

УДК 621.382

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗНАЧИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ПОДВИЖНОСТИ ДАРВИША ДЛЯ ОПИСАНИЯ ТОКОПЕРЕНОСА В НАНОРАЗМЕРНЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРАХ

А.М. БОРОВИК

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

Поступила в редакцию 22 июля 2014

С использованием методики отсеивающих экспериментов определены наиболее значимые параметры модели подвижности Дарвиша. Показана возможность оптимизации диффузионно-дрейфовой модели с целью достижения адекватности результатов моделирования наноразмерных МОП-структур.

Ключевые слова: наноразмерный МОП-транзистор, компьютерное моделирование, отсеивающий эксперимент, модель подвижности Дарвиша.

Введение

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.

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 [1–5].

Решение представленных проблем и противоречий заключается в оптимизации диффузионно-дрейфовой модели путем введения корректирующих коэффициентов к ее наиболее значимым параметрам с целью достижения адекватности моделирования наноразмерных МОП-структур, используя результаты натуральных экспериментов или более точного квантово-механического моделирования. В связи с этим возникает необходимость в определении наиболее значимых параметров диффузионно-дрейфовой модели, в частности модели подвижности Дарвиша.

Модель подвижности Дарвиша

Модель подвижности Ломбарди [4], описывающая поведение носителей в инверсионных слоях и учитывающая снижение подвижности носителей заряда вследствие высокой степени их рассеяния на поверхности вблизи границы раздела полупроводник-диэлектрик, успешно используется при моделировании многих приборов микроэлектроники. Дарвишем была предложена улучшенная версия этой модели, в которой введены две модификации. Первая касается описания подвижности в объеме с использованием модели Клаасена, в которой учитываются эффекты кулоновского экранирования. Вторая модификация

связана с использованием нового выражения для описания эффекта шероховатости поверхности. Модель организована таким образом, чтобы можно было одновременно учитывать указанные эффекты [4, 6]. Ниже представлены соотношения модели Дарвиша для электронов.

$$\frac{1}{\mu_0} = \frac{1}{\mu_b} + \frac{1}{\mu_{ac}} + \frac{1}{\mu_{sr}}, \quad (1)$$

где μ_b – подвижность носителей в объеме, μ_{ac} – вклад, обусловленный рассеянием на акустических фононах, μ_{sr} – вклад, обусловленный шероховатостью поверхности.

Подвижность носителей в объеме определяется следующим образом:

$$\frac{1}{\mu_b} = \frac{1}{\mu_L} + \frac{1}{\mu_{DAP}}. \quad (2)$$

Компонента рассеяния носителей на решетке определяется следующим соотношением:

$$\mu_L = \mu_{max} \left(\frac{300}{T_L} \right)^0, \quad (3)$$

где T_L – температура кристаллической решетки.

Компонента рассеяния, обусловленная наличием примесей, определяется выражением:

$$\mu_{DAP} = \mu_N \frac{N_{nsc}}{N_{nsc,eff}} \left(\frac{N_{ref}}{N_{nsc}} \right)^{\alpha_1} + \mu_{nc} \left(\frac{n+p}{N_{nsc,eff}} \right). \quad (4)$$

Компонента рассеяния на примесных атомах определяется выражением:

$$\mu_N = \frac{\mu_{max}^2}{\mu_{max} - \mu_{min}} \left(\frac{T_L}{300} \right)^{(3\alpha_1 - 1.5)}. \quad (5)$$

Компонента рассеяния носителей на носителях определяется следующим выражением:

$$\mu_{nc} = \frac{\mu_{max} \cdot \mu_{min}}{\mu_{max} - \mu_{min}} \left(\frac{300}{T_L} \right)^{0.5}, \quad (6)$$

$$N_{nsc} = N_D + N_A + p, \quad (7)$$

где N_D – концентрация доноров, N_A – концентрация акцепторов, p – концентрация дырок.

$$N_{nsc,eff} = N_D + G(P)N_A + \left(\frac{p}{F(P)} \right). \quad (8)$$

Функции $G(P)$ и $F(P)$ фактора экранирования P определяются выражениями:

$$G(P) = 1 - \frac{S_1}{\left(S_2 + P \left(\frac{T_L / 300}{m_e} \right)^{S_4} \right)^{S_3}} + \frac{S_5}{\left(P \left(\frac{m_e}{T_L / 300} \right)^{S_7} \right)^{S_6}}, \quad (9)$$

$$F(P) = \frac{R_1 \cdot P^{R_6} + R_2 + R_3 \frac{m_e}{m_h}}{P^{R_6} + R_4 + R_5 \frac{m_e}{m_h}}, \quad (10)$$

где m_e – эффективная масса электрона, m_h – эффективная масса дырки.

Вклад, обусловленный шероховатостью поверхности, определяется следующей формулой:

$$\frac{1}{\mu_{sr}} = \frac{\left(\frac{E_{\perp}}{E_2}\right)^{\gamma}}{\delta}, \quad \gamma = A + \frac{\alpha(n+p)}{\left(\frac{N}{N_2}\right)^{\eta}}. \quad (11)$$

Здесь N – полная концентрация примесей ($N_D + N_A$), $N_2 = 1 \text{ см}^{-3}$, $E_2 = 1 \text{ В/см}$.

Вклад, обусловленный рассеянием на акустических фононах, определяется следующим образом:

$$\mu_{ac} = \left(\frac{B}{\left(\frac{E_{\perp}}{E_2}\right)^E} + \frac{C \left(\frac{N}{N_2}\right)^{\tau}}{\left(\frac{E_{\perp}}{E_2}\right)^D} \right) \frac{1}{T}, \quad T = (T_L / 300)^k. \quad (12)$$

Данная модель успешно используется при моделировании субмикронных приборов, однако должна быть адаптирована для моделирования наноразмерных приборов.

Методика исследований

Известно, что для сложных процессов и зависимостей характерно то, что лишь небольшое количество факторов оказывает существенное влияние на выходные параметры изделия, воздействие остальных факторов малозначительно. Таким образом, при сравнительно большом числе факторов является разумным применение отсеивающих экспериментов с целью оценки значимости независимых переменных при изучении сложных процессов и исключения из рассмотрения тех из них, влияние которых на процесс несущественно, на начальной стадии экспериментального исследования, что позволяет существенно упростить изучение факторного пространства и описание поверхности отклика, а значит, сократить общий объем экспериментальных работ. Для такого эксперимента не предъявляются требования к точности полученных результатов, но зато предъявляются требования высокой разрешающей способности, т. е. проводится проверка на влияние как можно большего числа факторов [7–9].

Изначально формируется список факторов, влияющих на изучаемое явление, задаются ориентировочные пределы изменения факторов с учетом требований их совместимости [7]. При планировании отсеивающего эксперимента полный или дробный факторный анализ обычно применяется при необходимости проанализировать 2–4 фактора. Если анализируемых факторов больше 5, то используются дробный факторный план эксперимента или план Плакетта-Бермана [8, 9]. Плакетт и Берман показали, что полная факторная модель может быть разбита так, чтобы получить насыщенные планы, в которых число опытов кратно 4, а не степени 2. Такие планы иногда называют планами с матрицей Адамара. Они являются насыщенными, поскольку вся информация в них используется для оценки параметров, не оставляя степеней свободы для оценки эффекта ошибок. Общее число опытов должно быть не меньше числа исследуемых факторов. План Плакетта-Бермана позволяет тестировать наибольшее число главных эффектов при наименьшем числе наблюдений [9, 10]. Пример подобного плана отсеивающего эксперимента представлен в виде табл. 1.

Таблица 1. План Плакетта-Бермана для 7 факторов

№ эксперимента	Факторы							Значение выходного параметра
	1	2	3	4	5	6	7	
1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	R_1
2	+1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	R_2
3	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	R_3
4	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	R_4
5	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	R_5
6	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	R_6
7	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	R_7
8	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	R_8

Все факторы при проведении отсеивающего эксперимента варьируются на двух уровнях с одинаковым разбросом значений относительно исходного. Комбинация уровней факторов определяется «матрицей планирования». В этой таблице «+1» означает, что фактор берется на верхнем уровне, «-1» – на нижнем. В каждом конкретном опыте уровни факторов выбираются так, чтобы матрица планирования обладала следующими свойствами: сумма чисел в каждом столбце равнялась нулю и сумма произведений элементов, относящихся к одному опыту, для двух любых столбцов равнялась нулю, т. е. если X_{ji} – элемент матрицы в i -й строке в j -м столбце, n – число опытов, то должны выполняться соотношения (13) и (14) [7].

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 0, \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} X_{ik} = 0, \quad j \neq k. \quad (14)$$

После выполнения отсеивающего эксперимента согласно плану Плакетта-Бермана проводится математическая обработка и анализ ее результатов. Для этого в соответствии с формулой (15) вычисляется величина Δ_j :

$$\Delta_j = \left| \sum_{i=1}^n X_{ij} R_i \right|. \quad (15)$$

Факторы, для которых данная величина имеет наибольшее значение, и оказывают наибольшее влияние на исследуемую выходную характеристику.

Результаты

Количество параметров модели подвижности Дарвиша, участвующих в описании процессов транспорта электронов и доступных для варьирования при использовании программного комплекса компании Silvaco, равно 33, что является чересчур большим для дальнейшего рассмотрения [4]. В связи с этим возникает необходимость применения отсеивающих экспериментов. Одновременно рассматривается влияние размеров структуры на значимость параметров. Для исследования значимости параметров модели был сформирован план Плакетта-Бермана для 33 факторов, включающий 36 экспериментов. Все факторы варьируются на двух уровнях с одинаковым разбросом значений относительно исходного значения – 20%. Исследования на значимость параметров проводились для МОП-структур с длиной канала L , составляющей 20, 40, 60, 80, 100 нм. В табл. 2 и 3 представлены результаты проведения отсеивающих экспериментов, полученные в соответствии с методикой анализа, описанной ранее. Обозначения параметров соответствуют используемым в программном комплексе Silvaco.

Таблица 2. Результаты отсеивающих экспериментов по влиянию на ток стока

Vзи, В	Наиболее значимые параметры по влиянию на ток стока				
	$L = 20$ нм	$L = 40$ нм	$L = 60$ нм	$L = 80$ нм	$L = 100$ нм
0,1	A, D, α_1, E	A, D, E, α_1	A, D, E, μ_{\max}	A, D, E, μ_{\max}	A, D, E, μ_{\max}
0,2	A, D, E, α_1	A, D, E, α_1	A, D, E, μ_{\max}	A, D, E, μ_{\max}	A, D, E, μ_{\max}
0,3	A, D, E, α_1	A, D, E, α_1	A, D, E, μ_{\max}	A, D, E, μ_{\max}	A, D, E, μ_{\max}
0,4	A, D, α_1, E	A, D, E, α_1	A, D, E, α_1	A, D, E, μ_{\max}	A, D, E, μ_{\max}
0,5	$A, D, \alpha_1, \mu_{\min}$	A, D, E, α_1	A, D, E, α_1	A, D, E, α_1	A, D, E, α_1
0,6	$A, D, \alpha_1, \mu_{\min}$	A, D, α_1, E	A, D, E, α_1	A, D, E, α_1	A, D, E, α_1
0,7		A, D, α_1, E	A, D, E, α_1	A, D, E, α_1	A, D, E, α_1
0,8			A, D, α_1, E	A, D, E, α_1	A, D, E, α_1
0,9				A, D, E, α_1	A, D, E, α_1

Таблица 3. Наиболее значимые параметры по влиянию на пороговое напряжение

Длина канала	20 нм	40 нм	60 нм	80 нм	100 нм
Параметры	$A, S_1, \mu_{\min}, \alpha_1$	$A, S_1, \alpha_1, \mu_{\min}$	$A, \alpha_1, \mu_{\min}, S_1$	$A, \alpha_1, \mu_{\min}, S_1$	$A, \alpha_1, \mu_{\min}, S_1$

В соответствии с полученными результатами отсеивающих экспериментов наибольшее влияние на пороговое напряжение и ток стока наноразмерных МОП-транзисторов оказывают параметры A , D , E , S_1 , α_1 , μ_{\min} , μ_{\max} , особенно A . Однако степень их влияния существенно зависит от размеров приборов и рассматриваемого участка вольтамперной характеристики. На рис. 1–3 представлены вольтамперные характеристики зависимости плотности тока стока от напряжения на затворе, демонстрирующие различия в степени влияния одного и того же параметра на результаты при изменении длины канала.

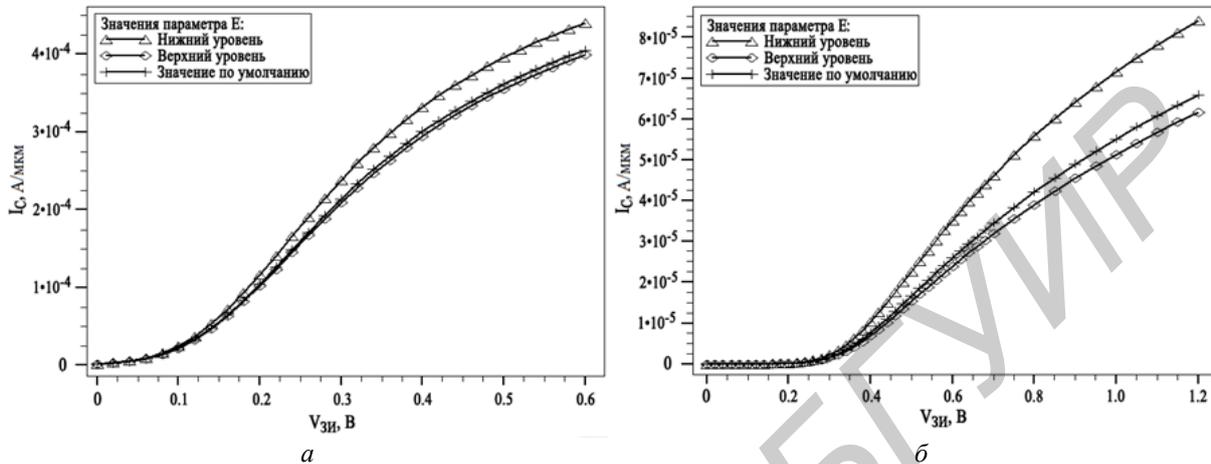


Рис. 1. Вольтамперные характеристики МОП-транзисторов с длиной канала 20 нм (а) и 100 нм (б) при различных значениях параметра E

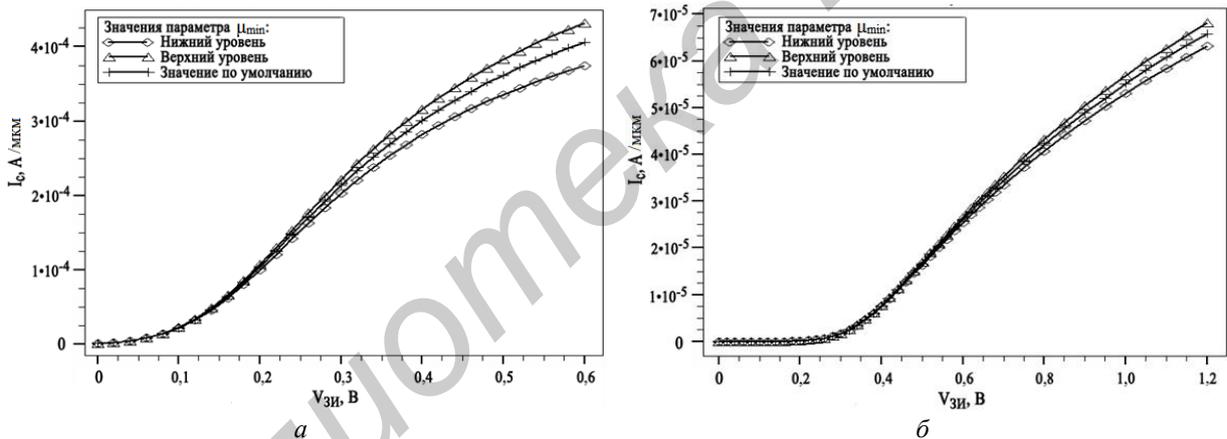


Рис. 2. Вольтамперные характеристики МОП-транзисторов с длиной канала 20 нм (а) и 100 нм (б) при различных значениях параметра μ_{\min} .

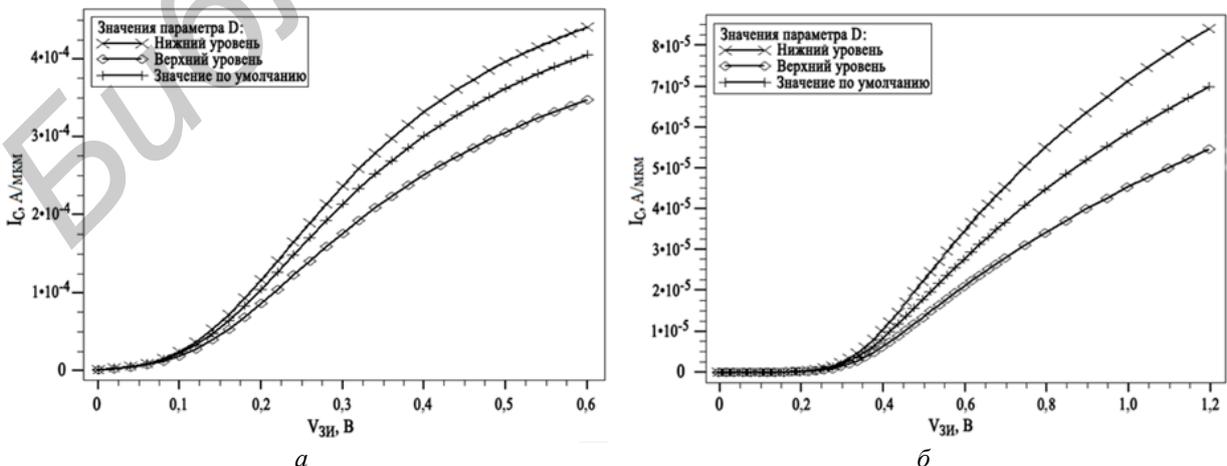


Рис. 3. Вольтамперные характеристики МОП-транзисторов с длиной канала 20 нм (а) и 100 нм (б) при различных значениях параметра D

Таким образом, очевидна высокая степень влияния параметров модели Дарвиша на результаты моделирования процессов транспорта носителей заряда. Высокая чувствительность вольтамперных характеристик на изменения отдельных параметров диффузионно-дрейфовой модели способствует осуществлению дальнейшей ее оптимизации для нанометровых проектных норм.

Заключение

Предложен новый подход расчета электрических характеристик наноразмерных МОП-транзисторов, сущность которого заключается в использовании корректирующих коэффициентов, а также таких значений параметров классических диффузионно-дрейфовых моделей, применяемых в стандартных комплексах приборно-технологического моделирования субмикронных приборов (например, компаний Silvaco и Synopsys) при описании физических механизмов транспорта носителей заряда, которые бы эффективно учитывали квантово-механические механизмы транспорта, характерные для наноразмерных приборов.

Посредством проведения компьютерных отсеивающих экспериментов определены наиболее значимые относительно влияния на пороговое напряжение и ток стока параметры модели подвижности Дарвиша диффузионно-дрейфовой модели, а именно A , D , S_1 , α_1 , μ_{\min} , E .

SIGNIFICANCE RESEARCH OF DARVISH MOBILITY MODEL PARAMETERS FOR THE CHARGE TRANSPORT DESCRIPTION IN NANOSCALE MOSFETS

A.M. BOROVIK

Abstract

Using the methodology of screening experiments the most significant parameters of the Darwish mobility model are identified. The possibility of optimizing the drift-diffusion model in order to achieve the adequacy of the simulation results of nanoscale MOS structures is shown.

Список литературы

1. Денисенко В.В. Компактные модели МОП-транзисторов для SPICE в микро- и нанoeлектронике. М., 2010.
2. Carlo de Falco. Quantum corrected drift-diffusion models and numerical simulation of nanoscale semiconductor devices: Ph.D. Thesis. Milan, 2006.
3. Iannaccone G. G., Curatola A., Fiori G. // SISPAD. 2004. P. 275–278.
4. ATLAS User's Manual. Device simulation software. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: atlas_users.pdf. – Дата доступа: 01.09.2014.
5. Watling J. R., Brown A. R., Asenov A. // Journal of Computational Electronics. 2002. P. 289–293.
6. Darwish M., Lentz J.L., Pinto M.R. et al // IEEE Trans. Electron Devices. 1997. Vol. 44 (9). P. 1529–1538.
7. Луизова Л.А. От постановки задачи до принятия решения. Петрозаводск, 2002.
8. Engineering Statistics Handbook. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/index.htm>. – Дата доступа: 01.09.2014.
9. Plackett R. L., Burman J. P. // Biometrika. 1946. Vol. 33. P. 305–325.
10. StatSoft. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm>. – Дата доступа: 01.09.2014.