), 472 (2007).
- [6] Патент РУз № IAP 04059. А.В. Каримов, Д.М. Ёдгорова, Х.Н. Бахранов, Ф.А. Гиясова, Р.А. Саидова, Ш.А. Хайдаров. Расмий ахборотнома, № 2 (2009).
- [7] Д.М. Ёдгорова, А.В. Каримов, Р.А. Саидова, Ф.А. Гиясова, Ш.А. Хайдаров. Технология и конструирование в электрон. аппаратуре, № 6, 47 (2007).

Редактор Т.А. Полянская