

Учреждение образования “Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники”

УДК 621.382.3

БУДНИК Артур Владимирович

**ФИЗИКО-ТОПОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
МОП-ТРАНЗИСТОРОВ ДЛЯ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КМОП-СХЕМ**

Специальность 05.27.01 – твердотельная электроника,
радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника,
приборы на квантовых эффектах

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Минск 2001

Работа выполнена в Учреждении образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники”.

Научный руководитель:

к.т.н., доцент Корзун А.И.

Официальные оппоненты:

д.ф.-м.н., доцент Борздов В.М.
к.т.н., доцент Черных А.Г.

Опонирующая организация:

ОАО “Минский научно-исследовательский приборостроительный институт”

Защита состоится: 17 мая 2001 г. в 14⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д.02.15.03 в Учреждении образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники” по адресу (220027, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, БГУИР, 1 уч. корпус, тел. 239-89-89).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники”.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

На современном этапе развития радиоэлектронной техники, при разработке и проектировании устройств, выполняемых на основе КМОП интегральных микросхем, возникает задача правильного выбора модели, удовлетворительно описывающей поведение МОП транзистора в условиях конкретной технологии изготовления. Хотя для анализа, разработки и проектирования цифровых устройств КМОП БИС, удовлетворительные результаты могут быть получены при использовании упрощенных моделей МОП-транзисторов, использование этих моделей для разработки аналоговых устройств КМОП БИС приводит к большим погрешностям проектирования.

Причинами неадекватности являются: пренебрежение областью слабой инверсии, нелинейной взаимосвязью поверхностного потенциала полупроводника с напряжением на электродах в предпороговом режиме и неоднозначность порогового напряжения.

При разработке моделей МОП-транзисторов необходимо учитывать, что КМОП ИС могут быть использованы при изготовлении устройств, работающих на аккумуляторных элементах. К этим устройствам предъявляются требования по снижению энергопотребления, обеспечивающее повышение срока службы питающих элементов. Это возможно достигнуть обеспечив работу МОП-транзисторов при малых значениях тока стока, т.е. в предпороговом режиме.

Существующие модели МОП-транзисторов можно разделить на два класса: модели, основанные на численных методах решения основных уравнений и аналитические модели. Анализ схем с помощью численных моделей приводит к большим затратам машинного времени, чем при использовании аналитических моделей. Кроме того, существующие модели требуют разработки и изготовления тестовых структур, что оказывает влияние на увеличение материальных затрат на разработку и производство изделия микроэлектроники в целом.

Связь работы с крупными научными программами, темами

Работа выполнялась в лаборатории “Материалы и элементы электронной и сверхпроводниковой техники” Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники в рамках Республиканской научно-технической программы “Информатика”, утвержденной постановлением комиссии Президиума Совета Министров Республики Беларусь по вопросам научно-технического прогресса, протокол № 5/116 от 30 июня 1992 года (ГБЦ 00-3088). Результаты работы использованы при выполнении программы ГКНТ СССР по развитию средств вычислительной техники и хозяйственных работ (х/д 87-1035, 90-1076, 90-1033)

Цель диссертационной работы – разработка физико-топологической модели МОП-транзистора, основанной на зарядовом приближении, учитывающей

зависимость поверхностного потенциала, подвижности носителей заряда от режимов его работы в предпороговой области и сильной инверсии и обеспечивающей адекватность расчета выходной вольт-амперной характеристики (ВАХ).

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **основные задачи**:

1. Проанализировать современные методы аналитического моделирования, выявить границы применения существующих моделей МОП-транзистора при анализе различных режимов его работы.

2. Разработать физико-топологическую модель МОП-транзистора, адекватно описывающую выходную ВАХ в предпороговом режиме и сильной инверсии.

3. Определить влияние поверхностного потенциала ϕ_s на адекватность моделирования выходной вольт-амперной характеристики МОП-транзистора и получить выражение, описывающее поведение ϕ_s в предпороговом режиме и сильной инверсии.

4. Разработать модель эффективной подвижности носителей заряда на основании исследования влияния на нее различных механизмов рассеивания носителей заряда.

5. На базе разработанной модели и программного обеспечения смоделировать МОП-транзистор и сравнить экспериментальные и теоретические данные выходной ВАХ прибора. Провести сравнительный анализ результатов моделирования с использованием разработанной модели и других программных продуктов, используемых для моделирования элементов ИС.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования в диссертационной работе является элемент КМОП интегральных схем, при этом в качестве предмета исследования рассматривается моделирование выходной вольт-амперной характеристики МОП-транзистора.

Методология и методы проведенного исследования. При разработке модели тока стока, алгоритмов и комплекса программ расчета вольт-амперных характеристик МОП-транзистора использовалось зарядовое приближение (заряд подзатворного слоя полупроводника описывается выражениями, полученными при решении уравнения Пуассона), численные методы решения трансцендентных уравнений (метод последовательного приближения и метод Ньютона), методы интегрирования и дифференцирования.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. Проведен системный анализ существующих моделей МОП-транзистора, в результате которого определены погрешности моделей по отношению к выражению, наиболее адекватно описывающему выходную вольт-амперную характеристику в широком диапазоне значений напряжения на затворе, и установлены границы применения этих моделей в различных областях работы транзистора.

2. Разработана физико-топологическая модель МОП-транзистора, основанная на зарядовом приближении, учитывающая зависимость поверхностного потенциала ϕ_s , подвижности носителей заряда от режимов его работы в предпороговой области и сильной инверсии и обеспечивающей адекватность расчета выходной ВАХ. Установлено, что модели выходной ВАХ МОП-транзистора могут адекватно описывать только ту область характеристики, для которой адекватно выражение, описывающие ϕ_s , лежащее в основе данной модели.

3. Установлена степень влияния эффектов рассеивания носителей заряда на точность моделирования подвижности и разработана модель эффективной подвижности, включающая в себя основные механизмы рассеивания носителей заряда, основанная на зарядовом приближении, используемом в предлагаемой модели выходной ВАХ МОП-транзистора.

4. Предложено аналитическое выражение для определения значения поверхностного потенциала, используемое в модели эффективной подвижности носителей заряда и выходной ВАХ МОП-транзистора. Определено, что выражение, корректно описывающие поведение поверхностного потенциала ϕ_s в предпороговой области неадекватно определяет ϕ_s в режиме сильной инверсии, и наоборот, использование выражения для ϕ_s , действительного в режимах сильной инверсии или насыщения при моделировании в предпороговой области приводит к существенной неточности вычислений, обусловленной допущениями принятыми при получении выражений определяющим ϕ_s в каждом из указанных режимов.

Установлено, что в режиме сильной инверсии у стоковой области может существовать слабая инверсия полупроводника.

5. Разработаны алгоритм и программа расчета, основанные на предложенных моделях тока стока и эффективной подвижности носителей заряда, а также на аналитическом выражении для расчета поверхностного потенциала ϕ_s , позволяющие адекватно моделировать выходную ВАХ МОП-транзистора в предпороговом режиме и сильной инверсии. Программа характеризуется оригинальной структурой и высокой эффективностью.

6. Определено, что в отличие от моделей программы PSPICE, разработанная физико-топологическая модель МОП-транзистора описана сравнительно простыми аналитическими выражениями, полученными на основе зарядового приближения и включающими в себя основные параметры, входящие в классические уравнения полупроводника. Отличием предложенной аналитической модели МОП-транзистора от ряда известных является то, что имеется возможность описания единым выражением тока стока в предпороговом режиме и сильной инверсии.

Практическая значимость полученных результатов заключается в следующем:

Результаты работы были получены и реализованы в рамках госбюджетной и ряда хоздоговорных работ ГБЦ 00-3088, х/д 87-1035, 90-1076, 90-1033;

выполненных в лаборатории “Материалы и элементы электронной и сверхпроводниковой техники” Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. Выполнен системный анализ существующих моделей МОП-транзистора, разработаны модели тока стока и подвижности носителей заряда, получено выражение, описывающее поведение поверхностного потенциала.

На основе предложенных в работе решений:

- установлено влияние параметров модели МОП-транзистора на адекватность моделирования и даны рекомендации при выборе модели для проектирования КМОП-схем;

- разработана модель тока стока, позволяющая проектировать МОП-транзистор в предпороговом режиме и сильной инверсии и адаптированная на применение в составе современных средств схемотехнического проектирования аналоговых схем (PSPICE, MicroCAP);

- разработаны модели подвижности носителей заряда и поверхностного потенциала, входящие в качестве параметров в модель выходной ВАХ и обеспечивающие удовлетворительные результаты моделирования МОП-транзистора;

- разработан комплекс программ моделирования тока стока МОП-транзисторов по различным моделям, как упрощенным, так и более строгим и адекватным, и характеризующийся возможностью определения параметров для каждой из рассматриваемых моделей.

Разработанная модель и программное обеспечение моделирования МОП-транзисторов используются разработчиками микросхем ГП НИИ КТП “Белмикросистемы” (акт использования от 19.04.2000) при выборе оптимальной элементной базы, постановке на производство и серийном изготовлении МОП и КМОП интегральных микросхем различного назначения. Применение предложенной модели и ее программного обеспечения позволит повысить достоверность результатов расчетов активных и пассивных элементов интегральных микросхем при проектировании и анализе, а также существенно уменьшить количество экспериментальных и тестовых партий, необходимых для настройки и оптимизации технологических процессов серийного производства современных КМОП интегральных микросхем, что оказывает существенное влияние на сроки разработки и внедрения продукции, а также на ее себестоимость.

Физико-топологическая модель и программное обеспечение были внедрены в учебный процесс в курсе “Проектирование и производство интегральных схем”.

Результаты работы могут найти применение на многих предприятиях радиоэлектронной отрасли Республики Беларусь. Разработанная модель МОП-транзистора, полученные выражения для определения ее параметров, а также программное обеспечение будут интересны разработчикам микросхем и их элементной базы таких предприятий, как НПО “Интеграл”, МНИПИ, НИИ

ЭВМ, поскольку у них появится возможность корректного моделирования КМОП ИС с наименьшими затратами времени и средств, так как для определения параметров полученной модели не требуется разработки и изготовления значительного числа тестовых структур, проведения множества измерений и расчета входных параметров, необходимых в случае использования других моделей, что естественно, оказывает существенное влияние на сроки разработки и внедрения продукции, а также ее себестоимости.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Физико-топологическая модель МОП-транзистора, основанная на зарядовом приближении, адекватно описывающая выходную ВАХ для предпороговой области и сильной инверсии, учитывающей предложенную зависимость поверхностного потенциала ϕ_s и подвижности носителей заряда от режимов работы по напряжению.

2. Модель эффективной подвижности носителей заряда, разработанной на основе анализа влияния различных механизмов рассеяния, используемая при расчете выходной ВАХ МОП-транзистора.

3. Аналитическое выражение для определения значения поверхностного потенциала ϕ_s , используемое в моделях эффективной подвижности носителей заряда и выходной ВАХ МОП-транзистора.

4. Алгоритм и программа расчета, использующие предложенные модели тока стока и эффективной подвижности носителей заряда, а также аналитическое выражение для расчета поверхностного потенциала, позволяющие моделировать выходную ВАХ МОП-транзистора в предпороговом режиме и сильной инверсии.

Личный вклад соискателя. Все результаты, приведенные в диссертации, получены либо лично соискателем, либо с его непосредственным участием. Вклад научного руководителя доцента А.И. Корзуна связан с совместной разработкой модели выходной ВАХ МОП-транзистора, аналитического выражения для определения значения поверхностного потенциала, а также с постановкой задач и целей исследования. Э.А. Матсон принимал участие в разработке программы расчета параметров модели и его выходных характеристик. Вклад остальных соавторов связан с обсуждением результатов моделирования.

Апробация результатов диссертации. Основные положения диссертационной работы докладывались на: научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, сотрудников, докторантов, аспирантов (Минск, 1994), научно-технической конференции «Направления и перспективы развития микроэлементной базы, электронных блоков и узлов, устройств индикации и считывания, аудио- и видеотехнических систем связи и информатики (Минск, 1994), научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники электроники и связи» (Минск, 1995), Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники» (Таганрог, 1995),

II Международной научно-технической конференции «Современные средства связи» (Нарочь, 1997), III Международной научно-технической конференции «Современные средства связи» (Нарочь, 1998).

Опубликованность результатов. По теме диссертации опубликовано 10 статей и 6 тезисов докладов в сборниках тезисов научных конференций. Общее количество опубликованных материалов составляет 169 страниц.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Общий объем диссертации составляет 138 страниц, в том числе 30 рисунков на 30 страницах, 8 приложений на 24 страницах, список использованных источников из 107 наименований на 7 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

В общей характеристике работы обоснованы актуальность и новизна рассматриваемой темы, сформулированы цели и основные задачи исследования, представлены основные положения диссертации, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ известных моделей, описывающих вольт-амперные характеристики МОП – транзисторов. Рассмотрены модели, основанные на диффузионной и дрейфовой составляющей тока стока, а также определены границы применения для различных областей работы транзистора. На современном этапе развития радиоэлектронной техники, при разработке и проектировании устройств выполняемых на основе КМОП интегральных микросхемах, возникает задача правильного выбора модели, удовлетворительно описывающей поведение МОП – транзистора в условиях конкретной технологии изготовления. Это особенно важно при проектировании низкоэнергетических устройств.

Модели основанные только на дрейфовой составляющей тока стока при конкретном моделировании не могут быть использованы для анализа в допороговой области, и наоборот, модели включающие только диффузионную составляющую, используются до значения $V_{c\text{нас}}$, определяющем напряжение на стоке при начале насыщения. Показано, что разработанные модели, включающие в себя и диффузионную и дрейфовую составляющие описываются очень громоздкими выражениями, использующие интегралы, что, естественно, приводит к увеличению времени проектирования КМОП – устройств. Кроме того, существует проблема корректного определения пределов интегрирования, то есть значения поверхностного потенциала у истока и стока МОП – транзистора.

Существующие модели можно разбить на два класса: модели, построенные на основе численных методов решения основных уравнений, описывающих физические процессы в полупроводнике (точные модели) и модели, полученные аналитически с помощью различных упрощающих допущений.

Естественно, наиболее точные результаты могут быть получены на основе численного моделирования МОП – транзисторов, хотя при этом увеличивается время анализа схемы, по отношению к аналитическим моделям. Кроме того, при разработке моделей МОП – транзисторов необходимо учитывать, что КМОП ИС могут использоваться при изготовлении устройств, работающих на аккумуляторных элементах. К таким устройствам предъявляются требования по снижению энергопотребления, обеспечивающие повышение срока службы питающих элементов. Это возможно достигнуть обеспечив работу МОП – транзисторов при малых значениях тока стока.

Определено, что для более корректного моделирования необходимо получить модель в виде группы сравнительно простых уравнений, достаточно точно описывающих поведение тока стока, поверхностного потенциала и подвижности носителей заряда вдоль канала, в различных режимах работы МОП – транзистора.

Во второй главе проведена оптимизация зарядовой модели длинноканальных МОП – транзисторов на основе принятых допущений в данной работе, а также зарядового приближения. Заряд подзатворного слоя полупроводника описывается выражениями, полученными при решении уравнения Пуассона. В существующем технологическом процессе формирования типа проводимости и коррекция "пороговых" напряжений осуществляется путем ионной имплантации примесей. В низкороговых КМОП БИС при напряжениях на электродах не превышающих 1,5...1,6 В и токах $10^6 \dots 10^9$ А, транзисторы работают при слабых электрических полях. Поэтому, правомерно использование простых аппроксимаций, связывающих заряд подзатворного слоя с концентрацией носителей. Можно считать, что заряды локализованы в тонком приповерхностном слое полупроводника и воспользоваться для анализа аппроксимацией величины заряда, равной произведению заряда на концентрацию носителей заряда. Соответственно плотность тока в каналах определится как:

$$I_n = -\mu_n [Q_n \cdot \text{grad}\phi_n - (1/b) \cdot \text{grad}Q_n] \quad (1)$$

$$I_p = -\mu_p [Q_p \cdot \text{grad}\phi_p - (1/b) \cdot \text{grad}Q_p] \quad (2)$$

где, I_n, I_p – токи истоков, n – и p – канального МОП – транзисторов; μ_n, μ_p – подвижности носителей заряда; Q_n, Q_p – заряды приповерхностного слоя полупроводника n – и p – канального МОП – транзистора; $1/b$ – температурный коэффициент.

Таким образом задача нахождения выражений для ВАХ МОП – транзистора сводится к корректному моделированию заряда канала и подвижности носителей заряда, которые определяются величиной поверхностного потенциала канала.

На основании решения уравнения Пуассона найдено выражение для общей плотности пространственного заряда в каждой точке канала $Q_{sn}(y)$, а также уравнение, определяющее плотность подвижных носителей заряда в канале

$Q_n(y)$. Используя полученную формулу и согласно уравнений (1) и (2), можно определить выражение для тока стока n – канального МОП – транзистора, которые для машинного анализа представлены следующими уравнениями:

$$I_d = (W/L)M_n^*C_{ox} \left\{ \phi_s(V_{gfb} + b_1) - 1/2(\phi_{sl}^2 - \phi_{so}^2) - F_{d1} + F_{d2} \right\}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{где } F_{d1} &= \frac{2}{3}L_n(F_{da}^3 - F_{db}^3); & F_{db} &= (\phi_{so} - V_{bb1})^{1/2}; & V_{bb1} &= V_b - b_1; \\ F_{d2} &= b_1L_n(F_{da} - F_{db}); & \phi_s &= \phi_{sl} - \phi_{so}; & b_1 &= 1/b; \\ F_{da} &= (\phi_{sl} - V_{bb1})^{1/2}; & V_{gfb} &= V_g - V_{fb}; \end{aligned}$$

где W/L – отношение ширины канала к длине; μ_n – подвижности носителей заряда; C_{ox} – удельная емкость затвора; V_g – напряженность затвора; V_{fb} – напряжение плоских зон; $1/b$ – температурный потенциал; ϕ_{sl}, ϕ_{so} – поверхностный потенциал у стока и истока соответственно; L_n – дебаевская длина. Аналогичное выражение получено для p -канального МОП-транзистора.

Полученные выражения, определяющие вольт-амперные характеристики n - и p -канальных МОП – транзисторов, в виде, представленном выше, позволяют сократить время, необходимое для моделирования МОП – транзистора и КМОП интегральной схемы в целом, а также провести сравнительный анализ существующих моделей МОП ПТ.

Как было отмечено, другим важнейшим параметром МОП – транзистора является поверхностный потенциал ϕ_s . Выражение, описывающее поведение ϕ_s в значительной степени влияет на адекватность моделирования тока стока I_d , а также на сложность и громоздкость уравнения определяющее значение I_d .

Если использовать приближение

$$\phi_s = 2\phi_F + V(y), \quad (4)$$

то можно получить выражение для I_d при сильно инвертированной поверхности, т.е. в ненасыщенном режиме:

$$\begin{aligned} I_d &= (W/L)M_n^*C_{ox}(V_g - V_{fb} - 2\phi_F)(V_d - V_s) - (V_d^2 - V_s^2)/2 - \\ &- (2/3)L_n[(V_d + 2\phi_F - V_b - 1/b)^{3/2} - (V_s + 2\phi_F - V_b - 1/b)^{3/2}]. \end{aligned} \quad (5)$$

Лучший результат достигается, если поверхностный потенциал приближенно выразить следующим образом:

$$\phi_s = \phi_{so} + V(y). \quad (6)$$

В этом случае для ненасыщенного режима получим уравнение для тока стока:

$$\begin{aligned} I_d &= (W/L)M_n^*C_{ox} \left\{ (V_g - V_{fb} - \phi_{so})(V_d - V_s) - (V_d^2 - V_s^2)/2 - \right. \\ &\left. - (2/3)L_n[(V_d + \phi_{so} - V_b - 1/b)^{3/2} - (V_s + \phi_{so} - V_b - 1/b)^{3/2}] \right\}. \end{aligned} \quad (7)$$

С другой стороны заряд можно рассматривать как функцию поверхностного потенциала, тогда:

$$I_d = (W/L)\mu_n^* \int_{\phi_{so}}^{\phi_{si}} Q_n \frac{dV}{d\phi_s} d\phi_s. \quad (8)$$

После интегрирования (8) получим выражение для I_d следующего вида:

$$I_d = (W/L)M_n^* C_{ox} \left\{ (1/b)\phi_s + (3L_n/b) \left[F_{db}^{1/2} - F_{db}^{1/2} \right] + \right. \\ \left. + (L_n^2/b) \ln \left[\frac{\phi_s(L) - L_n F_{da}^{1/2} - V_g - V_{fb}}{\phi_s(0) - L_n F_{db}^{1/2} - V_g - V_{fb}} \right] + (2L_n/b) F_{dc}^{1/2} \times \right. \\ \left. \times \ln \left[\frac{F_{da}^{1/2} - F_{dc}^{1/2} - L_n/2}{F_{db}^{1/2} - F_{dc}^{1/2} - L_n/2} \times \frac{F_{db}^{1/2} + F_{dc}^{1/2} - L_n/2}{F_{da}^{1/2} + F_{dc}^{1/2} - L_n/2} \right] \right\} + I_d^{(3)}, \quad (9)$$

где

$$F_{dc} = V_0 + (L_n^2/4); \\ V_0 = V_g - V_{fb} - V_b - b_1.$$

Уравнение (9) также действительно во всех областях работы МОП – транзистора включая предпороговый режим и сильную инверсию.

В предпороговом режиме ϕ_s описывается следующим образом:

$$\phi_s = V_g - V_{fb} - L_n^2/2 - L_n \left\{ (L_n/2)^2 + V_0 \right\}^{1/2}. \quad (10)$$

В этом случае ток стока равен:

$$I_d = (W/L)M_n^* C_{ox} (L_n/2b) (I_{dc}^{1/2} - L_n/2) \times \\ \times \exp \left[b(V_1 - V_s) \right] \cdot \left[\exp b(V_s - V_d) - 1 \right], \quad (11)$$

где V_1 определяется следующим образом:

$$V_1 = V_g - V_{fb} - 2\phi_F + (L_n^2/2) - L_n \left[(L_n/2)^2 - V_0 \right]^{1/2} - \\ - (1/b) \ln b - (2/b) \ln \left\{ - (L_n/2) + \left[(L_n/2)^2 + V_0 \right]^{1/2} \right\}. \quad (12)$$

Для вышеприведенных моделей МОП-транзисторов рассчитаны нормированные значения тока стока, а также погрешность различных моделей по отношению к модели (9), как более точной (рис. 1).

Согласно полученным данным установлено, что обычная модель (5), для которой $\phi_s = 2\phi_F + V(y)$ имеет погрешность около 10% почти при всех значениях потенциала затвора. Для больших числовых значений можно использовать вторую модель (7), для которой $\phi_s = \phi_{so} + V(y)$. Эта модель дает хорошее приближение, т.к. погрешность составляет около 5% для $V_g \gg 8,5$ В. Однако для потенциалов затвора около порогового напряжения погрешность тока резко возрастает по сравнению с моделью (9). На рисунке 1 показано, что аппроксимация (11) в самом деле действительно в предпороговой

стока МОП-транзистора. Показано, что наибольшее влияние на эффективную подвижность носителей заряда μ^* оказывают составляющие, определяемые рассеянием на кристаллической решетке μ^L и ионизированных атомах примеси μ^I .

Разработана модель составляющих подвижности носителей заряда μ^L и μ^I . Для определения эффективной подвижности заряда с учетом влияния вертикальной E_V и продольной E_L составляющими электрического поля используется следующее выражение:

$$\mu^* = \mu^{LI} / (F_1(E_V) \cdot F_2(E_L)), \quad (13)$$

где μ^{LI} – подвижность носителей заряда, определяемая рассеиванием на кристаллической решетке и ионизированных атомах примеси;

$F_1(E_V)$ и $F_2(E_L)$ – функции, описывающие изменение подвижности носителей заряда, определяемые вертикальной и продольной составляющими электрического поля соответственно.

Выражение для подвижности носителей заряда μ^{LI} получено по правилу Маттиессена. Функцию, описывающую изменение подвижности носителей заряда, определяемую вертикальной составляющей электрического поля определяется по формуле:

$$F_1(E_V) = 1 + BE_V; \quad (14)$$

где B – коэффициент изменения подвижности носителей заряда, определяемый полем E_V . ($B \approx 2 \cdot 10^{-6}$ см/В).

Вертикальная составляющая электрического поля определяется следующим образом:

$$E_V = (Q_{sn}(y) + Q_{dn}) / (2\epsilon_s \epsilon_0), \quad (15)$$

где $Q_{sn}(y)$ – плотность пространственного заряда в каждой точке канала;

Q_{dn} – плотность заряда обедненного слоя полупроводника.

Для определения величин $Q_{sn}(y)$ и Q_{dn} используются выражения на основе которых получено уравнение для тока стока (3).

Для определения функции $F_2(E_L)$ используется следующее выражение:

$$F_2(E_L) = \left[1 + ((\mu^{LI} \cdot E_L) / V^{sat}) \right]^\alpha, \quad (16)$$

где α – эмпирический параметр, который стремится к 2 для электронов и к 1 для дырок;

V^{sat} – скорость насыщения носителей заряда.

Определенно, что точность, с которой может быть вычислен ток стока в выражении (3), существенно зависит от точности вычисления поверхностного потенциала у истока и стока МОП-транзистора. Кроме того, поверхностный потенциал ϕ_s , как параметр, входит во многие выражения, по которым определяются параметры модели МОП-транзистора, что в свою очередь также ока-

зывает влияние на точность моделирования вольт-амперных характеристик МОП-транзистора.

На основании зарядовой модели получено выражение, описывающее поведение поверхностного потенциала в канале МОП-транзистора:

$$\phi_s = -L_n \left\{ \phi_s - V_b + (1/b) [F_{n1}(\phi_s) - 1 + F_{n2}(\phi_s) - F_{n3}(\phi_s)] \right\}^{1/2} + V_g - V_{fb} \quad (17)$$

где $F_{n1}(\phi_s) = \exp[-b(\phi_s - V_b)]$; $F_{n2}(\phi_s) = \exp[b(\phi_s - 2\phi_F - V(y))]$;

$$F_{n3}(\phi_s) = \exp[b(V_b - 2\phi_F - V(y))].$$

Таким образом, для определения тока стока, описанного выражением необходимо найти значение ϕ_s у истока ϕ_{s0} и стока ϕ_{sL} , а также подставить полученное выражение ϕ_s в формулу для определения подвижности носителей заряда и вычислить затем конечное значение тока МОП-транзистора.

Выполнен анализ и рассчитаны нормированные значения ϕ_s для различных уравнений, описывающих поведение поверхностного потенциала в канале в широком диапазоне V_g , при $N_a = 10^{15} \text{ см}^{-3}$; $t_{ox} = 0,1 \text{ мкм}$; $V_S = V_b = V_{fb} = 0$ (рис. 2 а, б). Пунктирной линией указана зависимость ϕ_s , определяемая по двум выражениям: для предпорогового режима по уравнению (10), а в сильной инверсии:

$$\phi_s = 2\phi_F + V(y) + (1/b) \ln(b/L_n^2) + (2/b) \ln(V_g - V_{fb} - \phi_s). \quad (18)$$

Сплошной линией обозначена зависимость ϕ_s , вычисленная по полученному уравнению (17). Линией, состоящей из точки и пунктира, указана зависимость, которая является лишь первой по порядку приближением уравнения (18) и описывается выражением (4).

Подтверждено предположение о том, что при отсечке канала, которая происходит при определенном значении V_a и больших $bV(y)$ с ростом V_g с этого момента при дальнейшем увеличении $bV(y)$ в области стока существует слабая инверсия поверхности полупроводника.

Кроме того, в микромощных КМОП ИС потенциал поверхности в этой области определяется выражением (19), и в насыщении ϕ_s достигает своего максимального значения:

$$\phi_{sat} = V_g - V_{fb} + L_n^2/2 - L_n \left[(L_n/2)^2 + V_o \right]^{1/2} \quad (19)$$

Согласно рис. 2, выражение для определения поверхностного потенциала (17), полученное на основе зарядового приближения, действительно во всех режимах работы МОП-транзистора и соответственно при определении других параметров модели МОП-транзисторов.

В четвертой главе разработаны программы для расчета параметров полученной модели выходной вольт-амперной характеристики МОП-транзистора. Проанализированы методы численного решения трансцендентного уравнения (17), описывающее поведение поверхностного потенциала во всех режимах

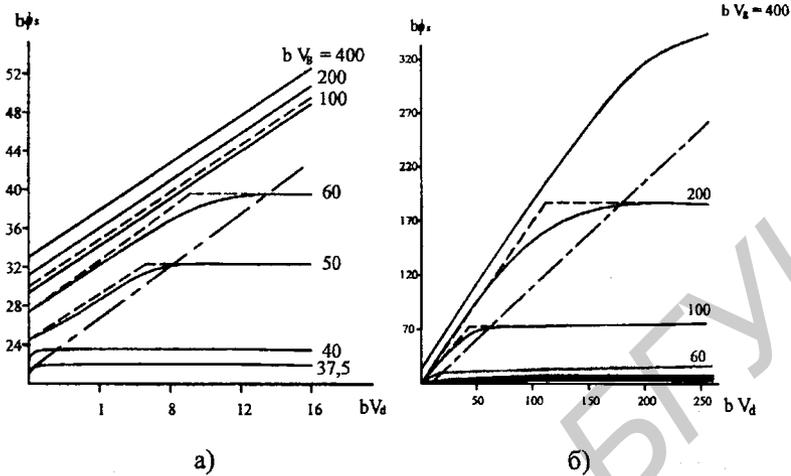


Рис.2.

работы МОП-транзистора. Определен наилучший метод решения данного уравнения – метод Ньютона (метод касательных). Для реализации данного метода получены первая и вторая производные уравнения (17).

Разработаны алгоритм и программа расчета поверхностного потенциала. Используя полученные и представленные в третьей главе выражения для определения подвижности носителей заряда, а также уравнение, описывающее поведение поверхностного потенциала и формулы, определяющие ток стока, разработан алгоритм и программа расчета вольт-амперных характеристик МОП-транзисторов *p*- и *n*- типа проводимости.

Проведен сравнительный анализ полученной модели МОП-транзистора и моделей различного уровня, используемых в программе схемотехнического моделирования PSPICE.

Модель тока стока МОП – транзистора, представленная в данной диссертационной работе и описанная уравнением (3), существенно отличается от моделей, используемых в программе PSPICE. Кроме того, полученные выражения для определения поверхностного потенциала ϕ_s и эффективной подвижности носителей заряда позволяют моделировать вольт-амперные характеристики МОП – транзисторов не требуя изготовления значительного числа тестовых структур и проведения множества измерений. Напротив, для использования моделей различного уровня сложности программы PSPICE сначала необходимо идентифицировать их параметры по результатам измерений тестовых структур со следующими элементами: транзисторы с длинным ($L > 20$ мкм) и коротким ($L < 3$ мкм) каналом; транзисторы с широким ($W > 20$ мкм) и узким ($W < 3$ мкм) каналом; резисторы диффузионные; резисторы поликремневые;

На рис. 3 представлены вольт-амперные характеристики МОП – транзисторов, рассчитанные с использованием программы PSPICE и с помощью модели, предлагаемой в данной диссертационной работе. Как видно из рис. 3 модель, описанная выражением (3) и использующая полученные уравнения, описывающие поведение поверхностного потенциала ϕ_s и определяющие значение эффективной подвижности носителей заряда μ^* , а также разработанный алгоритм и программу расчета ВАХ МОП – транзистора, имеет лучшее приближение к экспериментальным данным чем программа PSPICE. Улучшить совпадение экспериментальных данных и значений, рассчитанных по модели PSPICE можно путем идентификации всех параметров данной модели, для чего необходимо изготовить и провести измерения тестовых структур, выполнив после этого соответствующие расчеты.

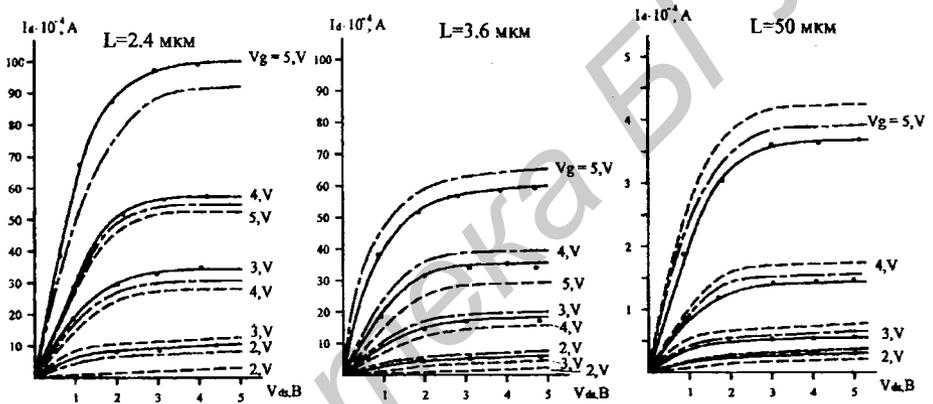


Рис. 3

Результаты расчета с использованием программы PSPICE, представленные на рис. 3 были получены без проведения предварительных расчетов и исследований, которые требует программа, а в этом случае значение многих параметров модели присваивается программой по умолчанию, что, естественно, ведет к большим погрешностям вычислений.

В приложениях представлены алгоритм, программы и результаты расчетов поверхностного потенциала ϕ_s , нормированных значений тока стока с использованием различных моделей МОП – транзистора, а также разработанный алгоритм и программа моделирования выходной вольт-амперной характеристики; материалы, подтверждающие практическое использование результатов работы в производстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные теоретические, практические и экспериментальные результаты направлены на получение удовлетворительных результатов при анализе, разработке и проектировании аналоговых устройств низкоэнергетических КМОП интегральных схем.

1. Проведен системный анализ существующих моделей, которые наиболее корректно описывают выходные характеристики длинноканальных МОП-транзисторов, установлены границы применения токовых моделей в различных областях работы этих транзисторов. Определены погрешности моделей по отношению к выражению, наиболее адекватно описывающему выходную ВАХ МОП-транзистора при различных режимах его работы и в широком диапазоне значений напряжения на затворе [2,4,7].

2. Разработана физико-топологическая модель МОП-транзистора, основанная на зарядовом приближении и описывающая его выходную ВАХ в предпороговом режиме и сильной инверсии. Выполнен сравнительный анализ моделей тока стока, использующих различные выражения, описывающие поведение поверхностного потенциала ϕ_s в предпороговом режиме работы МОП-транзистора и сильной инверсии. Установлено, что модели выходной ВАХ МОП-транзистора могут адекватно описывать только ту область характеристики, для которой адекватно выражение, описывающее ϕ_s , лежащее в основе данной модели [1,3,8,12].

3. Установлена степень влияния эффектов рассеивания носителей заряда на точность моделирования подвижности и разработана модель эффективной подвижности, включающая в себя основные механизмы рассеивания носителей заряда, основанная на зарядовом приближении, используемом в предлагаемой модели выходной ВАХ МОП-транзистора [6,9,15,16].

4. Предложено аналитическое выражение для определения значения поверхностного потенциала, используемое в модели эффективной подвижности носителей заряда и выходной ВАХ МОП-транзистора. Определено, что выражение, корректно описывающее поведение поверхностного потенциала ϕ_s в предпороговой области не адекватно определяет ϕ_s в режиме сильной инверсии, и наоборот, использование выражения для ϕ_s , действительного в режимах сильной инверсии или насыщения при моделировании в предпороговой области приводит к существенной неточности вычислений, обусловленной допущениями, принятыми при получении выражений, определяющих ϕ_s в каждом из указанных режимов [11,13,14].

Установлено, что в режиме сильной инверсии у стоковой области может существовать слабая инверсия полупроводника [13].

5. Разработаны алгоритм и программа расчета, основанные на предложенных моделях тока стока и эффективной подвижности носителей заряда, а также аналитическом выражении для расчета поверхностного потенциала ϕ_s , позволяющие адекватно моделировать выходную ВАХ МОП-транзистора в предпороговом режиме и сильной инверсии. [5,10].

6. Определено, что в отличие от моделей программы PSPICE, разработанная физико-топологическая модель МОП-транзистора описана сравнительно простыми аналитическими выражениями, полученными на основе зарядового приближения и включающими в себя основные параметры, входящие в классические уравнения полупроводника; для расчета выходной характеристики МОП-транзистора в предпороговом режиме и сильной инверсии не требуется создание значительного числа тестовых структур, проведения множества предварительных измерений и расчета входных параметров, что оказывает существенное влияние на уменьшение затрат времени и средств на разработку и внедрение изделия в целом; использование данной модели позволяет получить лучшую сходимость результатов моделирования и экспериментальных данных [10].

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Статьи

1. Будник А.В., Корзун А.И. Физико-топологическая модель МОП-транзистора, основанная на зарядовом приближении // Доклады НАН Беларуси. – 2000. – Т. 44, № 6. – С.112–114.
2. Будник А.В., Корзун А.И. Зарядовая модель для САПР низкоэнергетических схем. // Радиотехника и электроника –2001. – Вып. 25. – С.160–168.
3. Будник А. В., Русак И. М. Методы моделирования МОП-транзисторов // Известия Белорусской инженерной академии – 1997. – № 1 (3)/3 – С. 87–91.
4. Будник А.В., Корзун А.И. Сравнение аналитических моделей вольт-амперных характеристик МОП-транзисторов // Известия Белорусской инженерной академии – 1998. – № 2 (6)/2 – С. 147–150.
5. Будник А.В., Корзун А.И. Методы определения параметров моделей длинноканальных МОП-транзисторов // Известия Белорусской инженерной академии – 1998. – № 2 (6)/2 – С. 144–147.
6. Будник А.В. Анализ составляющих подвижности носителей заряда при моделировании МОП-транзисторов // Известия Белорусской инженерной академии – 1998. – № 2 (6)/2 – С. 159–163.
7. Будник А.В., Матсон Э.А. Модели токов стока МОП-транзистора / Белорус. гос. ун-т инф-ки и радиоэлектроники. – Мн.,1997. – 44с. – Деп. в институте Белинформпрогноз 3.03.97. – № 19971 // Человек и экономика. – 1997. – № 5. – С. 63.
8. Будник А.В. Аналитическая модель МОП- транзистора / Белорус. гос. ун-т инф-ки и радиоэлектроники.– Мн.,1997. –33с. – Деп. в институте Белинформпрогноз 3.03.97. – № 19972 // Человек и экономика. – 1997. – № 5. – С. 63.
9. Будник А.В., Галузо В.Е. Определение влияния составляющих подвижности носителей заряда на ток стока МОП-транзистора / Белорус. гос. ун-т инф-ки и радиоэлектроники. – Мн.,1997. –30с. – Деп. в Бел ИСА 2.05.97. – № 199712 // Человек и экономика. – 1997. – № 6. – С. 63.
10. Будник А.В. Программное обеспечение для моделирования МОП-транзистора / Белорус. гос. ун-т инф-ки и радиоэлектроники. –Мн.,1997. –20с. – Деп. в Бел ИСА 2.05.97. – № 199713 // Человек и экономика. – 1997. – № 6. – С. 63.

Тезисы докладов

11. Будник А.В., Матсон Э.А. Моделирование заряда инверсного слоя и тока МОП-транзистора // Всесоюзная научно-техническая конференция: Тез. докл. конф.: в 2 ч., – Таганрог, 1995. –Ч.2. – С.91.
12. Будник А.В., Матсон Э.А., Корзун А.И. Моделирование вольт-амперных характеристик длинноканальных МОП-транзисторов. // Научная конференция, посвященная 30-летию БГУИР: Тез. докл. конф. в 2ч. – Минск, 1994. – ч.1 – С.163.

13 Моделирование поверхностного потенциала длинноканальных МОП-транзисторов / Будник А.В., Матсон Э.А., Корзун А.И., Скрипленок С.А.// Научная конференция, посвященная 30-летию БГУИР: Тез. докл. конф.: в 2ч. – Минск, 1994. – ч.1 – С.207.

14. Будник А.В., Матсон Э.А. Определение параметров аналитической модели МОП- транзистора // Направления и перспективы развития микроэлектронной элементной базы, электронных блоков и узлов, устройств индикации и считывания для приборостроения, аудио- и видео техники, систем связи и информатики; Тез. докл. научно-технической конф.: – Минск, 1995. – С.21.

15. Будник А.В. Аналитическая модель подвижности носителей заряда // Современные проблемы радиотехники, электроники и связи; Тез. докл. научно-технической конф. – Минск, 1995. – С.246.

16. Моделирование подвижности носителей заряда / Будник А.В., Матсон Э.А., Корзун А.И., Скрипленок С.А.// Современные проблемы радиотехники, электроники и связи: Тез. докл. научно-технической конф. – Минск, 1995. – С.394.



РЭЗІЮМЭ

Буднік Артур Уладзіміравіч. Фізіка-тапалагічнае мадэляванне МАП-транзістараў для схематэхнічнага праектавання нізкаэнергетычных КМАП-схем.

Ключавыя словы: мадэль МАП-транзістара, рухомасць носьбітаў зараду, ток стока МАП-транзістара, павярхоуны патэнцыял, праграмае забеспячэнне.

Аб'ект і прадмет даследвання. Аб'ектам даследвання з'яўляецца элемент КМАП інтэгральных схем, прадметам даследвання – мадэляванне выходнай ВАХ МАП-транзістара.

Мэтай работы з'яўляецца – распрацоўка фізіка-тапалагічнай мадэлі МАП-транзістара, заснаванай на зарадавым прыбліжэнні, улічваючым залежнасць павярхоўнага патэнцыялу, рухомасці носьбітаў зараду ад рэжымаў яго работы ў перадпараговай вобласці і моцнай інверсіі, забяспечваючай адэкватнасць разліку выходнай ВАХ.

Праведзен аналіз існуючых мадэляў МАП-транзістараў і вызначаны межы іх ужывання ў розных галінах працы. Устаноўлена, што адэкватнасць вынікаў мадэлявання значна залежыць ад дакладнасці вылічэння павярхоўнага патэнцыялу. Прапанавана мадэль тока стока МАП-транзістара, заснаваная на зарадавым прыбліжэнні і сапраўдна ў перадпараговам рэжыме і моцнай інверсіі. Атрымана выражэнне карэктна апісваючае паводзіны павярхоўнага патэнцыялу ва ўсіх рэжымах работы МАП-транзістара, і ўжываемая ў прапанаванай выходнай ВАХ.

Зроблен аналіз асноўных выражэнняў, апісваючых рухомасць носьбітаў зараду, а так сама яе састаўляючых. Атрымана мадэль эфектыўнай рухомасці, улічваючай рассеянне носьбітаў зараду на іанізаваных атамах прымясі і крысталічнай рашотцы. Гэта мадэль ужывае прапанаванае выражэнне для вызначэння павярхоўнага патэнцыялу.

Распрацаваны алгарытмы і праграмы для разліку: павярхоўнага патэнцыялу шляхам чысленага вырашэння трансцэндэнтнага ўраўнення, карэктна апісваючым яго паводзіны, рухомасці носьбітаў зараду і мадэлі выходнай характарыстыкі МАП-транзістара цалкам.

Праведзен параўнальны аналіз мадэляў праграмы схематэхнічнага праектавання PSPICE з атрыманай мадэллю і праграмным забеспячэннем. У адрозненне ад праграмы PSPICE, прапанаваная мадэль апісана параўнальна простымі аналітычнымі выражэннямі, атрыманымі на аснове зарадавай мадэлі і ўключаючымі ў сябе адзін з асноўных параметраў, уваходзячы ў класічныя ўраўненні паўправадніка. Для разліку ўваходных характарыстык не патрабуецца стварэнне значнай колькасці тэставых структур, папярэдняга вымярэння і разліку ўваходных параметраў. Ужыванне гэтай мадэлі дазволіць атрымаць лепшую сыходнасць вынікаў мадэлявання і эксперыментальных дадзеных.

РЕЗЮМЕ

Будник Артур Владимирович. Физико-топологическое моделирование МОП-транзисторов для схемотехнического проектирования низкоэнергетических КМОП-схем.

Ключевые слова: модель МОП – транзистора, подвижность носителей заряда, ток стока МОП – транзистора, поверхностный потенциал, программное обеспечение.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является элемент КМОП интегральных схем, предметом исследования – моделирование выходной ВАХ МОП-транзистора.

Целью работы является разработка физико-топологической модели МОП-транзистора, основанной на зарядовом приближении, учитывающей зависимость поверхностного потенциала, подвижности носителей заряда от режима его работы в предпороговой области и сильной инверсии и обеспечивающей адекватность расчета выходной вольт-амперной характеристики.

Проведен анализ существующих моделей МОП – транзисторов и определены границы их применения в различных областях работы. Установлено, что адекватность результатов моделирования существенно зависит от точности вычислений поверхностного потенциала. Предложена модель тока стока МОП – транзистора, основанная на зарядовом приближении модели и действительной в предпороговом режиме и сильной инверсии. Получено выражение, корректно описывающее поведение поверхностного потенциала во всех режимах работы МОП – транзистора, и используемое в предлагаемой модели выходной ВАХ.

Выполнен анализ основных выражений, описывающих подвижность носителей заряда, а также ее составляющих. Получена модель эффективной подвижности, учитывающая рассеивание носителей заряда на ионизированных атомах примеси и кристаллической решетке. Эта модель использует предлагаемое выражение для определения поверхностного потенциала.

Разработаны алгоритмы и программы для расчета: поверхностного потенциала путем численного решения трансцендентного уравнения, корректно описывающего его поведение; подвижности носителей заряда и модели выходных характеристик МОП – транзистора в целом.

Проведен сравнительный анализ моделей программы схемотехнического проектирования PSPICE с полученной моделью и программным обеспечением. В отличие от программы PSPICE, предложенная модель описана сравнительно простыми аналитическими выражениями, полученными на основе зарядовой модели и включающими в себя один из основных параметров входящий в классические уравнения полупроводника. Для расчета входных характеристик не требуется создания значительного числа тестовых структур, проведения множества предварительных измерений для расчета входных параметров. Использование данной модели позволяет получить лучшую сходимость результатов моделирования и экспериментальных данных.

SUMMARY

Budnik Artur Vladimirovich. Physical and topological modeling of MOSFET for low-energy CMOS chips engineering.

Key words: the model of MOSFET, carrier mobility, MOSFET drain current, surface potential, software.

Object and subject of research: The object of research is unit of CMOS IS, the subject is MOSFET VAC output characteristic modeling.

The aim of the present dissertation is to develop the MOSFET physical and topological model, based on charge approximation, which considers surface potential dependence, carrier mobility against its operation modes: under threshold and of strong inversion. The model should provide adequate calculation of output VAC.

The analysis of existing MOSFET models was performed. As the result its scope was defined as well as it was refined that the correctness of modeling results depends on accuracy of surface potential calculating. The model of MOSFET drain current is present. It is based on charge model approximation and valid in under threshold and strong inversion modes. The expression, which describes correctly surface potential behavior in all MOSFET operation modes and is used in the present output VAC model, is obtained.

The analysis of principal expressions for carrier mobility and its elements was performed. The model of actual mobility considering carrier scattering on ionized atoms of impurity and crystal lattice was obtained. The present expression for surface potential determination is used in this model.

The program and algorithms for calculate surface potential (by solving an transcendental equation, which describes correctly surface potential behavior), carrier mobility and MOSFET output characteristics model were developed.

The comparative analysis between the program "PSPICE" and the present model and software was performed. The present model is described by simple analytic expressions, which were obtained on the basis of charge model and have one of principal parameters of classical semiconductor equation. It is not necessary to create test structures, measure and calculate preliminary input parameters to calculate input characteristics. Using of the present model allows obtain better convergence in modeling results and experimental data.

БУДНИК Артур Владимирович

**ФИЗИКО-ТОПОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
МОП-ТРАНЗИСТОРОВ ДЛЯ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КМОП-СХЕМ**

Специальность 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать	02.04.2001.	Формат 60×84 1/16
Бумага офсетная.	Печать ризографическая.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-издл. 1,3.	Тираж 90 экз.	Заказ 222.

Учреждение образования “Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники”
Отпечатано в БГУИР. Лицензия ЛП №156. 220013, Минск, П.Бровки, 6