

УДК 621.382

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИФFUЗИОННО-ДРЕЙФОВОЙ МОДЕЛИ

ЧАН ТУАН ЧУНГ, А.М. БОРОВИК, В.Р. СТЕМПИЦКИЙ

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

Поступила в редакцию 21 июля 2014

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, которые бы эффективно учитывали квантово-механические механизмы транспорта. Разработан и использован при оптимизации диффузионно-дрейфовой модели модифицированный метод прямого поиска для МОП-транзистора с длиной канала 90 нм.

Ключевые слова: наноразмерный МОП-транзистор, компьютерное моделирование, модель подвижности Дарвиша, оптимизация, метод прямого поиска.

Введение

Физико-математические модели полупроводниковых приборов описываются системой фундаментальных уравнений, которые связывают электростатический потенциал и плотность носителей заряда. Эта система уравнений выводится из законов Максвелла и состоит из уравнения Пуассона, уравнений непрерывности, транспортных уравнений и уравнений энергетического баланса. Для точного учета квантовых эффектов эти уравнения необходимо дополнить уравнением Шредингера [1–3]. Стандартной моделью транспорта носителей заряда является диффузионно-дрейфовая модель, которая дает физически адекватные результаты для всех приборов, изготовленных по микронным и субмикронным технологическим нормам. Однако уменьшение размеров элементов сверхбольших интегральных схем (СБИС) приводит к появлению новых физических эффектов, в том числе и квантовых, которые следует учитывать в процессе разработки моделей [3].

Особенности моделирования наноразмерных приборов

Рассмотрим некоторые физические эффекты, проявляющиеся в наноразмерных приборах, которые не учитываются в рамках стандартной диффузионно-дрейфовой модели, используемой в большинстве программных средств приборно-технологического моделирования.

Уменьшение подвижности вследствие увеличения вертикальной компоненты электрического поля.

Малая толщина подзатворного диэлектрика наноразмерных МОП-транзисторов приводит к увеличению напряженности вертикальной компоненты электрического поля под затвором до величины, когда происходит уменьшение подвижности вследствие рассеяния носителей на шероховатостях поверхности, на фонах и на неподвижных зарядах вблизи поверхности [3]. Зависимость эффективной подвижности от эффективного электрического поля может быть разделена на области влияния различных механизмов рассеяния носителей. При малых значениях напряженности (соответствующей пороговому напряжению) наблюдается наличие зависимости подвижности носителей заряда от концентрации примеси, которая увеличивается при уменьшении размеров приборов, что указывает на преобладание в этих условиях механизма рассеяния носителей на кулоновских центрах. При высоких поперечных

электрических полях рассеяние на шероховатостях поверхности имеет преобладающее влияние на подвижность в инверсном слое [4].

Модель подвижности Ломбарди [5], 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 [5, 6].

Вклад, обусловленный шероховатостью поверхности, определяется в модели Дарвиша следующими выражениями:

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

где n и p – концентрации электронов и дырок соответственно, 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 следующими соотношениями:

$$\mu_{ac} = \left(\frac{B}{\left(\frac{E_{\perp}}{E_2}\right)^E} + \frac{C \left(\frac{N}{N_2}\right)^{\tau}}{\left(\frac{E_{\perp}}{E_2}\right)^D} \right) \frac{1}{T}, \quad T = (T_L / 300)^k. \quad (2)$$

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

Уменьшение продольной подвижности.

При малой напряженности поля дрейфовая скорость носителей линейно зависит от напряженности электрического поля. Однако, начиная с некоторой напряженности, называемой напряженностью насыщения, скорость носителей становится постоянной и, соответственно, происходит снижение подвижности носителей. Этот эффект является существенным именно для короткоканальных транзисторов, поскольку уменьшение длины канала происходит быстрее, чем рабочих напряжений транзистора. Эффект насыщения дрейфовой скорости носителей приводит к тому, что насыщение тока стока у короткоканальных транзисторов происходит раньше, чем у длинноканальных [3].

Описана методика независимого определения зависимости подвижности как от продольного, так и от поперечного поля для субмикронных транзисторов [4]. Методика основана на экстракции параметров β и v_{sat} в выражении для зависимости скорости носителей от напряженности продольного E_{\parallel} и поперечного эффективного E_{eff} полей:

$$\mu(E_{\parallel}, E_{\perp}) = \frac{\mu_0(E_{\perp})E_{\parallel}}{\left[1 + \left(\frac{\mu_0(E_{\perp})E_{\parallel}}{v_{sat}} \right)^{\beta} \right]^{1/\beta}}, \quad (3)$$

где μ_0 – низкополевая подвижность электронов при значении напряженности эффективного поля E_{\perp} ; v_{sat} – скорость насыщения;

$$v_{sat} = \frac{\alpha}{1 + \theta \exp\left(\frac{T_L}{T_{nom}}\right)}. \quad (4)$$

Эффект обеднения в поликремниевом затворе.

В субмикронных транзисторах толщина подзатворного диэлектрика настолько мала, что становится сравнима с толщиной области обеднения в поликремниевом затворе на границе с окислом. Слой обеднения увеличивает эффективное расстояние между затвором и полупроводником, что приводит к увеличению порогового напряжения. Необходимо также учитывать квантовомеханическую природу инверсионного слоя и вводить соответствующие поправки в классическую толщину области обеднения [3].

Эффект квантования инверсионного слоя.

Для эффективного управления каналом МОП-транзистора толщина окисла наноразмерных структур должна составлять несколько нанометров, а концентрация примеси в подложке должна быть увеличена. Но это уменьшает толщину области пространственного заряда и одновременно увеличивает напряженность электрического поля у поверхности. Поэтому потенциальная яма для электронов становится настолько узкой, что пренебречь квантовомеханической природой электронного газа уже нельзя [3]. Инверсионный слой действует как квантовый колодец для электронов. Потенциальные стенки этого колодца с одной стороны образованы границей диэлектрик/полупроводник, а с другой стороны – электрическим полем, прижимающим электроны к этой границе. Ввиду малой ширины колодца в нем формируется двумерный электронный газ. В результате разрешенные энергетические состояния электрона в яме также оказываются дискретными. Следствием этого является ненулевая минимальная энергия электрона в потенциальной яме. Конечное ненулевое минимальное значение энергии электронов и дискретность разрешенных энергетических состояний в низкоразмерной структуре, возникающие как следствие квантово-волнового поведения электрона в замкнутом пространстве, составляют суть эффекта квантового ограничения [4, 7].

Плотность состояний представляет собой параметр, определяющий количество энергетических уровней в определенном интервале энергий. Данная величина имеет важный физический смысл, так как она определяет концентрацию электронов в конкретной области любого материала или прибора, а также интенсивность рассеяния электронов в этой области. Выражение для плотности состояний при отсутствии квантового ограничения имеет вид:

$$n_{3D}(E) = \frac{\sqrt{2m^3}}{\hbar^3 \pi^2} \sqrt{E}. \quad (5)$$

Выражение для плотности состояний в случае квантового ограничения в одном направлении имеет вид:

$$n_{2D}(E) = \frac{m}{\pi \hbar^2 L_z} \sum_n \theta(E - E_n), \quad \theta(E - E_n) = \begin{cases} 1, E \geq E_n, \\ 0, E < E_n. \end{cases} \quad (6)$$

Плотность электронных состояний в квантовой пленке в зависимости от энергии представляет собой ступенчатую функцию, которая заменяет типичную параболическую зависимость для свободных электронов в трехмерных структурах [7, 8]. Следствием квантового ограничения является уменьшение концентрации электронов у поверхности и рост порогового напряжения. Соответственно, уменьшается также величина удельной емкости подзатворного диэлектрика и увеличивается его эффективная толщина. На рис. 1 представлено распределение электронов в канале при использовании классического и квантовомеханического приближения для структуры с толщиной подзатворного диэлектрика 4 нм, концентрацией акцепторной примеси в области канала $7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при напряжении на затворе 2,5 В.

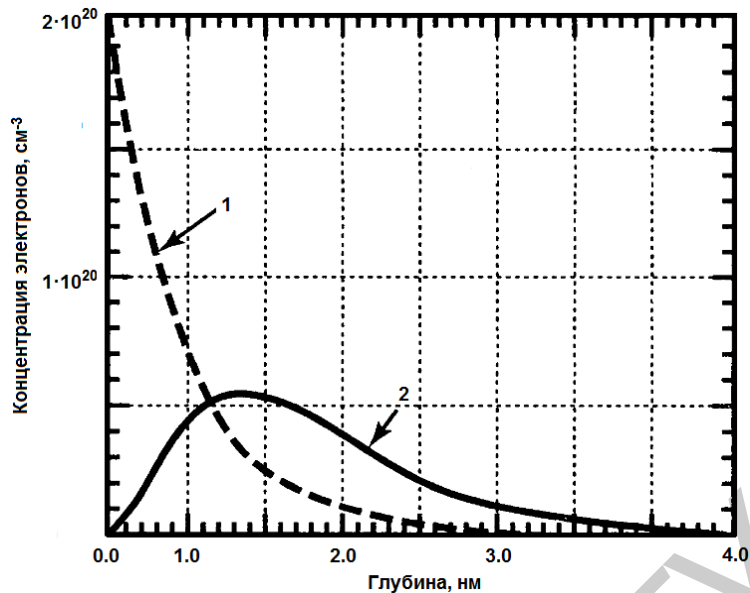


Рис. 1. Распределение электронов в канале: 1 – классическое приближение, 2 – квантовомеханическое приближение [3]

Метод прямого поиска

Оптимизация как эффективный алгоритм, позволяющий получить область экстремума целевой функции с заданной точностью, является основной областью использования методов и результатов проведения статистического анализа данных. Особую актуальность имеют методы и алгоритмы, позволяющие получать оценки вектора управляемых переменных, которому соответствует минимальное значение функции $f(x)$. Задача нахождения минимума функции $f(x)$ решается посредством процедуры систематического получения последовательности точек x_0, x_1, \dots, x_k таких, что $f(x_0) > f(x_1) > \dots > f(x_k) > \dots$. После выбора начальной точки x_0 необходимо выбрать направление, вдоль которого предполагается расположить следующую точку, и величину шага. Механизм образования последовательности точек и его эффективность в локализации точки минимума в сильной мере зависят от минимизируемой функции, а также информации, которая может быть использована для определения следующей точки [9].

Методы, ориентированные на решение задач безусловной оптимизации, можно разделить на три широких класса в соответствии с типом используемой при реализации того или иного метода информации, а именно:

- методы прямого поиска, основанные на вычислении только значений целевой функции $f(x)$;
- градиентные методы, в которых используются значения первых производных $f'(x)$;
- методы второго порядка, в которых наряду с первыми производными используются также вторые производные функции $f(x)$.

Для того, чтобы избежать значительных временных затрат на вычисление частных производных при решении задач с числом независимых переменных пять и более предпочтительно использовать прямые методы оптимизации (нулевого порядка). К числу общих особенностей этих методов следует отнести относительную простоту соответствующих вычислительных процедур, которые легко реализуются и быстро корректируются.

Идея используемой методики заключается в выборе базовой точки и оценивании значений целевой функции в точках, окружающих ее. При решении задачи с двумя переменными можно воспользоваться квадратным образцом, представляющим собой базовую точку в центре и пробные точки в вершинах. Затем «наилучшая» из пяти исследуемых точек выбирается в качестве следующей базовой точки. В задачах большой размерности вычисление значений целевой функции проводится во всех вершинах, а также в центре тяжести гиперкуба. Если количество переменных (размерность пространства, в котором ведется поиск) равно N , то поиск по кубическому образцу требует $2^N + 1$ вычислений значения функций для одного

образца. При увеличении размерности задачи необходимое количество вычислений значения целевой функции чрезвычайно быстро возрастает [10].

Адаптация диффузионно-дрейфовой модели для наноразмерных приборов

Решение выявленных проблем и противоречий заключается в оптимизации диффузионно-дрейфовой модели с целью достижения адекватности моделирования наноразмерных МОП-структур, используя экспериментальные данные или результаты более точного моделирования. С этой целью будем варьировать значения плотности состояний в области канала. Также введем корректирующие коэффициенты в выражения моделей подвижности в поперечном и продольном электрическом поле, основываясь на анализе уравнений модели и результатах проведенных отсеивающих экспериментов [11]. В качестве модели подвижности в поперечном электрическом поле рассматривается модель Дарвиша.

Для демонстрации возможностей предложенного подхода адаптации диффузионно-дрейфовой модели использовалась n -канальная МОП-структура с длиной канала 90 нм, результаты экспериментального измерения вольтамперных характеристик (ВАХ) которой получены Microsystems Technology Laboratory [12]. После введения корректирующих коэффициентов выражение для описания вклада, обусловленного рассеянием на акустических фонах, приняло вид:

$$\mu_{ac,n} = \left(\frac{B_n}{\left(\frac{E_{\perp}}{E_2}\right)^{0,97E_n}} + \frac{C_n \left(\frac{N}{N_2}\right)^{\tau_n}}{\left(\frac{E_{\perp}}{E_2}\right)^{0,97D_n}} \right) \frac{1}{T_n}. \quad (7)$$

Выражение для вычисления коэффициента γ :

$$\gamma_n = 1,0455A_n + \frac{\alpha_n(n+p)}{\left(\frac{N}{N_2}\right)^{\eta_n}}. \quad (8)$$

Выражения для скорости насыщения и подвижности в продольном электрическом поле соответственно имеют вид:

$$v_{sat} = \frac{0,97\alpha}{1 + \theta \exp\left(\frac{T_L}{T_{nom}}\right)}, \quad (9)$$

$$\mu(E_{\parallel}, E_{\perp}) = \frac{\mu_0(E_{\perp})E_{\parallel}}{\left[1 + \left(\frac{\mu_0(E_{\perp})E_{\parallel}}{v_{sat}}\right)^{0,56\beta}\right]^{1/0,56\beta}}. \quad (10)$$

Новое значение эффективной плотности состояний для электронов равно $2.5e18 \text{ см}^{-3}$.

На рис. 2 и 3 представлены ВАХ МОП-транзистора, полученные экспериментально и в результате моделирования с использованием диффузионно-дрейфовой модели. При этом использовались значения плотности состояний и выражения модели подвижности как исходные, так и оптимизированные.

Очевидно, что результаты, полученные с использованием оптимизированных уравнений модели, соответствуют экспериментальным.

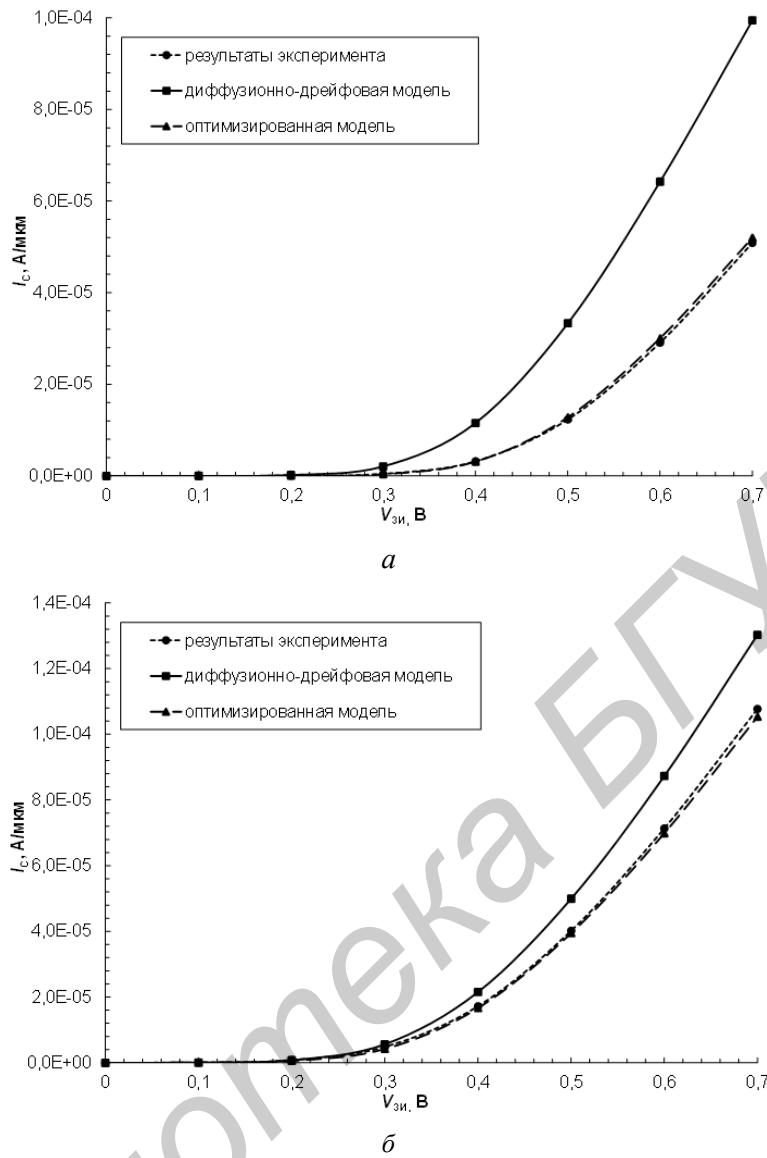


Рис. 2. ВАХ зависимости тока стока от напряжения на затворе МОП-транзистора при $U_{CИ} = 0,21$ В (а), $U_{CИ} = 2,01$ В (б)

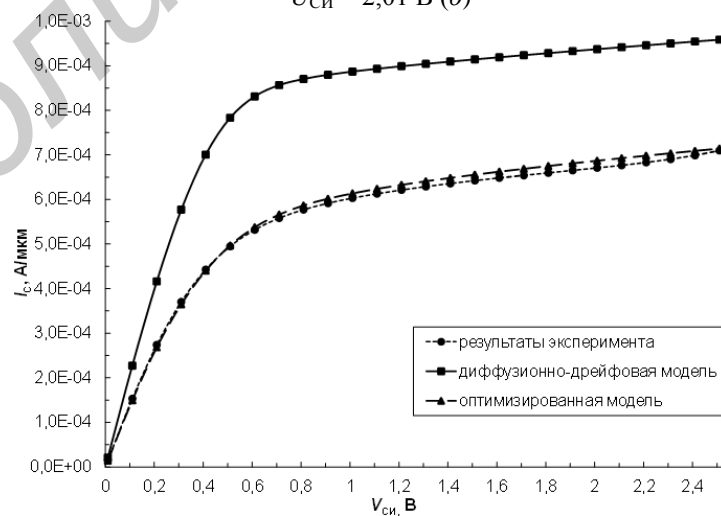


Рис. 3. ВАХ зависимости тока стока от напряжения на стоке МОП-транзистора при $U_{ZИ} = 2$ В

Заклучение

Рассмотрен 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 при описании физических механизмов транспорта носителей заряда, которые бы эффективно учитывали квантово-механические механизмы транспорта, характерные для наноразмерных приборов. С этой целью варьировались значения плотности состояний в области канала, а также были введены корректирующие коэффициенты в выражения моделей подвижности в поперечном и продольном электрических полях.

Разработан и использован при оптимизации параметров диффузионно-дрейфовой модели модифицированный метод прямого поиска для МОП-транзистора с длиной канала 90 нм. Анализ результатов свидетельствует о перспективности использования метода прямого поиска в задачах оптимизации параметров физико-математических моделей. Преимуществом представленного алгоритма является относительная простота реализации и отсутствие необходимости анализа большого количества комбинаций значимых параметров.

Результаты, полученные с использованием оптимизированной диффузионно-дрейфовой модели, соответствуют экспериментальным, что свидетельствует об эффективности применения предложенного подхода при адаптации физико-математических моделей.

DRIFT-DIFFUSION MODEL PARAMETERS OPTIMIZATION

TRUNG TRAN TUAN, A.M. BOROVIK, V.R. STEMPIISKY

Abstract

A new approach of nanoscale MOSFETs electrical characteristics calculating, the essence of which is the use of correction factors, as well as such values of classic drift-diffusion models, which would effectively take into account the quantum-mechanical transport mechanisms is proposed. Modified direct search method of drift-diffusion model optimization for MOSFET with a 90 nm channel length is developed and used.

Список литературы

1. *Vasileska D., Khan H.R., Ahmed S.S.* // Nano-Electronic Devices. 2005. Vol. 4. P. 305–361.
2. *Нелаев В.В., Стелпицкий 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. *Красников Г.Я.* Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. М., 2011.
5. ATLAS User's Manual. Device simulation software. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: atlas_users.pdf. – Дата доступа: 21.07.2014.
6. *Darwish M., Lentz J.L., Pinto M.R. et al* // IEEE Trans. Electron Devices. 1997. Vol. 44 (9). P. 1529–1538.
7. *Борисенко В.Е., Воробьева А.И., Данилюк А.Л. и др.* Нанoeлектроника: Теория и практика. М., 2013.
8. *Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А.* Основы нанoeлектроники: Учебное пособие. Новосибирск, 2000.
9. *Аоки М.* Введение в методы оптимизации. М., 1977.
10. *Реклейтис Г., Рейвиндран А., Регсдел К.* Оптимизация в технике. Книга 1. М., 1986.
11. *Stempitsky V., Trung Tran Tuan, Borovik A.* // Proc. of Int. Workshop on New Approaches to High-Tech: Nano-Design, Technology, Computer Simulations (NDTCS'2013). Minsk, 11–15 June 2013. P. 85–87.
12. «Well-Tempered» Bulk-Si NMOSFET Device Home Page. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www-mtl.mit.edu/researchgroups/Well/>. – Дата доступа: 21.07.2014.