

К. т. н. А. К. МАМЕДОВ

Азербайджанский технический университет, г. Баку  
E-mail: mamedov-az50@mail.ru

Дата поступления в редакцию  
17.01 2003 г.

Оппоненты к. т. н. Э. А. АЛЕСКЕРОВ (АТУ, г. Баку),  
к. ф.-м. н. В. В. КОВАЛЬЧУК  
(Южноукр. пед. ун-т им. К. Д. Ушинского, г. Одесса)

## РАСЧЕТ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С ЗАТВОРОМ ШОТТКИ НА ОСНОВЕ АМОРФНОГО ПОЛУПРОВОДНИКА

*Предложена математическая модель транзистора с затвором Шоттки на основе аморфных полупроводниковых слоев. Проведен расчет параметров и характеристик.*

В настоящее время в устройствах отображения информации в качестве переключающих элементов широко используются тонкопленочные полевые транзисторы (ТПТ) с затвором Шоттки на основе аморфных полупроводниковых слоев (например, гидрогенизированного аморфного кремния) [1]. Отличительной особенностью таких транзисторов является наличие затвора Шоттки со структурой "металл—аморфный полупроводник", в то время как традиционные транзисторы подобного типа имеют затвор Шоттки со структурой "металл—кристаллический полупроводник".

Известные математические модели [2] транзисторов с затвором Шоттки справедливы для затворов со структурой "металл—кристаллический полупроводник". Использование таких математических моделей для ТПТ с затвором Шоттки на основе аморфных полупроводниковых слоев неоправдано, т. к. полупроводниковые пленки в этом случае имеют разупорядоченную структуру [3], а контакт Шоттки металла с аморфной пленкой описывается математическими выражениями, отличными от соотношений, справедливых для контактов металла с кристаллическим полупроводником.

Целью настоящей работы является разработка математической модели ТПТ с затвором Шоттки на основе аморфных полупроводниковых слоев. Для решения этой задачи аналитически рассмотрен контакт Шоттки металла с аморфной полупроводниковой пленкой.

На рис. 1 представлена конструкция тонкопленочного транзистора. ТПТ содержит изолирующую прозрачную подложку 1 из стекла, слой 2 аморфного полупроводника, на котором размещены электрод 4 затвора и электроды 5, 3 стока и истока, соответственно.

Выходные вольт-амперные характеристики нормально открытых полевых транзисторов описываются соотношением [4, с. 198]

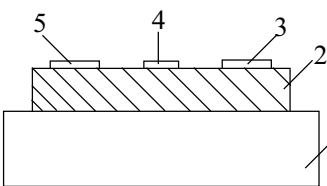


Рис. 1. Конструкция тонкопленочного транзистора

$$I_{\text{ст нас}} = \frac{Z\mu\epsilon\epsilon_0}{2aL} (V_{\text{зат}} + V_{\text{пор}})^2, \quad (1)$$

где  $I_{\text{ст нас}}$  — ток насыщения стока;  
 $Z, a, L$  — ширина, толщина и длина канала, соответственно;  
 $\mu$  — подвижность носителей;  
 $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость аморфной пленки;  
 $\epsilon_0$  — диэлектрическая постоянная;  
 $V_{\text{зат}}$  — напряжение на затворе;  
 $V_{\text{пор}}$  — пороговое напряжение.

Учитывая, что  $V_{\text{пор}} = V_{bi} - V_{\text{отс}}$ , где  $V_{bi}$  — величина встроенного потенциала;  $V_{\text{отс}}$  — напряжение отсечки канала, приведем выражение (1) к виду

$$I_{\text{ст нас}} = I_{\text{отс}} \left( \frac{V_{bi} + V_{\text{зат}}}{V_{\text{отс}}} - 1 \right)^2, \quad (2)$$

где  $I_{\text{отс}}$  — ток отсечки канала —

$$I_{\text{отс}} = (Z\mu\epsilon\epsilon_0/2aL)V_{\text{отс}}^2. \quad (3)$$

С учетом того, что напряжение насыщения на стоке определяется соотношением

$$V_{\text{ст нас}} = V_{\text{отс}} - V_{\text{зат}} - V_{bi}, \quad (4)$$

выражение (2) можно переписать в виде

$$I_{\text{ст нас}} = \frac{I_{\text{отс}} V_{\text{ст нас}}^2}{V_{\text{отс}}^2}, \quad (5)$$

который описывает стоковую характеристику полевого транзистора.

Для контакта "затвор—полупроводник" (см. рис. 1) потенциал  $\phi(x)$  (где  $x$  — координата, отсчитываемая от границы раздела "затвор—полупроводник", направленная в область обеднения) определяется разностью  $V_{bi} - V_{\text{зат}}$ . Если ширина обедненного слоя ( $W$ ) равна толщине канала ( $a$ ), тогда  $V_{\text{зат}} = V_{\text{пор}}$  и, следовательно,  $\phi(x) = V_{\text{отс}} = V_{bi} - V_{\text{пор}}$ . В этом случае для определения основных электрических параметров ТПТ ( $V_{\text{отс}}, I_{\text{отс}}, V_{\text{пор}}$ ), а также зависимости величины тока затвора ( $I_{\text{зат}}$ ) от напряжения на затворе ( $V_{\text{зат}}$ ), необходимо найти математическое соотношение для  $\phi(x)$  и ВАХ указанного выше контакта.

Математически такая задача сводится к решению дифференциального уравнения Пуассона в виде [5, с. 7]

$$\frac{d^2\phi(x)}{dx^2} = + \frac{q}{\epsilon\epsilon_0} [qg_0\phi(x) + N_t] \quad (6)$$

при начальных условиях

$$\frac{d\phi}{dx} = 0 \text{ и } \phi(x)=0 \text{ при } x=W, \quad (7)$$

где  $q$  — заряд электрона;

$g_0$  — плотность локализованных состояний;

$N_t$  — плотность состояний на моноэнергетическом уровне с энергией  $E_t$ .

Нетрудно показать, что общее решение линейного неоднородного дифференциального уравнения (6) имеет вид

$$\phi(x) = C_1 \cdot e^{\sqrt{q^2 g_0 / \epsilon \epsilon_0} x} + C_2 \cdot e^{-\sqrt{q^2 g_0 / \epsilon \epsilon_0} x} - \frac{q N_t}{q^2 g_0}, \quad (8a)$$

которое удобно представить в виде

$$\phi(x) = C_1 \cdot e^{\sqrt{B}x} + C_2 \cdot e^{-\sqrt{B}x} - \frac{P_0}{B}, \quad (8б)$$

где  $C_1, C_2$  — постоянные;  $B = \frac{q^2 g_0}{\epsilon \epsilon_0}$ ;  $P_0 = \frac{q N_t}{\epsilon \epsilon_0}$ .

Из соотношения (8б), учитывая начальные условия (7), получим:

$$C_1 = \frac{P_0}{2B} e^{-\sqrt{B}W}; \quad (9)$$

$$C_2 = \frac{P_0}{2B} e^{\sqrt{B}W}. \quad (10)$$

Подставляя значения  $C_1$  и  $C_2$  в общее решение (8) и учитывая, что  $(e^x + e^{-x})/2 = \text{ch}x$ , получим частное решение уравнения (6), представляющее собой выражение для распределения потенциала:

$$\phi(x) = \frac{P_0}{B} \left\{ \text{ch}[\sqrt{B}(W-x)] - 1 \right\}. \quad (11)$$

Из выражения (11) с учетом граничного условия  $\phi(x=0) = \phi_s$ , где  $\phi_s$  — поверхностный потенциал, имеем:

$$W = \frac{1}{\sqrt{B}} \text{arcch} \left( \frac{B \phi_s}{P_0} + 1 \right).$$

В частном случае, при  $N_t$ , стремящемся к нулю, из (11) имеем:

$$\phi(x) = \phi_s \cdot \exp[-\sqrt{B}x]. \quad (12)$$

Учитывая, что  $\phi(x=0) = \phi_s$ , из (11) получим:

$$\phi_s = \frac{P_0}{B} \left[ \text{ch}(\sqrt{B}W) - 1 \right]. \quad (13)$$

В соответствии с соотношением (13) для напряжения отсечки запишем:

$$V_{\text{отс}} = \frac{P_0}{B} \left[ \text{ch}(\sqrt{B}a) - 1 \right]. \quad (14)$$

Подставляя (14) в (3), получим:

$$I_{\text{отс}} = \frac{Z \mu \epsilon \epsilon_0 P_0^2}{2aLB^2} \left[ \text{ch}(\sqrt{B}a) - 1 \right]^2. \quad (15)$$

Определив  $V_{\text{отс}}$  из соотношения (14) и учитывая выражение для проводимости передачи полевых транзисторов с барьером Шоттки в области насыщения [4]

$$g_m = g_{\text{макс}} \left( 1 - \sqrt{\frac{V_{\text{зат}} + V_{bi}}{V_{\text{отс}}}} \right), \quad (16)$$

где  $g_{\text{макс}}$  — проводимость канала —

$$g_{\text{макс}} = \frac{q N_t \mu a Z}{L}, \quad (17)$$

нетрудно построить зависимость  $g_m$  от  $V_{\text{зат}}$ , которая характеризует передаточную возможность транзистора.

Для описания зависимости тока затвора ТПТ от напряжения на затворе необходимо описать ВАХ контакта металла с аморфной пленкой. Для этого воспользуемся выражением из [5, с. 38]

$$J_n = \frac{q N_c D_n [\exp(qV/kT) - 1]}{W} \int_0^W \exp[-q\phi(x)/kT] dx \quad (18)$$

где  $N_c$  — эффективная плотность состояний в зоне проводимости;

$D_n$  — коэффициент диффузии электронов;

$V$  — напряжение, приложенное к структуре;

$k$  — постоянная Больцмана;

$T$  — абсолютная температура;

$q\phi(x) = -[q\phi(x) + (E_c - E_f) + qV]$ ;

$E_c$  — дно зоны проводимости;

$E_f$  — уровень Ферми.

Воспользовавшись в выражении (12) линейным приближением к экспоненте  $e^{-y} = 1 - 0,77y$  и вычислив интеграл в знаменателе (18) с учетом (12), для тока контакта Шоттки получим:

$$J = \frac{0,77 q^2 N_c D_n \sqrt{B} (V_{bi} - V_{\text{зат}}) e^{-q\phi_{Bn}/kT} [e^{qV/kT} - 1]}{kT [1 - e^{-0,77q(V_{bi} - V_{\text{зат}})/kT}]}, \quad (19)$$

где  $\phi_{Bn}$  — высота барьера Шоттки при термодинамическом равновесии.

В соответствии с выражением (19) ВАХ контакта Шоттки металла с аморфной пленкой, а соответственно, и зависимость тока затвора тонкопленочного полевого транзистора от напряжения на затворе описывается уравнением Шокли [5]

$$J_{\text{зат}} = J_s [\exp(qV_{\text{зат}}/kT) - 1], \quad (20)$$

в котором плотность тока насыщения  $J_s$  определяется из соотношения

$$J_s = \frac{0,77 q^2 N_c D_n \sqrt{B} (V_{bi} - V_{\text{зат}}) e^{-q\phi_{Bn}/kT}}{kT [1 - e^{-0,77q(V_{bi} - V_{\text{зат}})/kT}]}. \quad (21)$$

На основе представленной математической модели проведен расчет основных характеристик и параметров ТПТ  $p$ -типа на основе органической пленки из фталоцианина. Этот тип ТПТ, по сравнению с известным на основе аморфного гидрогенизированного кремния, обеспечивает ряд преимуществ, а именно: повышение надежности работы, снижение стоимости изделия, упрощение технологии изготовления.

При расчете приняты следующие значения:  $L = 30$  мкм;  $Z = 1,54$  мм;  $a = 0,2$  мкм;  $N_t = 10^{15}$  см<sup>-3</sup>;  $\epsilon = 3$ ; собственная концентрация носителей заряда  $n_i = 10^8$  см<sup>-3</sup>;  $V_{bi} = 0,416$  В;  $g_0 = 10^{17}$  эВ<sup>-1</sup>·см<sup>-3</sup>;  $\mu = 10^{-2}$  см<sup>2</sup>/В·с.

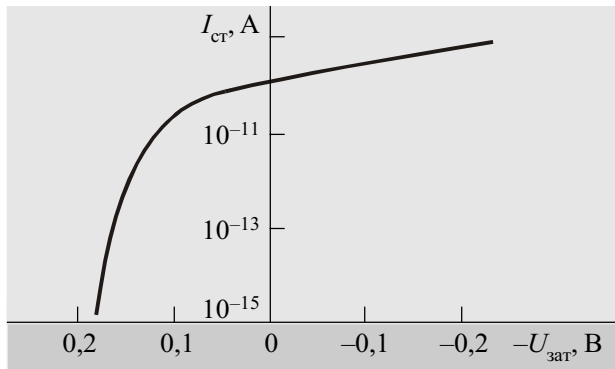


Рис. 2. Сток-затворная характеристика нормально открытого ТПТ

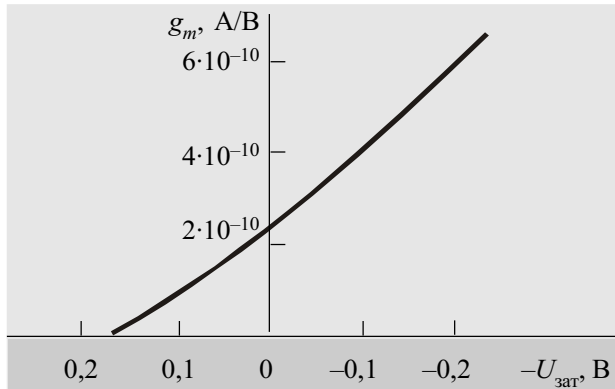


Рис. 4. Зависимость крутизны нормально открытого ТПТ в области насыщения от напряжения на затворе

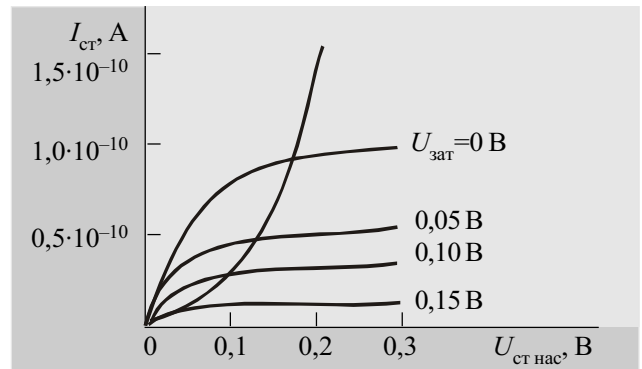


Рис. 3. Выходные ВАХ нормально открытого ТПТ для разных значений напряжений на затворе

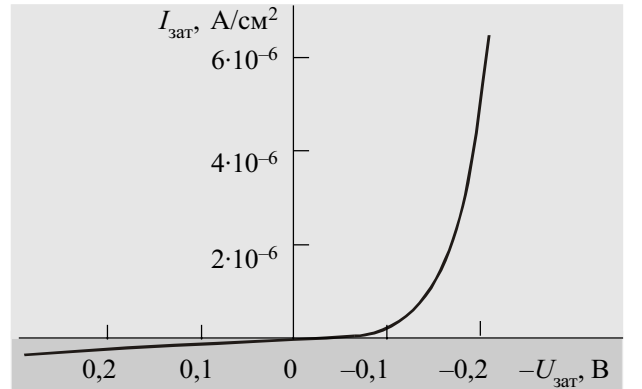


Рис. 5. Зависимость плотности тока нормально открытого ТПТ от напряжения на затворе

В соответствии с приведенными данными основные электрические параметры такого ТПТ имели следующие значения:  $V_{отс}=0,59$  В;  $g_{макс}=1,6 \cdot 10^{-9}$  А/В;  $I_{отс}=1,18 \cdot 10^{-9}$  А;  $V_{пор}=V_{отс} - V_{bi}=0,174$  В.

На основе представленных расчетных данных электрических параметров проведен расчет и построены основные характеристики указанного нормально открытого  $p$ -канального ТПТ, изображенные на рис. 2 — 5.

На рис. 2 приведена расчетная сток-затворная характеристика транзистора. Из характеристики следует, что отношение максимального тока стока  $I_{ст}$  в открытом состоянии к току утечки в закрытом состоянии, характеризующее переключательную способность транзистора, составляет  $I_{вкл}/I_{выкл}=2 \cdot 10^5$  и свидетельствует о возможности использования подобного транзистора в качестве переключательного элемента в устройствах отображения информации.

На рис. 3 представлены выходные ВАХ ТПТ для разных значений напряжений на затворе и зависимость тока насыщения стока от напряжения насыщения на стоке. На рис. 4 изображена зависимость крутизны ТПТ в области насыщения от напряжения на затворе. На рис. 5 представлена зависимость плотности тока затвора от напряжения на затворе. Из рисунка видно, что при обратных (положительных) смещениях на затворе ток затвора весьма мал и составляет величину порядка 0,1 нА (при  $V_{зат\ обр}=0,2$  В), а при прямом смещении на затворе 0,2 В увеличивается и составляет примерно 3 нА.

\*\*\*

Таким образом, разработана математическая модель тонкопленочных полевых транзисторов с затво-

ром Шоттки на основе аморфной полупроводниковой пленки, позволяющая рассчитывать их основные электрические параметры и характеристики. Получено выражение для распределения потенциала внутри области обеднения (т. е. под областью затвора), на основе которого определены соотношения для основных электрических параметров транзистора (напряжения и тока отсечки канала, порогового напряжения) и выражение для вольт-амперной характеристики (ВАХ) такого контакта, являющееся зависимостью тока затвора от напряжения на затворе транзистора. Указанные электрические параметры являются важной компонентой выражений выходных ВАХ, сток-затворных характеристик и зависимости проводимости передачи (крутизны) подобных транзисторов от напряжения на затворе.

Построение таких характеристик, в свою очередь, показало возможность использования подобного транзистора в качестве переключательного элемента в устройствах отображения информации.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Меден А., Шо М. Физика и применение аморфных полупроводников. — М.: Мир, 1991.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1. — М.: Мир, 1984.
3. Мамедов А. К. Определение плотности локализованных состояний в структурах металл—нелегированная органическая пленка с барьером Шоттки // Электронная техника. Сер. Микроэлектроника. — 1992. — Вып. 2—3. — С. 38—40.
4. Стриха В. И., Бузанева Е. В., Радзиевский И. А. Полупроводниковые приборы с барьером Шоттки. — М.: Сов. радио, 1974.
5. Мамедов А. К. Теория тонкопленочных структур с органическими слоями и элементы и устройства микроэлектроники на их основе. — Баку: Элм, 1999.