

ФИЗИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ТЕХНОЛОГИИ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР

УДК 621.382.323

Д. В. Щукин, Н. И. Михайлов, В. В. Перепеловский, Я. Н. Паничев Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

В. В. Марочкин *Pixpolar Oy (Санкт-Петербург)* 

И. С. Пушница, О. Р. Фазылханов АО «Светлана-Рост»

## Исследование параметров полевого транзистора с затвором Шотки в среде Synopsys Sentaurus TCAD

Приведено исследование параметров полевого транзистора с затвором Шотки и гетероструктурой AlAs/GaAs в среде Synopsys Sentaurus TCAD. Проведено моделирование эффектов, связанных со статическим разбросом параметров транзистора. При моделировании расчет полупроводниковых структур сводится к решению методом конечных элементов известных фундаментальных уравнений. Расчет проводился с учетом гидродинамической модели. При исследовании учитывались следующие параметры модели: влияние поверхностных зарядов, радиационная рекомбинация, рекомбинация Шокли-Рида-Холла, распределение концентрации носителей заряда по закону Гаусса и др. Представлена часть программного кода, отвечающая за описанные параметры. В результате проведенных исследований найден ряд параметров, оказывающих наибольшее влияние на характеристики транзистора и требующих тщательного экспериментального определения.

## Полевой транзистор, гетероструктура, гидродинамическая модель, затвор Шотки, AlAs/GaAs, Synopsys TCAD

Параметры транзистора для большинства технологических процессов неизбежно имеют вариацию значений. В итоге это приводит к разбросу параметров интегральной схемы (ИС) около номинальных значений, указанных в спецификации. Микросхемы, параметры которых не удовлетворяют границам допустимых значений, уходят в брак (параметрический брак). Моделирование эффектов, связанных со статистическим разбросом параметров, ставит перед собой целью получение параметрической надежности проектируемых ИС.

Существующие экспериментальные методики позволяют с хорошей степенью достоверности и без существенных затрат измерить только часть параметров, остальные находятся на основе косвенных измерений. Каждый параметр в большей или меньшей степени влияет на точность итоговых характеристик. Поэтому актуальной является задача выявления критических параметров, которые существенно влияют на характеристики разрабатываемого элемента ИС. Эта задача может быть решена с помощью параметрического исследования.

Описание математической модели. В системах приборно-технологического моделирования расчет полупроводниковых структур сводится к решению методом конечных элементов известных фундаментальных уравнений [1]. Приведем некоторые из них. Уравнение Пуассона:

$$\operatorname{div} \varepsilon \operatorname{grad} \psi = -q \left( p - n + N_{D+} - N_{A-} \right).$$

Уравнения непрерывности для электронов и дырок:

div 
$$\overline{J_n} = -q(G-R) + q\frac{\partial n}{\partial t}$$
,  
div  $\overline{J_p} = q(G-R) + q\frac{\partial p}{\partial t}$ .

Уравнения переноса:

$$\overline{J_n} = q\mu_n \left( n \left( \operatorname{grad} E_C \right) \right) + kT_n \left( \operatorname{grad} n \right) + kn \left( \operatorname{grad} T_n \right) - \frac{3}{2} nkT_n \operatorname{grad} \left( \ln m_e \right),$$
  
$$\overline{J_p} = q\mu_p \left( p \left( \operatorname{grad} E_V \right) \right) + kT_p \left( \operatorname{grad} p \right) + kn \left( \operatorname{grad} T_p \right) - \frac{3}{2} pkT_p \operatorname{grad} \left( \ln m_h \right).$$

Все обозначения общепринятые и соответствуют приведенным в [1].

Технологический процесс изготовления транзисторов с проектной нормой 1 мкм построен на базе стандартной эпитаксиальной структуры типа GaAs MESFET с использованием четырехслойной металлизации с двумя уровнями разводки.

Параметрическое исследование полевого транзистора с затвором Шотки (ПТШ) проводилось в среде Synopsys Sentaurus TCAD. Топология полевого транзистора Шотки с гетероструктурой AlAs/GaAs представлена на рис. 1. Контакты истока и стока сформированы с помощью сплава, обеспечивающего омический контакт с активным эпитаксиальным слоем арсенида галлия. Поверхность изолирована от внешней среды тонким слоем нитрида кремния. Затвор обеспечивает выпрямляющий контакт (контакт с барьером Шотки) с активным слоем *n*-GaAs. Между активным слоем арсенида галлия *п*-типа и подложкой сформированы буферные слои арсенида галлия р-типа и гетерослои AlAs/GaAs. Подложка выполнена из полуизолирующего арсенида галлия марки Freiberger-VGF ориент. (100) EPD < 5000 см<sup>-2</sup>, толщина  $625 \pm 25$  мкм.

Параметры транзистора предоставлены АО «Светлана-Рост» и приведены в табл. 1.

Параметр	Значение	Единица измерения
Концентрация поверхностных зарядов	-10 <sup>12</sup>	см <sup>-2</sup>
Плотность поверхностных состояний	0	$ m 3B^{-1} \cdot cm^{-2}$
Толщина Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0.1	МКМ
Расстояние исток-затвор	1.5	МКМ
Расстояние затвор-сток	2	МКМ
Сопротивление контактов	10	Ом
Длина затвора	1	МКМ
Ширина затвора	300	МКМ
Толщина канала	0.2	МКМ
Толщина второго буферного <i>р-</i> слоя	0.7	МКМ
Толщина гетероструктуры AlAs/GaAs	0.25	МКМ
Толщина первого буферного <i>р-</i> слоя	0.1	МКМ
Концентрация в <i>п</i> -канале	$2 \cdot 10^{17}$	см <sup>-3</sup>
Концентрация в <i>р</i> -буфере	$1 \cdot 10^{14}$	см <sup>-3</sup>
Подвижность электронов	2700	$cM^2/(B \cdot c)$
GaAs-подложка	Полуизолятор марки Freiberger-VGF ориент. (100) EPD <5000 см <sup>-2</sup> , толщина 625 ± 25 мкм, P/E, основной срез EJ (0-1-1)±1.0°, дополнительный срез EJ (0-11)+5.0°	

При исследовании учитывались следующие параметры модели (курсивом представлена часть программного кода, отвечающая за описанные параметры):



Таблииа 1

• Влияние поверхностных зарядов: *Physics* (*MaterialInterface* =  $"Si_3N_4/GaAs"$ ) {*Traps*((*FixedCharge Conc* = -1e + 12))}. • Структура моделировалась в окружении вакуума; (sdegeo:create-rectangle (position -0.5 -0.5 0.0 )(position 7.0 8 0.0) "Vacuum" "region vac"). • Барьер Шотки; {*Name="gate" Voltage = 0.0 Schottky Barrier =* = 0.78. • При моделировании гетерослоев учитывалась тонкопленочность модели (ThinLaver); *Physics*(*Material* = "*AlAs*") *{Mobility* (Dopingdependence ThinLayer)}. • Расчет проводился с учетом гидродинамической модели (Hydrodynamic).

• Модель подвижности – HighFieldSaturation CarrierCarrierScattering.

• Использовались термоэмиссионные условия интерфейса (Thermionic).

• Радиационная рекомбинация (Recombination (Radiative));

Physics { AreaFactor = 500 Hydrodynamic Mobility(

HighFieldSaturation CarrierCarrierScattering) EffectiveIntrinsicDensity (NoBandGapNarrowing) Recombination (SRH Auger Radiative) HeteroInterface Thermionic}.

• Рекомбинация Шокли–Рида–Холла (Recombination (SHR));

*Physics*(*RegionInterface* = "*region\_GaAs\_n1/re-gion\_GaAs\_p1*")

{*Recombination*(*SurfaceSRH*)}.

 Распределение концентрации носителей заряда по закону Гаусса;

(sdedr:define-gaussian-profile "Impl.Extprof" DopSD "PeakPos" 0"PeakVal" 1e18

"ValueAtDepth" 1e16 "Depth" XjExt "Gauss" "Factor" 0.2).

• Управление параметром ошибок; *Math* {

Extrapolate Digits = 5

*Notdamped* = 50*Iterations* = 20*RelErrControl* ErrRef(Electron) = 1e15ErrRef(Hole) = 1e15RelTermMinDensity = 1e15*RelTermMinDensityZero* = 1*e*15 *NumberOfThreads* = 40 }. • Задание сопротивления контактов; Resistor pset r1 (out v1) {resistance = 0.001} Resistor pset r2 (src 0) {resistance = 10}. • Размеры и параметры вычислительной сетки; (sdedr:define-refeval-window "RefEval-Win AlGaAs" "Rectangle" (position 0 0.9 0) (position 6.5 1.15 0)) (sdedr:define-multibox-size "MultiboxDefinition AlGaAs" 0.02 0.02 0.01 0.01 1.45 1.45) (sdedr:define-refeval-window "RefEvalWin UP" "Rectangle"  $(position \ 0 \ 0 \ 0) (position \ 6.5 \ 1.25 \ 0))$ (sdedr:define-multibox-size "MultiboxDefinition UP" 0.04 0.04 0.02 0.02 1.45 1.45) (sdedr:define-refeval-window "RefEvalWin whole" "Rectangle" (position - 0.5 - 0.5 0) (position 7.0 8 0))(sdedr:define-refinement-size "RefinementDe-

finition\_whole" 0.4 0.4 0.3 0.3).

Подробное описание используемых функций программного кода содержится в [1], [2].

Каждому из параметров модели полевого транзистора с затвором Шотки поочередно задавалось приращение в  $\Delta 10$  %, при этом другие параметры оставались неизменными.

Изменялись следующие параметры:

 – сдвиг затвора относительно заданного положения: затвор сдвигался на 0.1 мкм в сторону стока и истока;

- концентрация электронов (примеси) в гетерослоях AlAs/GaAs: AlAs – 9e + 14 см<sup>-3</sup> и 1.1e + 15 см<sup>-3</sup>, GaAs – 9e + 11 см<sup>-3</sup> и 1.1e + 12 см<sup>-3</sup>;

– концентрация электронов (примеси) активного слоя *n*-GaAs:  $1.8e + 17 \text{ см}^{-3}$  и  $2.2e + 17 \text{ см}^{-3}$ ;

– поверхностный заряд: –9e + 11 см<sup>-2</sup> и –1.1e + + 12 см<sup>-2</sup>;

 длина транзистора (длина истока и стока):
 изменялась на 0.65 мкм со стороны истока и стока, с сохранением расстояний сток-затвор и затвор-исток;

- количество гетерослоев AlAs/GaAs: 0, 9, 11.

Физическая электроника и технологии микро- и наноструктур



Таблица 2

Изменяемый параметр	Ток насыщения, мА	Крутизна ВАХ, мА/В
Экспериментальная ВАХ	35.7829	26.38963
Увеличение длины стока с сохранением расстояния между стоком и затвором	35.7811	26.38786
Увеличение длины истока с сохранением расстояния между истоком и затвором	35.7143	26.31657
Уменьшение длины стока с сохранением расстояния между стоком и затвором	35.8157	26.41087
Уменьшение длины истока с сохранением расстояния между истоком и затвором	35.7732	26.35805
Сдвиг затвора (в сторону стока)	35.5783	26.21969
Сдвиг затвора (в сторону истока)	35.8929	26.47095
Концентрация гетерослоев AlAs/GaAs (уменьшение)	35.7957	26.39973
Концентрация гетерослоев AlAs/GaAs (увеличение)	35.7702	26.37884
Концентрация слоя <i>n</i> -GaAs (уменьшение)	29.9556	21.25554
Концентрация слоя <i>n</i> -GaAs (увеличение)	41.6474	31.61285
Поверхностный заряд (уменьшение)	35.8633	26.42842
Поверхностный заряд (увеличение)	35.6965	26.34695
Количество гетерослоев (уменьшение)	35.7077	26.33794
Количество гетерослоев (увеличение)	35.9197	26.47015
Структура без гетерослоев	33.8238	24.82059

ной ВАХ с вольт-амперными характеристиками, полученными при изменяемых на Δ10 % параметрах. Для каждого изменяемого параметра по полученной ВАХ были определены: ток насыщения и крутизна вольт-амперной характеристики. Результаты параметрического исследования ПТШ представлены в табл. 2.

По результатам параметрического исследования ПТШ можно сделать выводы:

– к наибольшему изменению тока насыщения
 ~6 мА приводит изменение концентрации активного слоя *n*-GaAs;

– изменение концентрации примеси в гетерослоях AlAs/GaAs на  $\Delta 10$  % приводит к разбросу тока насыщения в ~0.02 мА;

1. Перепеловский В. В., Михайлов Н. И., Марочкин В. В. Разработка электронных устройств в среде Synopsys Sentaurus TCAD: лаб. практикум. СПб.: Издво СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. при вариации топологии ПТШ наибольшее
 влияние оказывает увеличение длины истока
 (~0.07 мА) и уменьшение длины стока (~0.03 мА);

 – к разбросу тока насыщения в ~0.08 мА приводит изменение поверхностного заряда;

 – отсутствие всех слоев AlAs/GaAs в полевом транзисторе приводит к падению тока насыщения на ~2 мА.

Таким образом, параметрический анализ модели полевого транзистора с затвором Шотки с гетероструктурой AlAs/GaAs позволил определить ряд параметров, оказывающих наибольшее влияние на характеристики транзистора и требующих тщательного экспериментального определения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

2. Перепеловский В. В., Михайлов Н. И., Марочкин В. В. Введение в приборно-технологическое моделирование устройств микроэлектроники: лаб. практикум. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. D. V. Chshukin, N. I. Mikhailov, V. V. Perepelovskiy, Ya. N. Panichev Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

V. V. Marochkin Pixpolar Oy (*Saint Petersburg*)

I. S. Pushnitsa, O. R. Fazylkhanov Joint Stock Company «Svetlana-Rost»

## PARAMETRIC INVESTIGATION OF SCHOTTKY BARRIER GATE FIELD EFFECT TRANSISTOR WITH HETEROSTRUCTURE ALAS/GAAS IN SYNOPSYS SENTAURUS TCAD

Given the research parameters of the field-effect transistor with Schottky and heterostructure AlAs/GaAs in the environment Synopsys Sentaurus TCAD. The simulation of the effects associated with static scatter parameters of the transistor. In the simulation calculation of semiconductor structures is reduced to the solution of the finite elements of the known fundamental equations. The calculation was carried out taking into account the hydrodynamic model. The study took into account the following parameters of the model: the influence of surface charges, the radiative re-combination recombination Shockley-reed-Hall and several others. The result of the research found a number of parameters that have the greatest influence on the characteristics of the transistor.

.....

Field-effect transistor, heterostructure, hydrodynamic model, Schottky barrier gate, AlAs/GaAs, Synopsys TCAD

.....