

УДК 621.382

## ПРИБОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ

ЧАН ТУАН ЧУНГ, А.М. БОРОВИК, И.Ю. ЛОВШЕНКО,  
В.Р. СТЕМПИЦКИЙ, А.А. КУЛЕШОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 21 июля 2014*

Посредством компьютерного моделирования получены вольтамперные характеристики наноразмерных МОП-транзисторов и проведен их анализ. Выявлена неадекватность классических моделей для моделирования наноразмерных структур, а также непригодность использования методов прямого квантового описания для исследований, требующих проведения большого количества компьютерных экспериментов.

*Ключевые слова:* наноразмерный МОП-транзистор, моделирование, квантовая коррекция.

### Введение

Каждый переход к новым технологическим нормам проектирования приводит к появлению новых физических эффектов в МОП-транзисторах, для учета которых необходимо создавать новые модели. Появление новых моделей порождает новые проблемы верификации, достоверности, точности, стандартизации. Одновременно с проблемой достоверности моделей существует проблема быстроедействия средств моделирования, которая приводит к необходимости использовать упрощенные модели транзисторов и приближенные методы моделирования электронных цепей. Используемые в настоящее время модели и методы возникли как компромисс между их точностью, достоверностью и вычислительной эффективностью. Стандартные программные средства проектирования и моделирования в микроэлектронике основаны на многообразных моделях транспорта носителей заряда в приборных структурах. Физические параметры этих моделей «экстрагированы» по результатам экспериментов с конкретными материалами, технологическими процессами, а также приборными структурами, сформированными с определенными технологическими нормами. Очевидно, что моделирование и проектирование с использованием «встроенных» в указанные модели коэффициентов в других условиях, с другими технологическими нормами, могут привести к неадекватным результатам моделирования и проектирования.

### Подходы к моделированию транспорта носителей заряда в приборах с субмикронными проектными нормами

Физико-математические модели полупроводниковых приборов описываются системой фундаментальных уравнений, которые связывают электростатический потенциал и плотность носителей заряда в пределах области моделирования. Эта система уравнений выводится из законов Максвелла и состоит из уравнения Пуассона, уравнений непрерывности, транспортных уравнений и уравнений энергетического баланса [1, 2]. Уравнение Пуассона, описывающее связь между изменениями электростатического потенциала и локальной плотности носителей, имеет вид:

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{q}{\epsilon_{Si}} (N_D - N_A + p - n), \quad (1)$$

$$n = n_i \exp[(\varphi - \varphi_n) / \varphi_T], \quad p = p_i \exp[(\varphi_p - \varphi) / \varphi_T], \quad (2)$$

где  $q$  – элементарный электрический заряд,  $\varepsilon_{Si}$  – диэлектрическая проницаемость кремния,  $N_D$ ,  $N_A$  – концентрации доноров и акцепторов,  $p$ ,  $n$  – концентрации дырок и электронов,  $p_i$ ,  $n_i$  – собственная концентрации дырок и электронов,  $\phi$  – электростатический потенциал,  $\phi_n$ ,  $\phi_p$  – квазипотенциалы Ферми электронов и дырок,  $\phi_T$  – тепловой потенциал,  $\phi_T = kT/q$ .

Уравнения непрерывности и транспорта носителей заряда описывают эволюцию плотности носителей заряда в результате процессов транспорта, генерации и рекомбинации.

Уравнения непрерывности имеют вид:

$$\begin{aligned}\frac{\partial n}{\partial t} &= -\frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{j}_n + G_n - R_n, \\ \frac{\partial p}{\partial t} &= -\frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{j}_p + G_p - R_p,\end{aligned}\tag{3}$$

где  $t$  – время,  $\vec{j}_n$ ,  $\vec{j}_p$  – плотности электронного и дырочного токов,  $G_n$ ,  $G_p$  – скорости генерации электронов и дырок,  $R_n$ ,  $R_p$  – скорости рекомбинации электронов и дырок.

Уравнения для плотности тока или модели транспорта зарядов обычно выводятся посредством аппроксимации и некоторых упрощений общего транспортного уравнения Больцмана, что приводит к целому ряду различных моделей транспорта зарядов, как, например, диффузионно-дрейфовая модель, модель энергетического баланса, гидродинамическая модель.

Стандартной моделью транспорта носителей заряда при моделировании приборов микроэлектроники является диффузионно-дрейфовая модель. Эта модель отличается тем, что в ее рамках не требуется вводить дополнительные независимые переменные в величины электростатического потенциала  $\psi$ , концентрации электронов и дырок. Диффузионно-дрейфовая модель дает физически адекватные результаты для всех приборов, изготовленных по микронным и субмикронным технологическим нормам. Соотношения для плотностей токов в диффузионно-дрейфовой модели имеют вид:

$$\begin{aligned}\vec{j}_n &= qD_n \nabla n - qn\mu_n \nabla \psi - \mu_n n (kT_L \nabla (\ln n_{ie})), \\ \vec{j}_p &= qD_p \nabla p - qp\mu_p \nabla \psi - \mu_p p (kT_L \nabla (\ln n_{ie})),\end{aligned}\tag{4}$$

где  $D_n$ ,  $D_p$  – коэффициенты диффузии электронов и дырок,  $\mu_n$  и  $\mu_p$  – подвижности электронов и дырок,  $T_L$  – температура кристаллической решетки,  $n_{ie}$  – эффективная собственная концентрация электронов [2].

### Физические эффекты в наноразмерных приборах

Уменьшение размеров элементов ИМС приводит к появлению новых физических эффектов, в том числе и квантовых, которые следует учитывать при разработке моделей. Основные физические эффекты, возникающие в наноразмерных МОП-транзисторах [3–5]:

- модуляция длины канала;
- перекрытие обедненных областей истока и стока;
- прокол между истоком и стоком;
- эффект короткого канала;
- уменьшение подвижности вследствие увеличения вертикальной компоненты электрического поля;
- уменьшение продольной подвижности (насыщение дрейфовой скорости носителей);
- подпороговая проводимость;
- снижение потенциального барьера под затвором, вызванное напряжением на стоке;
- влияние горячих носителей заряда;
- эффект обеднения в поликремниевом затворе;
- эффект квантования инверсионного слоя;
- ток туннелирования через затвор;
- эффект узкого канала;
- обратный эффект короткого канала;
- аномальный рост подвижности;
- последовательные сопротивления истока и стока;

- эффект влияния подложки, вызванный ее током;
- влияние сопротивления подложки;
- ток утечки, индуцированный затвором;
- эффект неоднородного легирования;
- туннелирование через  $p$ - $n$ -переходы;
- учет перекрытия затвором областей истока и стока;
- эффект саморазогрева.

### **Методика исследований**

Поскольку физические эффекты, характерные для наноразмерных приборов, не могут быть соответствующим образом учтены в классической диффузионно-дрейфовой модели, для моделирования наноразмерных МОП-транзисторов используются альтернативные, более совершенные и одновременно сложные математические модели [6, 7].

Существуют два основных подхода к моделированию наноразмерных приборов:

- использование полного квантового описания процесса переноса носителей заряда;
- введение необходимой поправки к базовой диффузионно-дрейфовой модели.

Первый подход обычно опирается на квантовые модели, в основе которых лежат уравнения Шредингера и Пуассона, неравновесная функция Грина или функция Вигнера. Эти модели в большинстве случаев обеспечивают получение точной и полной физической информации о квантовомеханических явлениях, имеющих место в структуре. Однако отсутствие надежности используемых численных методов и высокие требования к вычислительным ресурсам затрудняют их использование.

В связи с этим высок интерес к моделям, основанным на втором подходе, связанным с квантовой коррекцией диффузионно-дрейфовой модели. Преимущество второго подхода заключается в использовании хорошо организованного математического аппарата и методов численного решения базовой диффузионно-дрейфовой модели [7].

Таким образом, закономерно рассмотрение и сравнение этих подходов, а также анализ результатов моделирования, полученных с использованием стандартной диффузионно-дрейфовой модели и моделей, базирующихся на квантовой механике.

Полное квантовое описание процесса переноса носителей заряда в наноразмерных структурах реализуется в модуле QUANTUM программного комплекса SILVACO посредством самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона с использованием неравновесной функции Грина (NEGF, Non-Equilibrium Green Function). Появившийся сравнительно недавно и получивший широкое развитие формализм неравновесной функции Грина в настоящее время рассматривается как один из основных инструментов моделирования наноразмерных электронных приборов. Данный подход к моделированию учитывает эффекты туннелирования, баллистического транспорта, размерного квантования [8].

Подход, связанный с введением необходимой поправки к базовой диффузионно-дрейфовой модели, может быть реализован в программном комплексе компании SILVACO посредством коррекции, использующей квантовый потенциал Бома (BQP) или модель квантовых моментов. Следует заметить, что модель квантового потенциала Бома характеризуется лучшей сходимостью при реализации численных методов решения. При этом вводится зависящий от положения в пространстве квантовый потенциал, который добавляется к потенциальной энергии носителей заряда [8–10].

### **Результаты и их обсуждение**

Ввиду двумерного характера моделируемых МОП-структур закономерно масштабирование в соответствии с принципами обобщенного подхода с помощью независимых коэффициентов физических размеров транзистора и прикладываемых потенциалов, что повышает возможности проектирования и позволяет удерживать двумерные эффекты под контролем, вместе с тем сохраняя неизменной общую картину электрического поля и распределения его эквипотенциалей в пределах масштабируемой приборной структуры [11]. Параметры МОП-транзисторов, полученные в соответствии с данной методологией, а также с учетом объективных физических и технологических ограничений, реальных значений для промышленно выпускаемых приборов,

представлены в табл. 1. На рис. 1 представлена структура МОП-транзистора с длиной канала 40 нм, а также профили распределения примесей вблизи поверхности данной структуры.

Таблица 1. Параметры исследуемых МОП-транзисторов

Длина канала, нм	20	40	60	80	100
Толщина подзатворного окисла, нм	1	2	3	4	5
Концентрация примеси в истоке, стоке, $\text{см}^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{20}$	$2,4 \cdot 10^{20}$	$1,3 \cdot 10^{20}$	$8,3 \cdot 10^{19}$	$6,0 \cdot 10^{19}$
Концентрация примеси в канале, $\text{см}^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{18}$	$9,9 \cdot 10^{17}$	$5,1 \cdot 10^{17}$	$3,3 \cdot 10^{17}$	$2,4 \cdot 10^{17}$
Концентрация примеси в кармане, $\text{см}^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{18}$	$5,6 \cdot 10^{17}$	$2,9 \cdot 10^{17}$	$1,9 \cdot 10^{17}$	$1,4 \cdot 10^{17}$
Глубина залегания $p$ - $n$ -перехода истока, стока, нм	22	44	67	89	111
Глубина залегания $p$ - $n$ -перехода LDD-областей, нм	11	22	33	44	56
Толщина поликремниевго затвора, нм	67	133	200	267	333

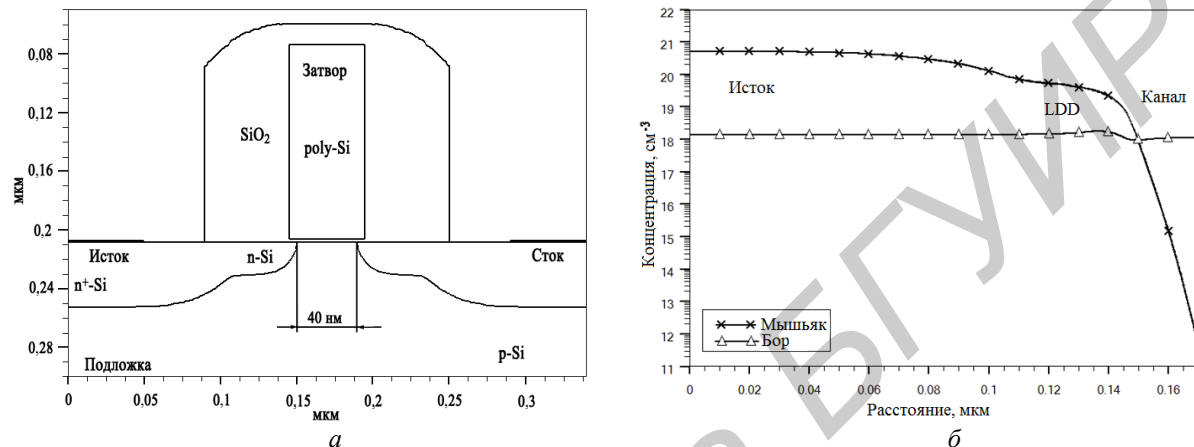


Рис. 1. Структура (а) и профили распределения (б) примесей МОП-транзистора с длиной канала 40 нм

Моделирование полученных МОП-структур с целью анализа и сравнения различных подходов осуществлялось с использованием следующих моделей:

- модели самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона с использованием неравновесной функции Грина;
- классической диффузионно-дрейфовой модели;
- диффузионно-дрейфовой модели с коррекцией квантовым потенциалом Бома.

При этом использовались модель подвижности Дарвиша, учитывающая снижение подвижности носителей заряда в инверсионных слоях вследствие высокой степени их рассеяния на поверхности вблизи границы раздела полупроводник-диэлектрик; модель рекомбинации Шокли-Рида-Холла с учетом зависимости времени жизни неосновных носителей от концентрации; модель туннелирования Клаасена из зоны в зону; статистика Ферми-Дирака с учетом снижения концентрации носителей в областях с высокой концентрацией примеси; модель, описывающая эффект сужения ширины запрещенной зоны при высоких концентрациях примеси [6]. На рис. 2 представлены ВАХ МОП-транзистора с длиной канала 40 нм.

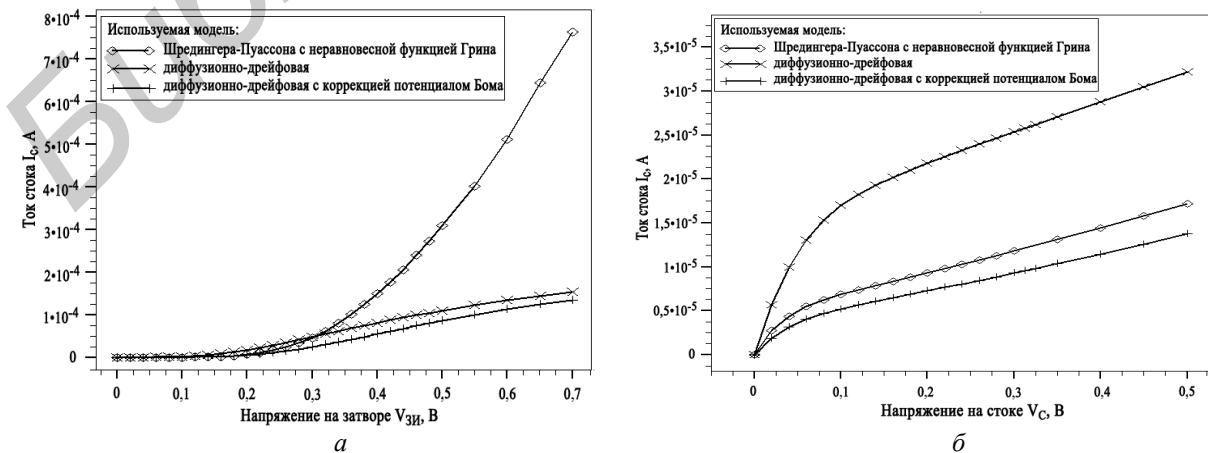


Рис. 2 Вольтамперные характеристики МОП-транзистора с длиной канала 40 нм при использовании различных моделей: а – передаточные; б – выходные

Очевидно, что полученные ВАХ одного и того же прибора в зависимости от используемых моделей значительно отличаются, что свидетельствует о высокой степени влияния квантовых эффектов на функционирование наноразмерных МОП-транзисторов. Существенное отличие результатов применения модели самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона с использованием неравновесной функции Грина от результатов, полученных с помощью других подходов моделирования, объясняется учетом только баллистического транспорта без рассеяния носителей заряда.

На рис. 3 представлена зависимость относительного изменения порогового напряжения, рассчитанного с использованием диффузионно-дрейфовой модели ( $V_{пор}^{DD}$ ), и при использовании коррекции квантовым потенциалом Бома ( $V_{пор}^Q$ ):

$$\Delta V_{пор} / V_{пор}^Q = (V_{пор}^{DD} - V_{пор}^Q) / V_{пор}^Q, \quad (5)$$

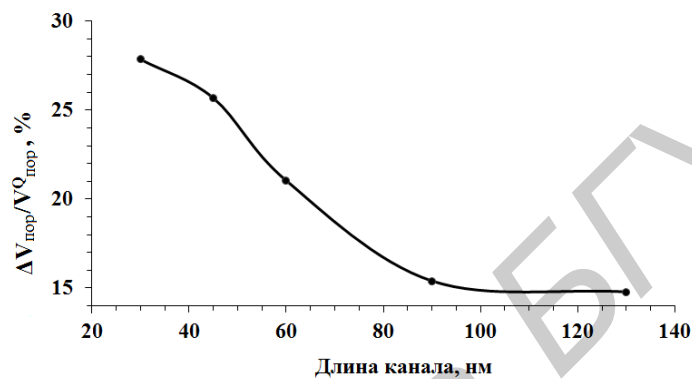


Рис. 3. Зависимость относительного изменения порогового напряжения при использовании различных моделей от длины канала МОП-транзистора

Из графика видно, что степень проявления квантовых эффектов увеличивается с уменьшением длины канала. В табл. 2 представлены данные о времени, затраченном на моделирование при использовании различных моделей.

Таблица 2. **Время, затраченное на моделирование**

Исследуемая модель	Время моделирования	
	ВАХ $I_C = f(V_{зи})$ , мин	ВАХ $I_C = f(V_{си})$ , мин
Диффузионно-дрейфовая модель	5,1	4,8
Диффузионно-дрейфовая модель с коррекцией квантовым потенциалом Бома	22,5	17,9
Модель самосогласованного решения уравнений Пуассона и Шредингера с использованием функции Грина	550,2	490,3

Можно сделать вывод, что модели, базирующиеся на квантовой механике, особенно те из них, которые реализуют подход полного квантового описания, отличаются требовательностью к вычислительным ресурсам, что делает их непригодными для исследований, требующих проведения большого количества компьютерных экспериментов.

Для исследования эффективности различных моделей использовался  $n$ -канальный МОП-транзистор, структура (рис. 4) и результаты экспериментального измерения ВАХ которой получены Microsystems Technology Laboratory [12].

Моделирование МОП-транзистора с целью анализа и сравнения различных подходов осуществлялось с использованием классической диффузионно-дрейфовой модели и диффузионно-дрейфовой модели с коррекцией квантовым потенциалом Бома. На рис. 5 представлены ВАХ, полученные с использованием перечисленных выше моделей, а также экспериментальные данные.

Использование диффузионно-дрейфовой модели с коррекцией квантовым потенциалом Бома обеспечивает получение результатов моделирования, хорошо согласующихся с экспериментальными результатами.

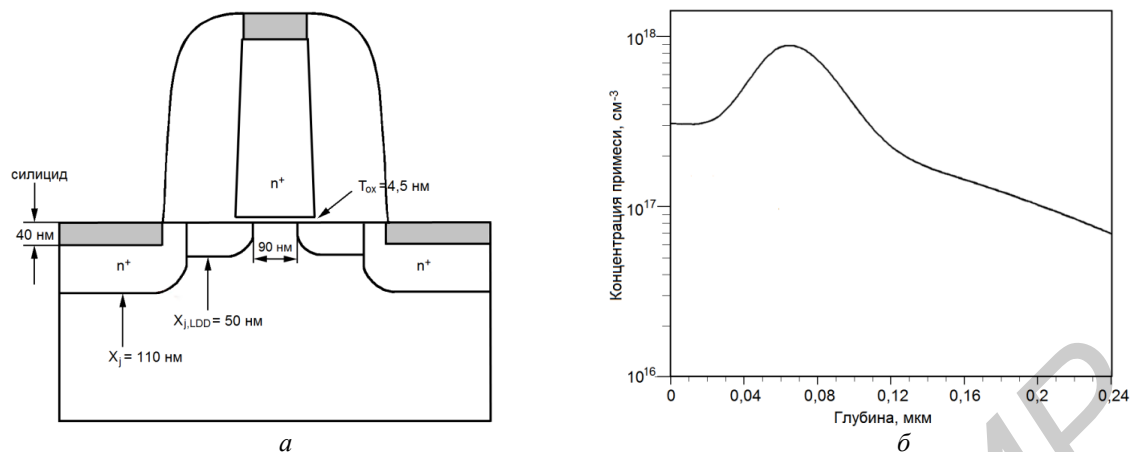


Рис. 4. Структура (а) и профиль распределения акцепторной примеси в канале (б) МОП-транзистора

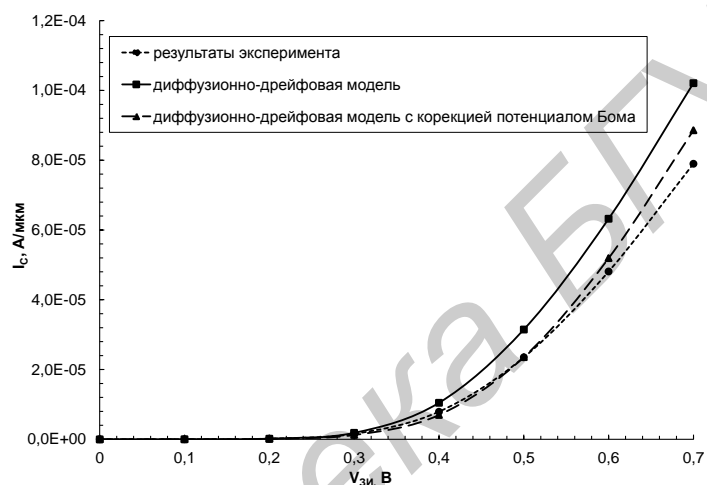


Рис. 5. Вольтамперные характеристики МОП-транзистора при  $U_{си} = 1,01$  В

### Заключение

Показано, что принципиальными проблемами моделирования наноразмерных приборов являются возникающие в структуре полупроводниковых приборов новые, в том числе квантовые, эффекты, влияние которых возрастает с уменьшением геометрических размеров приборов, а также сложность одновременного обеспечения как высокой точности и достоверности результатов, так и приемлемой скорости моделирования.

Полученные ВАХ одного и того же прибора в зависимости от используемых моделей значительно отличаются, что свидетельствует о высокой степени проявления квантовых эффектов и неадекватности стандартных классических моделей для исследования наноразмерных структур. Квантово-механические эффекты оказывают значительное влияние на пороговое напряжение и ток стока, так как вследствие их наличия изменяются плотность и распределение носителей в канале, а также поверхностный потенциал. Кроме того, модели, базирующиеся на квантовой механике, особенно те из них, которые реализуют подход полного квантового описания, отличаются требовательностью к вычислительным ресурсам, что делает их непригодными для исследований, требующих проведения большого количества компьютерных экспериментов. Показана возможность применения диффузионно-дрейфовой модели с коррекцией квантовым потенциалом Боба для моделирования наноразмерных МОП-транзисторов после ее калибровки и использования результатов такого моделирования в качестве точных при отсутствии экспериментальных данных.

# TECHNOLOGY AND DEVICE NANOSCALE MOSFETS SIMULATION

TRUNG TRAN TUAN, A.M. BOROVIK, I.Yu. LOVSHENKO,  
V.R. STEMPITSKY, A.A. KULESHOV

## Abstract

Current-voltage characteristics of MOSFET are obtained by computer simulation and their analysis is performed. The inadequacy of the classical models for simulation of nanoscale structures is revealed, as well as the unsuitability methods of direct quantum description for studies requiring a large number of computer experiments is detected.

## Список литературы

1. *Vasileska D., Khan H.R., Ahmed S.S.* // Nano-Electronic Devices. 2005. Vol. 4. P. 305–361.
2. *Нелаев В.В., Стемпитский В.Р.* Основы САПР в микроэлектронике. Моделирование технологии и прибора. Минск, 2008.
3. *Денисенко В.В.* Компактные модели МОП-транзисторов для SPICE в микро- и нанoeлектронике. М., 2010.
4. *Cheng Y., Hu C.* MOSFET modeling & BSIM3 user's guide. Kluwer Academic Publishers, 1999.
5. *Foty D. P.* MOSFET modeling with Spice. Principle and Practice. Prentice Hall PTR. NJ, 1997.
6. *Yu B., Xiong W., Hsu C.H. et al.* // 2007 IEEE International SOI Conference. 2007. P. 131–132.
7. *Carlo de Falco.* Quantum corrected drift-diffusion models and numerical simulation of nanoscale semiconductor devices: Ph.D. Thesis. Milan, 2006.
8. ATLAS User's Manual. Device simulation software [Электронный ресурс]. – Режим доступа: atlas\_users.pdf. – Дата доступа: 18.07.2014.
9. *Iannaccone G. G., Curatola A., Fiori G.* // SISPAD. 2004. P. 275–278.
10. *Watling J. R., Brown A. R., Asenov A.* // J. of Computational Electronics. 2002. P. 289–293.
11. *Красников Г.Я.* Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. М., 2011.
12. «Well-Tempered» Bulk-Si NMOSFET Device Home Page. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www-mtl.mit.edu/researchgroups/Well/>. – Дата доступа: 18.07.2014.