

Учреждение образования  
“Белорусский государственный университет информатики и  
радиоэлектроники”

УДК 621.382.3

Игнатенко Сергей Александрович

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГООСТРОВКОВЫХ СТРУКТУР,  
ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ НА ЭФФЕКТЕ ОДНОЭЛЕКТРОННОГО  
ТУННЕЛИРОВАНИЯ

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

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Минск 2003

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

Научный руководитель: д.ф.-м.н., проф. И.И. Абрамов  
(БГУИР, кафедра микроэлектроники)

Официальные оппоненты: д.ф.-м.н., проф. Н.Т. Квасов  
(БГУИР, кафедра физики)

д.ф.-м.н., доц. В.М. Борздов  
(БГУ, кафедра физической электроники)

Оппонирующая организация: Государственное научное учреждение  
“Институт физики твердого тела и  
полупроводников” НАН Беларуси

Защита диссертации состоится “29” мая 2003 г. в 14-00 на заседании совета по защите диссертаций Д.02.15.03 при Учреждении образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники” (220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, БГУИР, ауд. 232, 1 уч. корп., тел. 239-89-89).

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

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** В настоящее время приборные структуры, функционирующие на эффекте одноэлектронного туннелирования, являются одними из перспективных и динамично развиваемых приборов нового поколения. По прогнозам ведущих специалистов они уже в ближайшем будущем составят серьезную конкуренцию традиционным МОП-транзисторам. Спектр применения одноэлектронных структур достаточно велик, в частности, возможно использование данных приборных структур в качестве логических элементов, ячеек памяти, стандартов тока и др. Большие перспективы связываются с их функциональной интеграцией с различными традиционными элементами интегральных схем.

Базовой приборной структурой одноэлектроники считается одноэлектронный транзистор с одним островком. Первые теоретические и экспериментальные исследования (1986-1987 гг.) были посвящены именно ему. Позднее были обнаружены недостатки данной структуры, которые в ряде случаев делают невозможным ее использование. Сравнительно лучшими параметрами и характеристиками обладают структуры с количеством островков более одного, например, многоостровковые одноэлектронные цепочки. В таких приборах островки образуют последовательное соединение с туннельными переходами. Вследствие этого для них свойственны следующие преимущества по сравнению с одноостровковыми одноэлектронными транзисторами, а именно: больше величина области кулоновской блокады при одинаковых размерах туннельных переходов и островков, выше рабочая температура, ниже чувствительность к паразитному эффекту котуннелирования, существование временной и пространственной корреляции туннельных событий при приложении напряжения. Кроме того, как показывает анализ известных экспериментальных данных, требования к технологии их изготовления, как правило, менее жесткие, чем для одноостровковых транзисторов.

Моделирование многоостровковых одноэлектронных цепочек играет важную роль при анализе физики их работы, а также на этапе проектирования, поскольку экспериментальные исследования требуют много времени и больших финансовых затрат. Теоретическое исследование позволяет значительно сократить затраты и упростить процесс анализа, проектирования и разработки данных приборов.

Известные модели полуклассического подхода, базирующиеся либо на решении основного уравнения (master equation), либо на методе Монте-Карло, в целом позволяют моделировать достаточно сложные многоостровковые одноэлектронные цепочки. Существенным недостатком, однако, является то, что в них в качестве исходных данных и согласующих с экспериментом параметров используются значения емкостей и сопротивлений туннельных переходов, т.е. эти модели относятся к разновидности электрических. В результате фактически невозможно исследовать влияние параметров

конструкции и материалов на характеристики данных одноэлектронных структур.

В связи с вышеизложенным моделирование физических процессов и характеристик многоостровковых одноэлектронных цепочек, исходя из конструктивно-технологических и электрофизических параметров, является актуальной задачей. Для ее решения необходимо разработать качественно иные модели, которые лишены отмеченного недостатка, а именно: физико-топологические.

**Связь работы с крупными научными программами, темами.** Работа выполнялась в Учреждении образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники” в рамках следующих государственных, межвузовских программ и научно-исследовательских работ:

1. Государственная программа фундаментальных исследований “Электроника”, НИР ГБЦ № 01-3011 “Разработка моделей и исследование физики приборов нанoeлектроники на эффектах одноэлектронного, резонансного туннелирования и квантовой интерференции”, выполняется с 2001 г. по настоящее время, № ГР 20012368;

2. Республиканская межвузовская программа фундаментальных исследований “Низкоразмерные системы”, НИР ГБЦ № 96-3084 “Разработать теорию функционирования низкоразмерных систем на эффекте одноэлектронного туннелирования”, выполнялась в 1996-2000 гг., № ГР 1996460;

3. Грант Министерства образования Республики Беларусь для аспирантов, НИР ГБЦ № 02-3036 “Разработка модели двухостровковых одноэлектронных структур”, выполнялся в 2002 г., № ГР 20022507;

4. Межвузовская программа фундаментальных исследований “Нанoeлектроника XXI”, НИР ГБЦ № 01-3108 “Разработка физических основ функционирования и конструкций одноэлектронных структур, совместимых с технологией кремниевых ИС”, выполняется с 2001 г. по настоящее время, № ГР 20011520;

5. Задание Министерства образования Республики Беларусь, НИР ГБЦ № 01-3067 “Разработка теоретических основ, моделей и комплекса программ, предназначенных для анализа многотуннельных одноэлектронных структур”, выполняется с 2001 г. по настоящее время, № ГР 20011638.

**Цель и задачи исследования.** Цель диссертационной работы состояла в разработке физико-топологических моделей, алгоритмов и комплекса программ моделирования физических процессов в многоостровковых одноэлектронных цепочках на различных материалах, а также проведение теоретических исследований их электрических характеристик в зависимости от параметров конструкции и материалов.

Для достижения указанной цели решались следующие задачи:

1. Разработка физико-топологической модели расчета электрических характеристик двухостровковых одноэлектронных цепочек в зависимости от конструктивно-технологических и электрофизических параметров с использованием основного уравнения.

2. Разработка физико-топологической модели расчета электрических характеристик многоостровковых одноэлектронных цепочек в зависимости от конструктивно-технологических и электрофизических параметров на основе метода Монте-Карло.

3. Разработка алгоритмов расчета параметров и характеристик двух- и пятиостровковых одноэлектронных цепочек на основе известных и разработанных моделей, а также реализующего их комплекса программ.

4. Теоретическое исследование влияния на электрические характеристики двух- и пятиостровковых одноэлектронных цепочек конструктивно-технологических и электрофизических параметров с использованием разработанного комплекса программ.

5. Теоретическое исследование температурной стабильности одно-, двух- и пятиостровковых одноэлектронных цепочек на различных материальных системах.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования являются металлические многоостровковые одноэлектронные цепочки. Предмет исследования – их электрические характеристики и температурная стабильность в зависимости от конструктивно-технологических и электрофизических параметров.

**Методология и методы проведенного исследования.** При разработке физико-топологических моделей, алгоритмов и комплекса программ расчета параметров и характеристик многоостровковых одноэлектронных цепочек, а также исследовании физических процессов в них использовались подходы и методы нанoeлектроники (методы и приближения анализа низкоразмерных структур), численные методы решения нелинейных алгебраических уравнений и систем линейных алгебраических уравнений (метод матричной прогонки, метод Зейделя), методы численного интегрирования и дифференцирования, метод Монте-Карло, усовершенствованный применительно к специфике решаемых задач.

**Научная новизна и значимость полученных результатов.**

1. Впервые разработана физико-топологическая модель расчета электрических характеристик металлических двухостровковых одноэлектронных цепочек в зависимости от конструктивно-технологических и электрофизических параметров структуры на базе уравнения Пуассона и основного уравнения.

2. Впервые разработана физико-топологическая модель расчета электрических характеристик металлических многоостровковых одноэлектронных цепочек в зависимости от конструктивно-технологических и электрофизических параметров структуры на основе уравнения Пуассона и метода Монте-Карло.

3. Разработан комплекс программ моделирования металлических многоостровковых одноэлектронных цепочек на основе предложенных моделей и алгоритмов, характеризующийся оригинальной структурой и высокой эффективностью.

4. Установлены закономерности влияния геометрических размеров, диэлектрической проницаемости изолятора, высоты потенциального барьера, фоновых зарядов на островках и рабочей температуры на стоковые и сток-затворные ВАХ. Показано, что для стоковых ВАХ многоостровковых цепочек наиболее существенно влияющими факторами являются изменение максимальной ширины туннельного перехода (в случае несимметричной цепочки) и высоты потенциального барьера.

5. Установлено, что основным параметром, определяющим температурную стабильность эффекта кулоновской блокады в многоостровковых одноэлектронных цепочках, является высота потенциального барьера туннельных переходов.

### **Практическая значимость полученных результатов.**

1. Разработанные физико-топологические модели, алгоритмы и комплекс программ моделирования многоостровковых одноэлектронных цепочек могут использоваться для научно-исследовательских работ, инженерных расчетов параметров и характеристик приборов на этапе их проектирования. Это позволит повысить качество исследования, проектирования, а также предсказывать характеристики разрабатываемых структур.

2. Физико-топологические модели, алгоритмы и комплекс программ были внедрены в учебный процесс в следующих курсах: «Моделирование технологических процессов и элементов интегральных схем», «Квантовая механика и статистическая физика».

### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

1. Разработанная физико-топологическая модель металлической двухостровковой одноэлектронной цепочки, базирующаяся на решении уравнения Пуассона и основного уравнения, может использоваться для адекватного описания их электрических характеристик в зависимости от параметров конструкции и материалов.

2. Разработанная физико-топологическая модель металлической многоостровковой одноэлектронной цепочки, основанная на решении уравнения Пуассона и использовании метода Монте-Карло, может применяться

для адекватного описания их электрических характеристик в зависимости от параметров конструкции и материалов.

3. Незначительная девиация максимальной ширины туннельного перехода (при неодинаковых туннельных переходах) многоостровковой одноэлектронной цепочки приводит к ощутимому уменьшению проходящего через нее тока. С уменьшением ширины туннельного перехода и увеличением количества таких переходов проходящий ток увеличивается. С увеличением количества переходов с малой шириной область кулоновской блокады уменьшается, то же время расположение перехода с наименьшей шириной не влияет на область блокады.

4. Стоковые и сток-затворные ВАХ одноэлектронных цепочек сильно зависят от высоты потенциального барьера. Увеличение диэлектрической проницаемости изолятора приводит к пропорциональному уменьшению области кулоновской блокады и ширины ступенек кулоновской лестницы. Вариация фоновых зарядов на островах многоостровковых одноэлектронных цепочек существенным образом трансформирует стоковые ВАХ, в частности изменяется область кулоновской блокады (при нулевых значениях фоновых зарядов она максимальна), ширина и высота ступенек кулоновской лестницы (для несимметричной цепочки).

5. Температурная стабильность металлических многоостровковых одноэлектронных цепочек на базе материальных систем Co-Al-O, Au/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> определяется в основном высотой потенциального барьера, причем при одинаковых конструктивно-технологических параметрах наибольшей рабочей температурой характеризуются цепочки на Co-Al-O, а наименьшей – на Cr/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

**Личный вклад соискателя.** Все результаты, приведенные в диссертации, получены либо лично соискателем, либо с его непосредственным участием. Вклад научного руководителя И.И. Абрамова связан с постановкой задач и целей исследований, совместной разработкой физико-топологических моделей одноэлектронных цепочек, а также обсуждением промежуточных и конечных результатов. Вклад Е.Г. Новик связан с обсуждением промежуточных и конечных результатов. Другие соавторы работ принимали участие в разработке системы NANODEV и получении результатов, которые не касаются темы диссертации. Диссертационная работа выполнена в рамках очной аспирантуры БГУИР.

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на 11-ой и 12-ой Международных Крымских конференциях «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2001 г., 2002 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Микро- и нанoeлектроника 2001» (Звенигород, 2001 г.), VII Международной научно-технической конференции «Современные средства

связи» (Нарочь, 2002 г.), Международных научно-технических конференциях «Новые технологии изготовления многокристалльных модулей» (Нарочь, 2000 г., 2002 г.).

**Опубликованность результатов.** По теме диссертации опубликованы 5 статей в научно-технических журналах, 6 статей в материалах международных конференций и 1 тезисы докладов в сборниках тезисов научных конференций. Общее количество страниц опубликованных материалов по теме диссертации – 43.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников. Общий объем диссертации составляет 153 страниц, в том числе 83 рисунка на 59 страницах, 5 таблиц на 4 страницах и 3 приложения на 4 страницах. Список литературы включает 90 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 обзор экспериментальных исследований многоостровковых одноэлектронных цепочек, отмечены области их применения, а также описаны их преимущества и недостатки.

Проанализированы основные преимущества многоостровковых одноэлектронных цепочек по сравнению с одиночным туннельным переходом и одноостровковым одноэлектронным транзистором. В результате выделены следующие преимущества: существование как временной, так и пространственной корреляции туннельных событий при фиксации внешнего напряжения; низкая чувствительность к паразитному эффекту котуннелирования; более высокая рабочая температура; большее значение области кулоновской блокады. Поэтому при одинаковых технологических подходах к изготовлению многоостровковые цепочки всегда обладают лучшими параметрами и характеристиками. В частности, чем больше количество островков, тем отчетливее проявляются отмеченные преимущества. Ограничивающими факторами является низкий проходящий ток, а также разброс геометрических размеров островков и туннельных переходов при изготовлении структуры, что определяется уровнем развития нанотехнологии. Наиболее важные свойства многоостровковых одноэлектронных цепочек проявляются уже при количестве островков от 2 до 5.

На основе проведенного анализа показано, что уже в ближайшем будущем структуры, функционирующие на эффекте одноэлектронного туннелирования, будут играть одну из ключевых ролей в интегральных схемах следующих поколений.

В настоящее время многоостровковые одноэлектронные цепочки изготавливаются на следующих материальных системах:  $\text{PbA}_2(\text{Ca}_{0.8}\text{Y}_{0.2})\text{Cu}_2\text{O}_7$ ;  $\text{Au}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{Co}-\text{Al}-\text{O}$ ; золотые коллоидные частицы/органический диэлектрик;  $\text{AuPd}/\text{SiO}_2$ ,  $\text{AuPd}/\text{Si}_3\text{N}_4$ ;  $\text{Ti}/\text{TiO}_x/\text{Ti}$ ;  $\text{Al}/\text{Al}_x\text{O}_y/\text{Al}$ ;  $\text{Ti}/\text{p}-\text{Si}$ ; углеродистые наночастицы/диэлектрическая жидкость (толуол); на основе различных полупроводниковых материалов. В результате анализа имеющихся экспериментальных данных установлено, что подавляющее большинство многоостровковых цепочек изготавливаются либо с двумя, либо с пятью островами.

Показано, что многоостровковые одноэлектронные цепочки можно использовать в качестве следующих устройств: логических элементов, модулятора, насоса, ячеек памяти. Приведены примеры схем одноэлектронных логических элементов НЕ и ИЛИ/НЕ. Одноэлектронные модулятор и насос могут использоваться в качестве метрологических стандартов тока. Ячейка памяти может быть построена либо только на одноэлектронных структурах, либо путем их функциональной интеграции с МОП транзистором. Работа таких ячеек основана на хранении небольшого количества электронов (25...40) на острове, а рабочая температура может достигать комнатной.

В результате проведенного анализа сделан вывод о перспективности использования именно металлических многоостровковых одноэлектронных цепочек при конструировании качественно новой элементной базы ИС, отобраны материальные системы и обоснован выбор цепочек с двумя и пятью островами для дальнейших исследований.

**Вторая глава** посвящена анализу подходов и известных моделей теоретического исследования характеристик многоостровковых одноэлектронных цепочек, а также разработанным физико-топологическим моделям.

Основным подходом при построении известных моделей одноэлектронных структур является полуклассический. Показано, что наиболее распространенные модели полуклассического подхода базируются либо на основном уравнении, либо на методе Монте-Карло и являются электрическими моделями. Они позволяют рассчитывать характеристики одноэлектронных приборов на основе их электрических эквивалентных схем. В качестве исходных данных используются сопротивления и емкости туннельных переходов. Проанализировано несколько известных моделей, выявлены их преимущества и недостатки. Самым серьезным недостатком является то, что согласующими с экспериментом параметрами являются значения емкостей и сопротивлений туннельных переходов. В результате достаточно сложно

исследовать влияние параметров конструкции и материалов на характеристики одноэлектронных структур.

Известной моделью, лишенной отмеченного недостатка, является физико-топологическая модель металлического одноэлектронного транзистора с одним островком.

Проведен сравнительный анализ метода основного уравнения и метода Монте-Карло. Серьезный недостаток метода основного уравнения заключается в том, что с увеличением количества туннельных переходов количество состояний, которое необходимо рассматривать, резко увеличивается. Это приводит к значительным вычислительным затратам. Основное преимущество метода Монте-Карло состоит в том, что с его помощью более естественным образом отражаются микроскопические процессы, протекающие в одноэлектронных структурах и схемах. Недостаток метода заключается в сложности учета редких туннельных событий, например, котуннелирования.

Проведенный анализ показывает, что в настоящее время не существует моделей металлических одноэлектронных многоостровковых цепочек, позволяющих рассчитывать их электрические характеристики в зависимости от электрофизических и конструктивно-технологических параметров.

Предложена физико-топологическая модель металлических двухостровковых одноэлектронных цепочек с использованием основного уравнения. В отличие от известных моделей в ней в качестве исходных данных используются геометрические и электрофизические параметры, фоновые заряды и температура, а также управляющие воздействия: напряжения истока, стока и затвора. Разработанная модель основана на численном решении двумерного уравнения Пуассона (влияние магнитного поля не учитывается):

$$\nabla \varepsilon \nabla \varphi(x, y) = -q_M, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость,  $\varphi$  – электростатический потенциал,  $q_M$  – объемная плотность зарядов. Заряды в диэлектрике не учитываются. Плотность объемного заряда  $q_M$  определяется плотностью носителей заряда  $q_i^l$ , участвующих непосредственно в туннелировании, и плотностью фонового заряда  $q_0^l$ , где  $l$  – номер островка.

Описан метод реализации предложенной модели. В частности приведена конечно-разностная аппроксимация уравнения Пуассона на основе интегро-интерполяционного подхода Тихонова-Самарского в сочетании с рядом физических предположений. Для аппроксимации уравнения Пуассона правая часть представляется в виде:

$$f(x_i, y_j) = \begin{cases} 0 & \text{в области изолятора,} \\ \frac{k_f(N_i + N_0)}{k L_{char}} & \text{в области островка с} \\ & \text{индексом } l, \end{cases} \quad (2)$$

где  $k_f$  – коэффициент, учитывающий влияние фонового заряда и его зависимость от режима работы прибора;  $N_l^+$  и  $N_0^+$  – число избыточных носителей заряда участвующих в тунелировании и фонового заряда внутри контура  $C_{ij}$ , с площадью  $S_{ij}$  для  $l$ -го островка. В результате решения уравнения Пуассона получается функция распределения потенциала в структуре в зависимости от геометрических и электрофизических параметров, фоновых зарядов, температуры, управляющие воздействия, а также от количества избыточных зарядов на островках.

Для расчета ВАХ двухостровковой одноэлектронной цепочки используется основное уравнение для одноэлектронных структур, но записанное не для скоростей тунелирования, а непосредственно для токов через туннельные переходы:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma(n_1, n_2)}{\partial t} = & I_{n_1-1, n_2 \rightarrow n_1, n_2} \sigma(n_1-1, n_2) + I_{n_1, n_2-1 \rightarrow n_1, n_2} \sigma(n_1, n_2-1) + \\ & + I_{n_1+1, n_2 \rightarrow n_1, n_2} \sigma(n_1+1, n_2) + I_{n_1, n_2+1 \rightarrow n_1, n_2} \sigma(n_1, n_2+1) - \\ & - (I_{n_1, n_2 \rightarrow n_1+1, n_2} + I_{n_1, n_2 \rightarrow n_1, n_2+1} + I_{n_1, n_2 \rightarrow n_1-1, n_2} + I_{n_1, n_2 \rightarrow n_1, n_2-1}) \sigma(n_1, n_2), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\sigma(n_1, n_2)$  – вероятность нахождения избыточных носителей на островках;  $t$  – время;  $n_1, n_2$  – количество избыточных носителей на первом и втором островках соответственно;  $I_{n_1-1, n_2 \rightarrow n_1, n_2}$  – сумма парциальных токов через туннельные переходы при изменении числа носителей на первом островке  $n_1-1 \rightarrow n_1$ . Ток определяется согласно выражению:

$$I = \frac{V_{eff}}{R} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{eV_{eff}}{k_B T}\right) \right]^{-1}, \quad (4)$$

где  $V_{eff}$  – полусумма напряжений до и после туннельного акта;  $R$  – сопротивление туннельного перехода (находится с использованием ВКБ-приближения);  $T$  – температура.

Уравнение (3) записывается в матричной форме и решается для стационарного случая. Для нахождения нетривиального решения используется итерационный метод Зейделя.

Общий ток через структуру вычисляется из соотношения:

$$I = \sum_{n_1} \sum_{n_2} \sigma(n_1, n_2) (I^+(n_1, n_2) - I^-(n_1, n_2)), \quad (5)$$

где  $I^+(n_1, n_2)$ ,  $I^-(n_1, n_2)$  – токи через туннельный переход в прямом и обратном направлениях соответственно.

Предложена физико-топологическая модель одноэлектронных цепочек с произвольным количеством островков с использованием метода Моте-Карло. Так же как и в описанной выше модели за основу берется уравнение Пуассона (1). Конечно-разностная аппроксимация уравнения Пуассона подобна описанной выше.

Приведем алгоритм реализации модели для случая пятиостровковой цепочки при расчете одной точки ВАХ. Так, первоначально решается уравнение Пуассона для начальной комбинации избыточных носителей на островках  $\{n_i\} \equiv (n_1=0, n_2=0, n_3=0, n_4=0, n_5=0)$  и вычисляются парциальные токи через все туннельные переходы по формуле (4). Найденные значения запоминаются с целью экономии времени ЭВМ, когда в следующий раз возникнет комбинация  $\{n_0\}$ . Далее производится выбор количества туннельных событий  $K$ . Затем в соответствии с методом Монте-Карло генерируется первое случайное число  $r_i \in [0,1]$  и определяется время  $t_i$  до следующего туннельного события:

$$t_i = -\frac{e \ln r_i}{\sum I}, \quad (6)$$

где  $\sum I$  – сумма парциальных токов для всех возможных независимых событий, соответствующий туннелированию одного носителя в двух направлениях через каждый переход.

Затем генерируется следующее случайное число  $r_i$ . Отрезок  $[0,1]$  разбивается на участки, пропорциональные величинам парциальных токов, которые соответствуют туннелированию одного носителя в двух направлениях через каждый переход. Участок, на который выпало данное случайное число  $r_i$ , – выигрышный. В результате определяется новая комбинация  $\{n_i\}$ . Далее проверяется, встречалась ли данная комбинация ранее? Если да, то парциальные токи извлекаются из памяти ЭВМ, если нет, то решается уравнение Пуассона и вычисляются парциальные токи через все туннельные переходы. Последние заносятся в память ЭВМ. После этого проверяется все ли возможные туннельные события перебраны (число  $K$ )?

Общий ток, проходящий через одиночный туннельный переход  $j$ , определяется по формуле:

$$I_j = \frac{n_j e}{t_\Sigma}, \quad (7)$$

где  $n_j$  – количество носителей заряда, прошедших через данный переход за весь период;  $t_\Sigma$  – суммарное время актов туннелирования.

В заключение делаются выводы о целесообразности использования разработанных физико-топологических моделей для расчета стоковых и стокзатворных ВАХ многоостровковых одноэлектронных цепочек в зависимости от конструктивно-технологических и электрофизических параметров, а также фоновых зарядов на островках и температуры окружающей среды.

В третьей главе приводится описание разработанного комплекса программ моделирования многоостровковых одноэлектронных цепочек MTJ-SET-NANODEV, предназначенного для использования на ПЭВМ. В основу

комплекса программ положены разработанные модели, алгоритмы, а также ряд известных моделей.

Комплекс программ состоит из двух основных блоков – программ расчета электрических характеристик одноэлектронных цепочек для установленных наиболее важных случаев, а именно: цепочек с двумя и пятью островками.

Блок расчета характеристик двухостровковых цепочек включают в себя:

1) программы расчета стоковых ВАХ прибора в зависимости от электрических параметров туннельных переходов. В качестве параметров используются сопротивления и емкости переходов; 2) программы расчета стоковых ВАХ прибора в зависимости от конструктивно-технологических и электрофизических параметров структуры, основанные на разработанной модели. Исходными данными, в отличие от указанных выше программ, являются геометрические размеры структуры и параметры материалов; 3) программы расчета сток-затворных ВАХ прибора в зависимости от конструктивно-технологических и электрофизических параметров структуры, основанные на разработанной модели. В данном случае рассчитывается зависимость тока стока от напряжения на электроде затвора. Исходными данными являются также параметры структуры и материалов.

Все программы расчета характеристик двухостровковых цепочек базируются либо на решении основного уравнения, либо на методе Монте-Карло.

Блок расчета характеристик пятиостровковых цепочек включают в себя:

1) программы расчета стоковых ВАХ прибора в зависимости от конструктивно-технологических и электрофизических параметров структуры, основанные на разработанной модели; 2) программы расчета сток-затворных ВАХ прибора в зависимости от конструктивно-технологических и электрофизических параметров структуры, основанные на разработанной модели. Исходными данными для обеих программ являются параметры структуры и материалов. Эти программы основаны на методе Монте-Карло.

Проведено тестирование комплекса программ MTJ-SET-NANODEV. В частности, показано, что программы расчета стоковых ВАХ двухостровковых цепочек в зависимости от электрофизических параметров туннельных переходов (как на базе основного уравнения, так и на базе метода Монте-Карло) позволяют получить результаты, которые хорошо согласуются с известными теоретическими данными, например полученными с использованием известной программы MOSES. Таким образом, проведенное тестирование разработанного комплекса программ позволяет подтвердить правильность реализации положенных в его основу моделей и алгоритмов. Приведены характерные времена расчета для различных программ комплекса MTJ-SET-NANODEV, доказывающие возможность его использования на ПЭВМ.

**Четвертая глава** посвящена теоретическому исследованию электрических характеристик двух- и пятиостровковых одноэлектронных

цепочек в зависимости от конструктивно-технологических и электрофизических параметров, а также анализу температурной стабильности одно-, двух- и пятиостровковых цепочек.

Показано, что при последовательном изменении затворного напряжения зависимость тока через одноэлектронную структуру будет носить осцилляционный характер. Проанализированы отличия сток-затворных ВАХ одно- и двухостровковых одноэлектронных цепочек. Установлено, что наиболее важным является раздвигание пиков осцилляций. Объяснить это можно доминированием туннельных актов через один из островков структуры. Для проведения исследований была модифицирована известная модель одноэлектронного транзистора с одним островком. Основными модификациями являются следующие: модернизирован подход к учету фонового заряда на островке, для решения основного уравнения использовался итерационный метод, а также введена температурная зависимость.

Проведена оценка адекватности модифицированной модели путем сравнение результатов моделирования, полученных с ее использованием, с экспериментальными данными. Для сравнения были выбраны данные, полученные для одноэлектронного транзистора на основе туннельных переходов  $Al/AlO_x/Al$ . Получено хорошее согласование с экспериментальными данными.

Установлены, проанализированы и объяснены физические закономерности влияния геометрических размеров, относительной диэлектрической проницаемости изолятора, высоты потенциального барьера, фонового заряда и температуры на сток-затворные характеристики одноостровкового одноэлектронного транзистора. В частности, незначительное изменение ширины туннельного перехода стока приводит к значительным изменениям амплитуды осцилляций. Кроме того, характеристики становятся несимметричными (с наклоном). Объясняется это существенным изменением вероятности туннелирования электронов через потенциальный барьер в случае девиации его ширины. При несимметричных переходах электроны чаще туннелируют через более узкий переход, поэтому изменяется крутизна и на ВАХ появляется наклон. Таким образом, с помощью небольшой девиации ширины одного из переходов можно очень сильно изменять усилительные свойства транзистора. При изменении расстояния затвор-островок амплитуда и период осцилляций изменяются незначительно. Данные трансформации, так же как и вариации ширины туннельных переходов, приводят к изменению усилительных свойств одноэлектронного транзистора. Причем уменьшение расстояния затвор-островок приводит к увеличению крутизны ВАХ. Данную закономерность можно объяснить следующим образом: чем ближе затвор к островку, тем сильнее он влияет на заряд, находящийся на островке, и, следовательно, чаще будет возникать условие наступления кулоновской блокады. При уменьшении диэлектрической проницаемости изолятора амплитуда осцилляций и их период уменьшается незначительно. В то же время

увеличение высоты потенциального барьера приводит к существенному уменьшению как амплитуды осцилляций, так и среднего проходящего через структуру тока. Изменение фонового заряда приводит к параллельному сдвигу характеристики. С увеличением температуры средний ток, проходящий через структуру, увеличивается, а амплитуда осцилляций при этом сильно уменьшается.

Приведена рассчитанная сток-затворная ВАХ для двухостровковой одноэлектронной цепочки на основе результатов, полученных при согласовании стоковой ВАХ с экспериментальными данными. К сожалению, в литературе фактически отсутствуют экспериментальные результаты для сток-затворных ВАХ многоостровковых цепочек.

Показаны совмещенные трехмерные виды стоковых и сток-затворных ВАХ одно- и двухостровковых одноэлектронных цепочек, полученные в результате теоретических расчетов. Изображения является очень наглядным и удобным для физических интерпретаций при выявлении отличий характеристик.

Проведена оценка адекватности разработанных моделей многоостровковых одноэлектронных цепочек путем сравнение результатов моделирования, полученных с их использованием, с экспериментальными данными. Для сравнения были выбраны стоковые ВАХ двух- и пятиостровковых цепочек на различных исследуемых материалах, а именно:  $\text{TiBa}_2(\text{Ca}_{0.8}\text{Y}_{0.2})\text{Cu}_2\text{O}_7$ ,  $\text{Au/Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Co-Al-O}$ ,  $\text{Ti/p-Si}$ ,  $\text{AuPd/Al}_2\text{O}_3$ . Во всех случаях получено хорошее согласование с экспериментальными данными, что вселяет уверенность в том, что приводимые ниже результаты соответствуют действительности.

Показано, что с помощью разработанных физико-топологических моделей можно восстанавливать по ВАХ некоторые исходные параметры, которые трудно определить из экспериментальных данных, например, геометрические размеры цепочки.

Установлены, проанализированы и объяснены физические закономерности влияния геометрических размеров, относительной диэлектрической проницаемости изолятора, высоты потенциального барьера, фоновых зарядов и температуры на стоковые характеристики двух- и пятиостровковых цепочек. В частности, при неодинаковых туннельных переходах незначительная девиация максимальной ширины туннельного перехода приводит к ощутимому изменению проходящего тока. Это можно объяснить тем, что ток в системе будет в основном определяться прозрачностью (вероятностью туннелирования электрона через потенциальный барьер) перехода с наибольшей шириной. Туннелирование через другие переходы будет проходить значительно эффективнее, а следовательно, небольшие девиации их ширин практически не будут сказываться на величине общего тока. Исследования изменений ширин туннельных переходов также выявили следующие характерные особенности: 1) при неодинаковых размерах ширин на ВАХ наряду с кулоновской блокадой

появляется кулоновская лестница, что объясняется появлением устойчивых комбинаций избыточных носителей на островках, причем каждой ступеньке соответствует определенная устойчивая комбинация; 2) с уменьшением ширины туннельного перехода и увеличением количества таких переходов проходящий ток увеличивается, что связано с увеличением вероятности туннелирования электронов через соответствующий потенциальный барьер (барьеры); 3) с увеличением количества переходов с малой шириной область кулоновской блокады уменьшается, в то же время расположение перехода с наименьшей шириной не влияет на область блокады, что объясняется соответствующим перераспределением напряжений, падающих на туннельных переходах системы.

Незначительное увеличение высоты потенциального барьера приводит к существенному уменьшению тока, проходящего через структуру. Это можно объяснить уменьшением вероятности туннелирования электронов через барьер. В то же время увеличение относительной диэлектрической проницаемости приводит к малому изменению тока, однако, при этом уменьшается область кулоновской блокады и ширина ступенек кулоновской лестницы. Объяснить это можно перераспределением величин падающих на туннельных переходах напряжений. При вариации фоновых зарядов на островках стоковые ВАХ могут существенно образом трансформироваться, в частности изменяется область кулоновской блокады (при нулевых фоновых зарядах она максимальна), ширина и высота ступенек кулоновской лестницы (для несимметричной цепочки). Данное поведение объясняется изменением электростатической энергии системы, а следовательно, модификацией условий наступления кулоновской блокады. Увеличение температуры также приводит к трансформации вида ВАХ. В данном случае, однако, происходит "сглаживание" кулоновской лестницы и исчезновение кулоновской блокады вследствие термической активации актов туннелирования.

Показано, что основным параметром, определяющим температурную стабильность эффекта кулоновской блокады в многоостровковых одноэлектронных цепочках, является высота потенциального барьера туннельных переходов. Определены предельные рабочие температуры для трех систем материалов, а именно:  $\text{Co-Al-O}$ ;  $\text{Au/Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{Cr/Cr}_2\text{O}_3$ . Для этого проведен ряд расчетов для одно-, двух- и пятиостровковых цепочек при одинаковых геометрических размерах структур. Установлено, что наиболее предпочтительны из исследованных систем по рабочей температуре многоостровковые одноэлектронные цепочки на  $\text{Co-Al-O}$ , а наименее – на  $\text{Cr/Cr}_2\text{O}_3$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Разработана физико-топологическая модель металлической двухостровковой одноэлектронной цепочки, которая базируется на решении уравнения Пуассона и основного уравнения и позволяет рассчитать электрические характеристики прибора в зависимости от конструктивно-технологических и электрофизических параметров. В основе модели лежит предложенная конечно-разностная аппроксимация уравнения Пуассона, полученная с применением интегро-интерполяционного подхода Тихонова-Самарского в сочетании с рядом физических предположений, метод матричной прогонки и итерационный метод Зейделя, использующийся при решении основного уравнения. Предложен способ составления матричной формы стационарного основного уравнения для двухостровковой цепочки. На ряде примеров расчета ВАХ реальных приборов показано, что разработанная модель позволяет получить лучшее согласование с экспериментами и обеспечивает более полную связь выходных параметров с параметрами конструкции и характеристиками материалов приборов по сравнению с известными моделями [1,2,9].

2. Разработана физико-топологическая модель металлической многоостровковой одноэлектронной цепочки, которая основана на решении уравнения Пуассона и методе Монте-Карло и позволяет рассчитать электрические характеристики прибора в зависимости от конструктивно-технологических и электрофизических параметров. В основе модели лежит предложенная конечно-разностная аппроксимация уравнения Пуассона, полученная с применением интегро-интерполяционного подхода Тихонова-Самарского в сочетании с рядом физических предположений, метод матричной прогонки и метод Монте-Карло. Предложен способ экономии времени при расчете по данной модели, позволяющий реализовать ее на ПЭВМ. На ряде примеров моделирования ВАХ реальных пятиостровковых цепочек показано, что с помощью разработанной модели получается хорошее согласование с экспериментом и обеспечивается более полная связь выходных параметров с параметрами конструкции и характеристиками материалов приборов по сравнению с электрическими моделями [3,10].

3. Разработан комплекс программ моделирования многоостровковых одноэлектронных структур MTJ-SET-NANODEV, в основу которого положены предложенные модели и алгоритмы, а также ряд известных моделей для приборов этого вида. Комплекс программ характеризуется оригинальной структурой, включающей блоки расчета характеристик двух- и пятиостровковых цепочек, и предназначен для использования на ПЭВМ. На примерах расчета ряда параметров, стоковых и сток-затворных ВАХ одноэлектронных цепочек продемонстрированы широкие возможности и

высокая эффективность комплекса и подтверждена правильность реализации положенных в его основу моделей [4-8,11,12].

4. Теоретическое исследование влияния конструктивно-технологических параметров на стоковые ВАХ двух- и пятиостровковых одноэлектронных цепочек позволило установить: а) для несимметричной цепочки незначительная девиация максимальной ширины туннельного перехода приводит к ощутимому изменению проходящего тока, в то же время изменение ширины других переходов практически не влияет на величину проходящего тока. Это связано с тем, что ток в системе будет в основном определяться вероятностью туннелирования электрона через потенциальный барьер туннельного перехода с наибольшей шириной; б) с уменьшением ширины туннельного перехода и увеличением количества таких переходов проходящий ток увеличивается, что связано с увеличением вероятности туннелирования электронов через соответствующий потенциальный барьер (барьеры); в) с увеличением количества переходов с малой шириной область кулоновской блокады уменьшается, то же время расположение перехода с наименьшей шириной не влияет на область блокады, что объясняется соответствующим перераспределением напряжений, падающих на туннельных переходах системы [2,3].

5. Теоретическое исследование влияния электрофизических параметров на стоковые ВАХ двух- и пятиостровковых одноэлектронных цепочек позволило установить: а) при увеличении высоты потенциального барьера ток, проходящий через структуру, существенно уменьшается, что объясняется уменьшением вероятности туннелирования электронов через потенциальный барьер; б) увеличение относительной диэлектрической проницаемости приводит к уменьшению области кулоновской блокады и ширины ступенек кулоновской лестницы, что связано с перераспределением величин падающих на туннельных переходах напряжений. В то же время вариация величин фоновых зарядов на островках может существенным образом трансформировать ВАХ, в частности изменяется область кулоновской блокады, ширина и высота ступенек кулоновской лестницы (для несимметричной цепочки), причем при нулевых значениях фоновых зарядов область кулоновской блокады максимальна. Данные явления объясняются изменениями электростатической энергии системы, а следовательно, модификацией условий наступления кулоновской блокады [2,3].

6. Теоретическое исследование влияния температуры на стоковые ВАХ одно-, двух- и пятиостровковых одноэлектронных цепочек при аналогичных конструктивно-технологических параметрах на трех различных материалах ( $\text{Co-Al-O}$ ,  $\text{Au/Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sr/Cr}_2\text{O}_3$ ) позволило установить, что основным параметром, определяющим температурную стабильность эффекта кулоновской блокады, является высота потенциального барьера туннельных переходов. При этом наиболее предпочтительны по рабочей температуре из

исследованных многоостровковые одноэлектронные цепочки на Co-Al-O, а наименее – на Si/Si<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [10].

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

### Статьи в научно-технических журналах

1. Абрамов И.И., Игнатенко С.А., Новик Е.Г. Моделирование двухостровковых одноэлектронных структур // Микросистемная техника.– 2002.– № 5.– С. 30–33.
2. Абрамов И.И., Игнатенко С.А., Новик Е.Г. Влияние параметров конструкции и материалов на вольт-амперные характеристики двухостровковых одноэлектронных цепочек // Физика и техника полупроводников.– 2002.– Т. 36, № 10.– С. 1272–1277.
3. Абрамов И.И., Игнатенко С.А., Новик Е.Г. Теоретическое исследование стоковых характеристик пятиостровковых одноэлектронных цепочек // Известия Белорусской инженерной академии.– 2002.– № 2 (14)/2.– С. 172–174.
4. Абрамов И.И., Игнатенко С.А., Новик Е.Г. Влияние различных факторов на сток-затворные характеристики одноэлектронных транзисторов // Известия Белорусской инженерной академии.– 2002.– № 2 (14)/2.– С. 175–177.
5. Система моделирования нанозлектронных приборов – NANODEV / И.И. Абрамов, И.А. Гончаренко, С.А. Игнатенко А.В. Королев, Е.Г. Новик, А.И. Рогачев // Микроэлектроника.– 2003.– Т. 32, № 2.– С. 124–133.

### Статьи в материалах конференций

6. Абрамов И.И., Новик Е.Г., Игнатенко С.А. Расчет вольт-амперных характеристик одноэлектронных цепочек из трех туннельных переходов // Новые технологии изготовления микрокристалльных модулей: Материалы докл. межд. науч.–техн. конф., Минск, 25–29 сент. 2000 г. / БГУИР.– Минск, 2000.– С. 112–114.
7. Система моделирования нанозлектронных приборов NANODEV / И.И. Абрамов, И.А. Гончаренко, С.А. Игнатенко А.В. Королев, Е.Г. Новик, А.И. Рогачев // 11-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2001): Материалы конф., Севастополь, 10–14 сент. 2001 г. / «Вебер».– Севастополь, 2001.– С. 413–415.
8. Абрамов И.И., Игнатенко С.А., Новик Е.Г. Расчет сток-затворных характеристик одноэлектронных структур // 12-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2002): Материалы конф., Севастополь, 9–13 сент. 2002 г. / «Вебер».– Севастополь, 2002.– С. 466–467.

9. Абрамов И.И., Игнатенко С.А., Новик Е.Г. Двумерная численная модель двухостровковых одноэлектронных структур // 12-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2002): Материалы конф., Севастополь, 9-13 сент. 2002 г. / «Вебер». – Севастополь, 2002. – С. 468-469.
10. Абрамов И.И., Игнатенко С.А., Новик Е.Г. Предельная рабочая температура одноэлектронных цепочек на различных материалах // Новые технологии изготовления микрокристалльных модулей: Материалы докл. межд. науч.–техн. конф., Минск, 30 сент. – 4 окт. 2002 г. / БГУИР. – Минск, 2002. – С. 107-109.
11. Игнатенко С.А. Комплекс программ моделирования многоостровковых одноэлектронных цепочек MTJ-SET-NANODEV // Новые технологии изготовления микрокристалльных модулей: Материалы докл. межд. науч.–техн. конф., Минск, 30 сент. – 4 окт. 2002 г. / БГУИР. – Минск, 2002. – С. 167-169.

#### Тезисы докладов

12. NANODEV: система моделирования наноэлектронных приборов / И.И. Абрамов, И.А. Гончаренко, С.А. Игнатенко А.В. Королёв, Е.Г. Новик, А.И. Рогачев // Микро- и наноэлектроника-2001: Тез. докл. науч.–техн. конф., Звенигород, Россия, 1-5 окт. 2001 г. / Звенигород, 2001. – С. 03-10.



## РЕЗЮМЕ

**Игнатенко Сергей Александрович. МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГООСТРОВКОВЫХ СТРУКТУР, ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ НА ЭФФЕКТЕ ОДНОЭЛЕКТРОННОГО ТУННЕЛИРОВАНИЯ.**

Ключевые слова: одноэлектронное туннелирование, кулоновская блокада, одноэлектронная цепочка, моделирование, островок, туннельный переход, основное уравнение, метод Монте-Карло, вольт-амперная характеристика.

Объектом исследования являются металлические многоостровковые одноэлектронные цепочки. Предмет исследования – их электрические характеристики и температурная стабильность, влияние конструктивно-технологических и электрофизических параметров на электрические характеристики.

Цель диссертационной работы: разработка численных моделей, алгоритмов и комплекса программ моделирования физических процессов в многоостровковых одноэлектронных цепочках на различных материалах, а также проведение теоретических исследований их электрических характеристик в зависимости от параметров конструкции и материалов.

Разработана физико-топологическая модель двухостровковых одноэлектронных цепочек, базирующаяся на решении основного уравнения с помощью итерационного метода Зейделя и решении конечно-разностной аппроксимации уравнения Пуассона и позволяющая рассчитывать их стоковые и сток-затворные ВАХ в зависимости от конструктивно-технологических и электрофизических параметров, а также температуры окружающей среды.

Разработана физико-топологическая модель многоостровковых одноэлектронных цепочек, основанная на методе Монте-Карло и уравнении Пуассона и позволяющая рассчитывать в зависимости от конструктивно-технологических и электрофизических параметров, а также температуры окружающей среды ВАХ цепочек с произвольным количеством островков.

На примерах расчета ВАХ реальных многоостровковых цепочек продемонстрировано, что разработанные модели позволяют получить хорошее согласование с различными экспериментальными данными.

Разработан комплекс программ моделирования одноэлектронных структур MTJ-SET-NANODEV на основе разработанных и известных моделей. С его использованием проведено исследование и установлены закономерности влияния конструктивно-технологических, электрофизических параметров, фоновых зарядов и температуры на основные характеристики металлических многоостровковых одноэлектронных цепочек.

Исследована температурная стабильность многоостровковых одноэлектронных цепочек на различных материалах. Установлено, что основным параметром, определяющим температурную стабильность эффекта кулоновской блокады, является высота потенциального барьера туннельных переходов.

## РЭЗІЮМЭ

**Ігнаценка Сяргей Аляксандравіч. МАДЭЛПРАВАННЕ МНОГАВОСТРАЎКОВЫХ СТРУКТУР, ФУНКЦЫЯНУЮЧЫХ НА ЭФЕКЦЕ АДНАЭЛЕКТРОННАГА ТУНЭЛПРАВАННЯ.**

Ключавыя словы: аднаэлектроннае тунэліраванне, кулонаўская блакада, аднаэлектронная цапочка, мадэліраванне, востраў, тунэльны пераход, асноўнае ураўненне, метадаў Монтэ-Карла, вольт-амперная характарыстыка.

Аб'ектам даследавання з'яўляюцца металічныя многавостраўковыя аднаэлектронныя цапочкі. Прадмет даследавання – іхныя электрычныя характарыстыкі і тэмпературная стабільнасць, уплыў канструктыўна-тэхналагічных і электрафізічных параметраў на электрычныя характарыстыкі.

Мэта дысертацыйнай работы: распрацоўка лікавых мадэляў, алгарытмаў і комплексу праграм мадэліравання фізічных працэсаў у многавостраўковых аднаэлектронных цапочках на розных матэрыялах, а таксама правядзенне тэарэтычных даследаванняў іхніх электрычных характарыстык ад параметраў канструкцыі і матэрыялаў.

Распрацавана фізіка-тапалагічная мадэль двухвостраўковых аднаэлектронных цапочак, базіруючаяся на рашэнні асноўнага ураўнення з дапамогай ітэрацыйнага метаду Зэйделя і рашэнні канечна-разнастнага апраксімацыі ураўнення Пуассона і дазваляе разлічваць іхныя стокавыя і стокзатворныя характарыстыкі ў залежнасці ад канструктыўна-тэхналагічных і электрафізічных параметраў, а таксама тэмпературы навокольнага асяроддзя.

Распрацавана фізіка-тапалагічная мадэль многавостраўковых аднаэлектронных цапочак, аснованная на метадаў Монтэ-Карла і ўраўненні Пуассона і дазваляючая разлічваць у залежнасці ад канструктыўна-тэхналагічных і электрафізічных параметраў, а таксама тэмпературы навокольнага асяроддзя ВАХ цапочак з прайзвольнай колькасцю востраўкоў.

На прыкладах разліку ВАХ рэальных многавостраўковых цапочак прадэманстравана, што распрацаваныя мадэлі дазваляюць атрымаць добрае ўзгадненне з рознымі эксперыментальнымі дадзенымі.

Распрацаваны комплекс праграм мадэліравання аднаэлектронных структур MTJ-SET-NANODEV на аснове распрацаваных і вядомых мадэлей. З яго выкарыстаннем праведзена даследаванне і ўстаноўлены заканамернасці ўплыву канструктыўна-тэхналагічных, электрафізічных параметраў, фонавых зарадаў і тэмпературы на асноўныя характарыстыкі металічных аднаэлектронных цапочак.

Даследавана тэмпературная стабільнасць многавостраўковых аднаэлектронных цапочак на розных матэрыялах. Устаноўлена, што асноўным параметрам, вызначаючым тэмпературную стабільнасць эфекта кулонаўскай блакады, з'яўляецца выдата потэнцыяльнага бар'еру тунэльных пераходаў.

## SUMMARY

**Sergey Ignatenko.** SIMULATION OF THE MULTIPLE-ISLAND STRUCTURES OPERATING BY SINGLE-ELECTRON TUNNELING EFFECT.

Key words: single-electron tunneling, Coulomb blockade, single-electron array, simulation, island, tunnel junction, master equation, Monte-Carlo method, current-voltage characteristics.

Object of study is metallic multiple-island single-electron arrays. Subject of study is their electrical characteristics and thermal stability, influence of design, technological and electro-physical parameters on their characteristics.

The objective of the thesis: development of numerical models, algorithms and simulation tool for modeling physical processes in multiple-island single-electron arrays of various materials, as well as theoretical investigations of their electrical characteristics subject to the structure and material parameters.

Physical model of the two-island single-electron arrays is developed and based on a solution to the master equation by means of Zeidel iteration method and solution to a finite-difference approximation to the Poisson equation. The model enables to calculate drain and drain-to-gate IV-characteristics subject to design, technological and electro-physical parameters along with an ambient temperature.

Physical model of multiple-island single-electron arrays is developed and based on the Monte-Carlo method and Poisson equation. The model brings a possibility to compute IV-curves of the arrays with arbitrary number of islands subject to design, technological and electro-physical parameters.

Examples of IV-characteristics calculations are given for real multiple-island arrays. It is demonstrated that the created models possess good agreement with experimental data.

Simulator of single-electron arrays MTJ-SET-NANODEV is developed on a basis of original and known models. With its use a study was performed, and regularities of influence of the design, technological and electro-physical parameters, background charges and temperature on the main characteristics of metallic multiple-island single-electron arrays were revealed.

Thermal stability of multiple-island arrays of various materials is examined. The main parameter, that determines thermal stability of Coulomb blockade is revealed to be a potential barrier height of the tunnel junctions.

ИГНАТЕНКО СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГООСТРОВКОВЫХ СТРУКТУР,  
ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ НА ЭФФЕКТЕ ОДНОЭЛЕКТРОННОГО  
ТУННЕЛИРОВАНИЯ**

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

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

---

Подписано в печать	14 .04.2003.	Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная.	Печать ризографическая.	Усл.печ.л. 1,63.
Уч.-изд.л. 1,3.	Тираж 90 экз.	Заказ 196.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:

Учреждение образования

“Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники”

Лицензия ЛП № 156 от 30.12.2002.

Лицензия ЛВ № 509 от 03.08.2001.

220013, Минск, П. Бровка, 6