

## Наноструктуры и нанотехнологии в электронике

УДК 621.382.3

В.И. Тимофеев, д-р техн. наук, Г.В. Яременко

### Моделирование полевого транзистора на нанонитях

В статье приводится аналитическая модель полевого транзистора на кремниевых нанонитях с барьерными контактами Шоттки истока и стока. Модель диода Шоттки основывается на использовании процессов термоэлектронной полевой эмиссии при обратном электрическом смещении и термоэлектронного механизма эмиссии при прямом смещении. Представлены результаты расчетов и проведен анализ вольт-амперных характеристик транзистора.

In article the analytical model of the silicon nanowire field effect transistor with Schottky source and drain barrier contacts is resulted. The Schottky diode model is based on the processes of thermionic field emission for reverse bias and thermionic emission mechanism for forward bias. The results of simulation and the analysis of current-voltage characteristics are presented.

#### Введение

При создании современных наноэлектронных компонентов используются так называемые структуры низкой размерности: двумерные – в виде слоев наноскопических размеров, одномерные – квантовые нити или провода, и нульмерные – квантовые точки. Представляет интерес использование в качестве проводящего канала полевого транзистора квантовых нитей. Принцип действия полевого транзистора на основе нанонити подобен принципу действия традиционного транзистора, но каналом переноса носителей заряда является сама нанонить. Например, арсенид галлиевая нанонить, самоорганизованная в направлении кристаллографической оси  $\langle 110 \rangle$  на полуизолирующей подложке с высокой подвижностью электронов, используется в качестве канала полевого транзистора с барьером Шоттки [1]. Затвор формируется вокруг нанонити. При уровнях легирования  $1 \div 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  подвижность электронов может достигать эффективных значений более  $4500 \text{ см}^2/\text{Вс}$ .

Моделирование таких структур может быть связано с решением трехмерного уравнения Пуассона для потенциала в нанонити [1], при

этом решение двумерного уравнения Шредингера позволяет определить распределение подзон вдоль нанонити и волновые функции электронов. Используя неравновесные функции Грина и решая затем одномерное уравнение движения (что оправдано для «одномерной» квантовой системы в виде нанонити) находится плотность заряда электронов, которая затем учитывается в уравнении Пуассона для пересчета распределения потенциала и расчета тока. Такой достаточно строгий подход требует, однако, значительных вычислительных затрат, неустойчив при самосогласованном решении системы уравнений и оправдан в случае сложной топологии затвора [1,2]. В данной работе предложена упрощенная модель полевого транзистора для структуры с каналом в виде нанонити и барьерными контактами Шоттки истока и стока, что позволяет использовать ее для схемотехнического проектирования.

#### Модель транзистора

В работах [3,4] приводится структура полевого транзистора на кремниевых нанонитях с барьерными контактами Шоттки истока и стока и изолированным затвором. Особенностью конструкции транзистора является размещение канала в виде нанонити на лицевой, а изолированного затвора на обратной стороне транзистора (рис. 1). На подложку из кремния, которая сама является управляющим электродом (затвором), наносится тончайшая пленка защитного слоя – оксида кремния ( $t_{ox}$ ). На этой пленке расположены сток и исток в виде тонких проводников. Между этими проводниками располагается канал в виде нанонити длиной  $L$  и толщиной  $t_x$  с полупроводниковой проводимостью. Конструкция «кремниевая нанонить на изляторе» предоставляет новые возможности уменьшения размеров транзисторов, поскольку они позволяют полностью избавиться от «короткоканальных» эффектов (в частности, шунтирующего влияния полуизолирующей подложки) обеспечивая тем самым малые токи транзистора в закрытом состоянии.

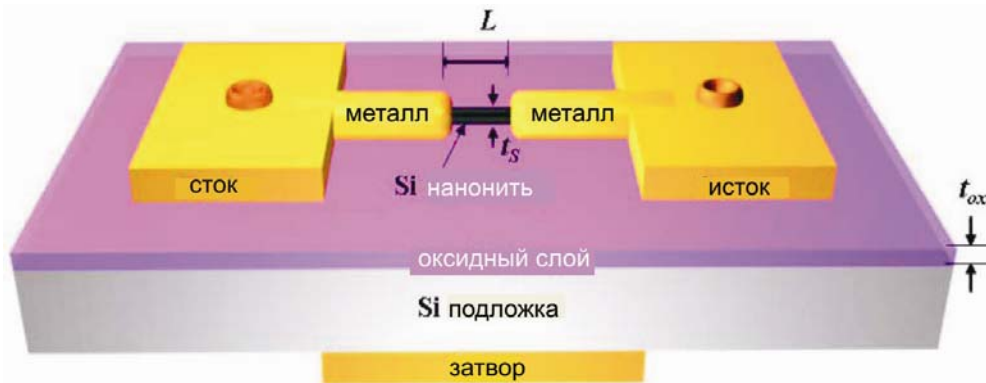


Рис. 1. Топология транзистора с кремниевой нанонитью

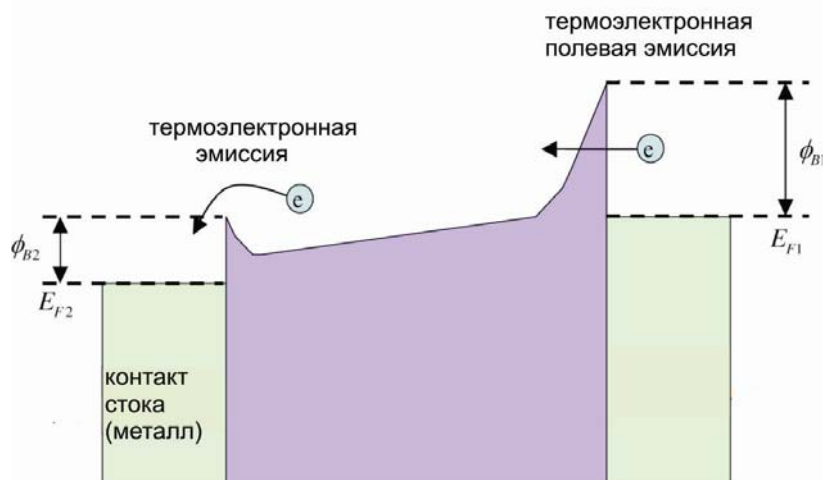


Рис. 2. Энергетическая диаграмма транзистора с каналом в виде кремниевой нанонити

Кремниевые нанонити характеризуются высокой подвижностью носителей и проводимостью, поэтому в предлагаемой модели пренебрегается падением напряжения в канале. Для описания физических процессов на барьерных контактах используется аналитическая модель термоэлектронной полевой эмиссии для обратных электрических смещений и термоэлектронной эмиссии для прямых смещений.

На рис.2 показана энергетическая диаграмма и механизмы переноса электронов в структуре «металл-кремниевая нанонить-металл» при положительном электрическом смещении сток-исток ( $V_{ds}$ ). Здесь величины  $\phi_{b1}$  и  $\phi_{b2}$  определяют высоту барьеров Шоттки между истоком и кремниевой нанонитью и между стоком и нанонитью соответственно. Каждый контакт между металлом и нанонитью представляет собой диод Шоттки, а кремниевая нанонить, проводимость которой управляется напряжением затвора, функционирует подобно полевой структуре «металл-окисел-полупроводник».

В приведенной структуре возможен как надбарьерный так и туннельный механизм протекания тока (в случае тонких барьеров). Вероятность туннелирования возрастает также при

высоких (более  $1 \cdot 10^{-17} \text{ см}^{-3}$ ) уровнях легирования. При низких температурах ток в прямом направлении определяется туннельным прохождением электронов с энергиями, близкими к энергии Ферми в полупроводнике. При достаточно высоких температурах, почти все электроны обладают энергией, достаточной для преодоления барьера. Тогда туннельная компонента тока становится малой и преобладающим становится механизм преодоления потенциального барьера вследствие надбарьерного переноса, который для полупроводников с высокой подвижностью электронов может быть описан в рамках теории термоэлектронной эмиссии.

Ток при прямом и обратном смещении диода Шоттки можно выразить с помощью уравнения термоэлектронной эмиссии [3-5]. Выходной ток транзистора с учетом модели термоэлектронной полевой эмиссии запишется:

$$I_{ds} = S \cdot J_s \cdot \exp(q \cdot V_{ds} / E_t) \quad (1)$$

В идеальной системе «металл-полупроводник» высота барьера зависит от электрического поля и концентрации примесей. В рамках теории термоэлектронной эмиссии ток контакта полностью определяется высотой барьера и не зависит от его формы.

Ток насыщения определяется как

$$J_s = q \frac{A \cdot \sqrt{(\pi \cdot E_{00})}}{kT} \sqrt{(V_{ds} + \phi_b)} \cdot \exp\left(-\frac{\phi_b}{q \cdot E_0}\right) \quad (2)$$

$$E_{00} = 1.85 \cdot 10^{-12} \left(\frac{N_D}{m_{00} \cdot \epsilon_s}\right)^{1/2} \quad (3)$$

$$E_0 = E_{00} \cdot \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right) \quad (4)$$

$$E_t = E_{00} \cdot \left[\frac{E_{00}}{kT} - \tanh\left(\frac{E_{00}}{kT}\right)\right] \quad (5)$$

где  $S$  – площадь канала,  $q$  – заряд электрона,  $V$  – падение напряжения на барьере Шоттки,  $A$  – константа Ричардсона,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура,  $\phi_b$  – высота барьера Шоттки,  $N_D$  – концентрация донорной примеси,  $m_{00}$  – эффективная масса электронов в нанонити,  $\epsilon_s$  – относительная диэлектрическая проницаемость нанонити.

Для определения влияния напряжений  $V_{gs}$  и  $V_{ds}$  на высоту барьера Шоттки и ток стока необходимо знать распределение потенциала в канале транзистора, решая уравнение Пуассона. В простейшем случае выражение для высоты барьера Шоттки можно представить в виде следующей аппроксимации:

$$\phi_b = \phi_{b0} - (0,01V_{ds} + 0,4V_{gs} + 0,01)^{1/2}, \quad (6)$$

где  $\phi_{b0}$  – высота барьера Шоттки в отсутствие электрического поля. Здесь постоянные коэффициенты под знаком корня являются построчными

параметрами и идентифицируются по результатам сравнения с экспериментальными вольт-амперными характеристиками транзистора. Как видно из формулы (2) туннельный ток через параметр  $E_{00}$  экспоненциально зависит от  $\sqrt{N_D}$ .

Следует отметить, что при наноразмерных барьерных контактах истока и стока увеличиваются требования к однородности контактов в плоскости, перпендикулярной плоскости токопереноса. Кроме того, при больших обратных смещениях на барьерном контакте возможен резкий рост тока за счет лавинного пробоя в области пространственного заряда. В приведенных расчетах не учитываются падения напряжения на паразитных сопротивлениях контактов истока и стока.

### Результаты моделирования

Для описания модельной структуры использовались следующие параметры: длина канала  $L=2$  мкм, ширина канала  $W=20$  нм, толщина нанонити  $t_s = 1$  мкм, толщина оксидного слоя  $t_{ox}=100$  нм, концентрация донорной примеси  $N_D = 1 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Приведенные параметры могут также использоваться в аналитической аппроксимационной модели для оценки значения входной емкости [4]:  $C \sim 2\pi\epsilon_{ox} / (W \ln(t_{ox} / (t_s/2)))$ . На рис.3 показаны вольт-амперные характеристики транзистора с донорным легированием канала и вольфрамовыми контактами для различных значений напряжений затвор-исток ( $V_{gs}$ ), рассчитанные по формулам (1)-(6).

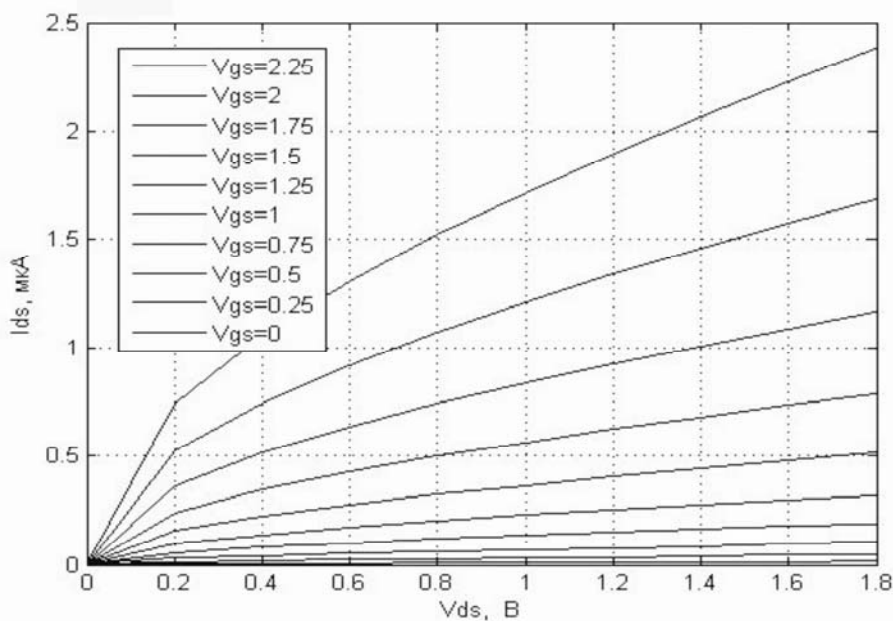


Рис. 3. Выходные вольт-амперные характеристики транзистора на нанонити

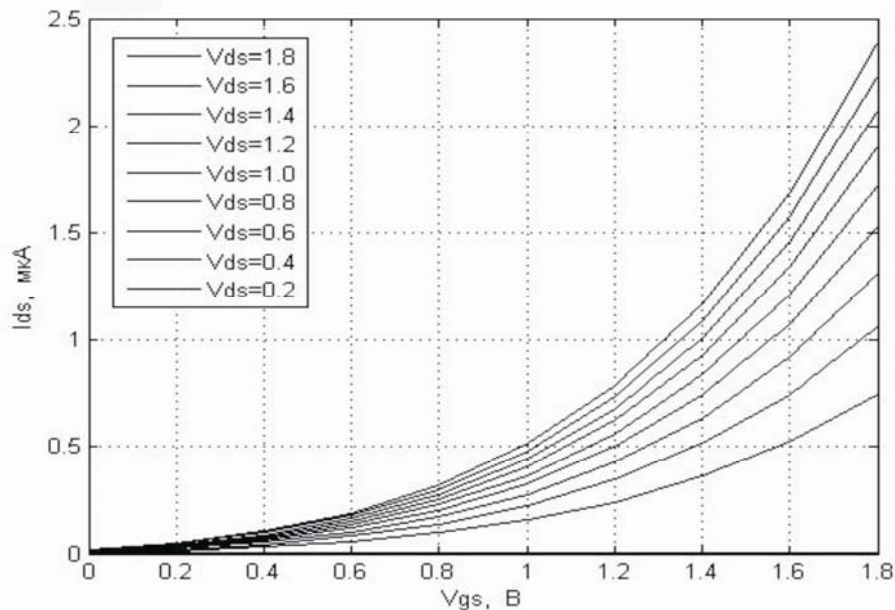


Рис. 4. Сток-затворные характеристики транзистора на нанонити

Особенности рассматриваемого транзистора и приведенных вольт-амперных характеристик заключаются в режиме работы. Отпирание транзистора связано с положительными управляющими электрическими смещениями на затворе. Для структуры транзистора на нанонити с заданными выше электрофизическими параметрами напряжение отсечки тока лежит в пределах 2 В.

В сравнении с результатами работы [4], где приводятся, в том числе, экспериментальные данные для различных структур транзисторов, можно утверждать об удовлетворительном описании выходных и сток-затворных характеристик как по уровню токов, так и по характеру зависимостей.

На рис.4 приведены сток-затворные характеристики транзистора на нанонити для различных значений напряжений сток-исток.

Идентификация параметров модели, включая подстроечные, возможна с применением процедуры оптимизации при известных экспериментальных характеристиках в широком диапазоне питающих напряжений.

Для анализа характеристик транзистора в частотной области по известным статическим характеристикам могут быть определены в малосигнальном приближении крутизна вольтамперной характеристики и выходная проводимость транзистора.

## Выводы

В статье приведена аналитическая модель и статические характеристики полевого транзистора на кремниевых нанонитях с барьерными контактами Шоттки, описанными в виде моде-

лей на основе механизмов термоэлектронной полевой эмиссии и термоэлектронной эмиссии с учетом влияния на высоту барьера Шоттки напряжений затвор-исток и сток-исток. Модель пригодна для расчета малосигнальных параметров транзистора и использования в пакетах схемотехнического проектирования.

## Литература

1. S. A. Fortuna, X. Li . GaAs MESFET With a High-Mobility Self-Assembled Planar Nanowire Channel // IEEE Electron Device Letters. — 2009—V.30.—№ 6.—P.P.593—595.
2. J. Wang, E. Polizzi, M. Lundstrom. A three-dimensional quantum simulation of silicon nanowire transistors with the effective-mass approximation // Journal of Applied Physics. — 2004—V. 96.—№ 4.—P.P.2192—2203.
3. D.S. Kim, Y.C. Jung, M.Y. Park, B.S. Kim, S.H. Hong, M.S. Choi, M.G. Kang, D. Whang, S.W. Hwang. Electrical Characteristics of the Backgated Bottom-Up Silicon Nanowire FETs // IEEE Transactions On Nanotechnology.— 2008.—V.6, №7—P.683-687.
4. Lee S.H., Yu Y.S., Hwang S.W., Ahn D. A SPICE-Compatible New Silicon Nanowire Field-Effect Transistors (SNWFETs) Model // IEEE Transactions On Nanotechnology.— 2009.—V.8, №5—P.643-649.
5. Zu C. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах. Кн. 2. Пер. с англ. — М.: Мир, 1984. — 456 с.