

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАТИКИ И
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.315.592: 537.311.322

БЕРАШЕВИЧ ЮЛИЯ АЛЕКСАНДРОВНА

**ПЕРЕНОС НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА И ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ
В НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ
КРЕМНИЙ/ДИЭЛЕКТРИК**

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

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Минск 2002

Работа выполнена в Учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель д. ф.-м. н., проф. Борисенко В. Е.
Учреждение образования «Белорусский
государственный университет
информатики и радиоэлектроники»,
проректор по учебной работе.

Официальные оппоненты: д. ф.-м. н., проф. Яблонский Г. П.,
«Институт физики им. Б. И. Степанова»,
НАН Беларуси,
лаборатория оптики полупроводников.

к.ф.-м.н., доцент Поклонский Н.А.
Учреждение образования «Белорусский
государственный университет»,
кафедра физики полупроводников.

Оппонирующая организация: «Институт молекулярной и атомной физики»,
НАН Беларуси.

Защита состоится «23» апреля 2002 г. в 16⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д.02.15.03 при Учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» (220027, 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

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В настоящее время кремний является базовым материалом полупроводниковой электроники. На его основе разработаны и выпускаются различные электронные приборы - от дискретных диодов и транзисторов до ультрабольших интегральных схем. Этот материал характеризуется запрещенной зоной (1,1эВ), идеально подходящей для работы в диапазоне комнатных температур, а его оксид (SiO_2) обладает необходимой технологичностью для компоновки до 10^8 приборов в одной интегральной схеме.

Основными задачами современной микроэлектроники остаются увеличение быстродействия и уменьшение размеров электронных приборов. Обозначились несколько направлений улучшения этих параметров, одно из которых - создание оптоэлектронных приборов. Однако в оптоэлектронике кремний до недавнего времени не использовался ввиду того, что это непрямозонный полупроводник и вероятность излучательных переходов в нем очень низка. Тенденция уменьшения размеров электронных приборов привела к обнаружению необычных свойств у кремниевых наноразмерных структур. При уменьшении размеров до нанометрового диапазона изменяется зонная структура кремния вследствие квантово-размерных эффектов и возникает интенсивная электролюминесценция при комнатной температуре в спектральном диапазоне 650 - 850 нм. Данное явление подтолкнуло к бурному развитию кремниевой оптоэлектроники во всем мире начиная с 1990 г. Однако, достигнутая в настоящее время эффективность генерации излучения в кремниевых наноструктурах при инжекционном возбуждении электролюминесценции очень мала по сравнению с нитридом галлия и полупроводниками группы $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$.

Другим направлением улучшения быстродействия и уменьшения размеров приборов полупроводниковой электроники является создание новых приборов нанометровых размеров, использующих квантово-размерные эффекты. В этом направлении интенсивно исследовались в основном полупроводники группы $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$, где были достигнуты хорошие результаты при использовании резонансно-туннельного транспорта носителей заряда через периодические структуры для создания логических элементов. Однако интеграция таких приборов с хорошо развитой кремниевой технологией изготовления интегральных микросхем требует создание гибридных технологий, которые достаточно сложны и дорогостоящи. Кроме того, существенным недостатком таких приборов является низкие рабочие температуры. Интенсивное развитие кремниевой оптоэлектроники и поиск новых технологий получения нанокристаллического кремния привели к созданию наноразмерных периодических структур кремний/диэлектрик, где были обнаружены эффекты электролюминесценции, гистерезиса вольт-амперных характеристик и отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС) при комнатной температуре. Механизм возникновения этих эффектов к началу наших исследований не получил приемлемого теоретического описания.

Связь работы с крупными научными программами, темами. Исследования по теме диссертации выполнялись в период с 1998 по 2001 г. в Лаборатории наноэлектроники и новых материалов Учреждения образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники” в рамках проектов Фонда фундаментальных исследований Республики Беларусь, Республиканской межвузовской программы “Наноэлектроника”, проекта SMILE Европейской программы ESPRIT, грантов аспирантов Министерства образования Республики Беларусь.

Цель диссертационной работы – установление и теоретическое описание закономерностей переноса носителей заряда в периодических наноразмерных структурах кремний/диэлектрик (на примере Si/CaF_2 , Si/SiO_2 систем) и определение возможностей создания новых электронных устройств на их основе.

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

- провести анализ механизмов переноса носителей заряда в периодических наноразмерных структурах и механизмов рекомбинации носителей в нанокристаллах кремния, обобщить известные экспериментальные данные об электрических и оптических характеристиках наноразмерных периодических структур кремний/диэлектрик;
- разработать модель транспорта носителей заряда и рекомбинационных процессов в периодических наноразмерных структурах кремний/диэлектрик и ее математическое описание;
- разработать комплекс программ и провести моделирование электрических характеристик и электрофизических параметров периодических наноразмерных структур Si/CaF_2 и Si/SiO_2 ;
- разработать комплекс программ и провести моделирование процессов излучательной и безызлучательной рекомбинаций носителей заряда в нанокристаллах кремния при инжекционном возбуждении электролюминесценции;
- на основании полученных результатов и выводов предложить приборные структуры на основе наноразмерных периодических структур кремний/диэлектрик.

Объект и предмет исследования: являются периодические наноразмерные структуры кремний/диэлектрик, а именно структуры Si/CaF_2 и Si/SiO_2 , в которых исследуются процессы переноса носителей заряда и возможность построения наноэлектронных приборов на их основе.

Методология и методы проведенного исследования: для разработки моделей использовалась теория упругого туннелирования и квантового переноса в неупорядоченных системах, теория переноса заряда в твердых телах. Для получения экспериментальных данных использовались измерения вольт-амперных характеристик и зарядовых свойств структур. Для проведения расчетов использовались численные методы решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений, а также систем нелинейных алгебраических уравнений.

Научная новизна и значимость полученных результатов состоит в следующем

1. Предложена модель и математическое описание переноса носителей заряда в периодических структурах кремний/диэлектрик, состоящая в учете токопереноса через дискретный уровень ловушек в диэлектрике параллельно супруги туннелированием носителей заряда через потенциальный барьер, образованный диэлектриком.
2. Установлено, что возникновение гистерезиса и области отрицательного дифференциального сопротивления на вольт-амперных характеристиках наноразмерных периодических структур кремний/диэлектрик связано с накоплением заряда в диэлектрике при переносе носителей через уровень ловушек в нем. Эффективность проявления этих закономерностей определяется скоростью зарядки и разрядки ловушечных состояний в диэлектрике.
3. Показано, что при совпадении энергии носителей заряда в потенциальной яме кремния с энергией дискретного уровня ловушек в диэлектрике, перенос носителей заряда через уровень приобретает туннельно-резонансный характер и приводит к появлению пика тока на вольт-амперных характеристиках периодических структур кремний/диэлектрик.
4. Установлены закономерности роста безызлучательной и излучательной рекомбинаций в нанокристаллическом кремнии в зависимости от плотности протекающего через структуру тока: различие в закономерностях возрастания дырочного и электронного токов ведет к нелинейной зависимости интенсивности электролюминесценции от тока, а увеличение вклада безызлучательной рекомбинации при высоком уровне инжекции обуславливает выход этой зависимости в режим насыщения. Определены пути снижения вклада безызлучательного процесса и даны рекомендации по увеличению концентрации нанокластеров кремния для уменьшения вероятности протекания безызлучательной рекомбинации.
5. Предложены логические элементы на основе эффекта туннельно-резонансного транспорта носителей заряда через уровни ловушек в диэлектрике, выполняющих логические операции отрицания, логического умножения, сложения, а также преобразователь сигналов и элемент памяти.

Практическая значимость полученных результатов:

1. Разработаны численные модели и программный комплекс, позволяющие проводить моделирование электрических и оптических характеристик периодических наноразмерных структур кремний/диэлектрик на IBM-совместимых компьютерах с минимальными затратами машинных ресурсов. Моделирование этих характеристик обеспечивает прогнозирование и корректную интерпретацию результатов экспериментальных исследований транспортных свойств структур кремний/диэлектрик и могут использоваться для инженерных расчетов электрофизических параметров, электрических и оптических характеристик периодических наноразмерных структур кремний/диэлектрик на этапе проектирования.
2. На основе теоретических исследований переноса носителей заряда в периодических структурах кремний/диэлектрик предсказаны: оптимальное число периодов

структуры для проявления эффекта гистерезиса или области ОДС на вольт-амперных характеристиках (для эффекта гистерезиса это число составляет 20-50 периодов, для области ОДС – 2-5); абсолютная температура, при которой происходит доминирование процесса упругого туннелирования над переносом носителей через уровень ловушек, зависящего от разности между уровнем ловушек и дном потенциальной ямы кремния (Si/CaF₂: при разности 0,3-0,4 эВ $T=220$ К, при 0,08 эВ – 77 К; Si/SiO₂: при разности 0,3-0,4 эВ $T=250$ К, 0,11 эВ – 150 К); длительности процессов заряда и разряда локализованных состояний, определяющих переходные характеристики приборов на основе структур кремний/диэлектрик (10^{-10} - 10^{-9} с для Si/CaF₂ структур при туннельно-резонансном переносе носителей заряда через уровень ловушек), которые нашли экспериментальное подтверждение.

3. В результате моделирования процессов рекомбинации в нанокристаллах кремния было установлено, что эффективность излучательной рекомбинации возрастает при увеличении периодов наноструктур Si/CaF₂ и Si/SiO₂ до 15-20 периодов и при увеличении концентрации нанокластеров кремния до 10^{19} см⁻³ и выше.
4. Предложены логические элементы на основе эффекта туннельно-резонансного транспорта носителей заряда через уровень ловушек в диэлектрике в периодических наноразмерных структурах Si/CaF₂, выполняющие операции отрицания, сложения и умножения, а также преобразователь сигналов и элемент памяти. Элементы работают в диапазоне комнатных температур и характеризуются частотой переключения порядка 10 ГГц.
5. Установленные закономерности переноса носителей заряда в наноразмерных периодических структурах кремний/диэлектрик внедрены в учебный процесс в курс лекций “Наноэлектроника”.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Присутствие ловушечных состояний в диэлектрике, образующем потенциальные барьеры в периодических структурах кремний/диэлектрик, приводит к преобладанию переноса носителей заряда через эти ловушки над упругим туннелированием и определяет основные транспортные и светоизлучающие свойства этих структур при температуре выше 200 К.
2. Энергетическое положение уровня ловушек в диэлектрике относительно дна потенциальной ямы в кремнии определяет характер переноса носителей заряда через этот уровень, а именно расположение ловушечного уровня вблизи дна ямы ведет к появлению туннельно-резонансного переноса носителей заряда через диэлектрик, в противном случае превалирует накопление заряда в диэлектрике при переносе носителей заряда через ловушечные состояния, приводящее к появлению гистерезиса и области отрицательного дифференциального сопротивления на вольт-амперных характеристиках наноразмерных структур кремний/диэлектрик за счет конкуренции процессов заряда и разряда ловушечных состояний.
3. При протекании электрического тока через нанокристаллы кремния имеет место излучение света, интенсивность которого определяется временем излучательной рекомбинацией одной электрон-дырочной пары в одном нанокристалле, при появлении избыточного (третьего) носителя заряда в этом нанокристалле

рекомбинация электронно-дырочной пары осуществляется по безызлучательному механизму Оже-рекомбинации.

4. Интенсивности электролюминесценции нанокристаллического кремния линейно растет с увеличением темпа инжекции неосновных носителей заряда в нанокристалл и переходит в насыщение при превалировании безызлучательного Оже процесса над излучательной рекомбинацией носителей заряда.
5. Туннельно-резонансный перенос носителей заряда через уровень ловушек в диэлектрике в периодических наноструктурах Si/CaF₂ с характерными временами 10^{-10} - 10^{-9} с приводит к ярко выраженному участку отрицательного дифференциального сопротивления на вольт-амперных характеристиках этих структур в диапазоне температур 77-300 К, что позволяет использовать это явление для схемотехнических решений при создании квантовых интегральных схем.

Личный вклад соискателя. Содержание диссертации отражает личный вклад автора. Он заключается в анализе, обобщении и интерпретации экспериментальных результатов, разработке выносимых на защиту феноменологических моделей транспорта и рекомбинации носителей заряда в периодических структурах кремний/диэлектрик, их математического описания и разработке комплекса программ для расчета электрических характеристик и электролюминесценции исследуемых структур. Диссертационная работа выполнена в рамках очной аспирантуры БГУИР.

Апробация результатов диссертации. Материалы, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на: VII-VIII Республиканской научной конференции студентов и аспирантов «Физика конденсированных сред» (Гродно, Беларусь, 1999, 2000), IV-VI международных научно-технических конференциях «Современные средства связи» (Нарочь, Беларусь, 1999, 2000, 2001 г.), международной научно-технической конференции «Новые технологии изготовления многокристалльных модулей», (Нарочь, Беларусь, 2000 г.), NATO Advanced Research Workshop (Киев, Украина, 2000), международной конференции «NANOMEETING –2001» (Минск, Беларусь, 2001 г.), международной конференции «Оптика, Оптоэлектроника и технологии» (Ульяновск, Россия, 2001 г.), международной конференции «MMN'2000, First Conference on Microelectronics, Microsystems, Nanotechnology» (Афины, Греция, 2001).

Опубликованность результатов. По теме диссертации опубликованы 6 статей в научно-технических журналах, 4 статьи в материалах международных конференций и 3 тезиса докладов в сборниках международных и республиканских конференций. Общее количество опубликованных материалов составляет 42 страницы.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из общей характеристики работы, шести глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Общий объем диссертации составляет 135 страниц машинописного текста. Диссертация содержит 78 рисунков на 35 страницах, 10 таблиц на 4 страницах и одно приложение на одной странице. Список литературы включает 129 наименований на 9 страницах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована ее цель и основные задачи, изложена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор литературы и определено современное состояние исследований транспорта носителей заряда в наноразмерных периодических структурах с квантовыми ямами и механизмов излучательной и безызлучательной рекомбинаций в нанокристаллах кремния.

Отмечено, что к настоящему времени наиболее изученными механизмами переноса носителей заряда в периодических структурах с квантовыми ямами являются механизмы, связанные с туннелированием носителей заряда через потенциальный барьер, образованный материалом с более широкой запрещенной зоной. Причем, существует два основных подхода: перенос носителей заряда через структуры с малым числом периодов определяется через проницаемость потенциальных барьеров, а для многопериодных структур применяется метод нахождения перекрывания волновых функций электронов в соседних потенциальных ямах в рамках приближения эффективной массы и решения уравнения Шредингера для периодического потенциала. Также отмечено, что для слоистых структур, образующихся при чередовании полупроводников $A^III B^V$ характерен механизм последовательного резонансного туннелирования носителей заряда, вследствие образования в этих структурах областей (доменов) сильного поля из-за неустойчивости равномерного распределения электрического заряда по структуре.

Обсуждаются известные механизмы излучения в кремниевых структурах и механизмы рекомбинации носителей заряда в нанокристаллах кремния. Выдвигается гипотеза о том, что механизм видимой люминесценции в нанокристаллах кремния состоит в модификации спектра электронных состояний за счет квантово-размерного эффекта, из-за чего также происходит увеличение ширины запрещенной зоны кремния. Рассматриваются данные, о вероятностях излучательной и безызлучательных рекомбинаций в нанокристаллах кремния. Отмечено, что наиболее быстрым процессом безызлучательной рекомбинации, приводящим к понижению эффективности излучательного процесса, является Оже рекомбинация носителей заряда.

Проанализированы экспериментальные данные об электрических и оптических характеристиках периодических наноразмерных структур кремний/диэлектрик. Отмечен значительный вклад активационного механизма переноса носителей заряда через них и влияние накопления заряда в структуре на их электрические характеристики. Приведены результаты экспериментальных измерений вольт-амперных характеристик периодических слоистых структур кремний/диэлектрик

с малым числом периодов, свидетельствующие о возникновении резонансного характера переноса носителей заряда в исследуемых структурах.

Проведенный анализ оптических характеристик наноструктур кремний/диэлектрик показал, что интенсивность электролюминесценции в них определяется скоростью инжекции носителей заряда в нанокристаллы кремния, т.е. переносом электронов и дырок через структуру.

В выводах сформулированы цель и основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе описаны развитые в диссертации представления о переносе носителей заряда через периодические слоистые структуры кремний/диэлектрик и процессах рекомбинации носителей в нанокристаллах кремния.

Предполагается, что перенос носителей через потенциальные барьеры, образованные слоями диэлектрика, осуществляется по двум основным механизмам: упругим туннелированием носителей заряда через барьеры, которое характерно для всех систем с потенциальными барьерами, и переносом носителей заряда по дискретным ловушечным уровням в диэлектрике. Предложенное описание объясняет экспериментальные вольт-амперные характеристики изучаемых структур с гистерезисом и областью отрицательного дифференциального сопротивления и позволяет анализировать условия возникновения туннельно-резонансного переноса носителей заряда в этих структурах.

Математическое описание процессов переноса носителей заряда в периодических системах кремний/диэлектрик осуществляли кинетическими уравнениями представляющими изменение заряда в i -ой квантовой яме структуры:

$$\frac{dn_i}{dt} = g_{i-1(n)}(n_{i-1}, n_i) + g_{i+1(n)}(n_{i+1}, n_i) - g_{i(n)}(n_i, n_{i-1}) - g_{i(n)}(n_i, n_{i+1}) - R(n_i, p_i) \quad (1)$$

$$\frac{dp_i}{dt} = g_{i+1(p)}(p_{i+1}, p_i) + g_{i-1(p)}(p_{i-1}, p_i) - g_{i(p)}(p_i, p_{i-1}) - g_{i(p)}(p_i, p_{i+1}) - R(n_i, p_i) \quad (2)$$

где i – период структуры ($i=1 \dots N$), $n_i(p_i)$ – концентрация электронов (дырок) в i -ом слое полупроводника; $g_{i(n(p))}$ – темп переноса электронов (дырок) через i -ый слой диэлектрика; $R(n_i, p_i)$ – темп рекомбинации электронов и дырок в i -ом слое полупроводника. Эти уравнения учитывают темп инжекции носителей заряда в потенциальную яму, образованную слоем кремния, их рекомбинацию в яме и темп ухода носителей из ямы.

Ввиду того, что наноразмерные слои кремния состоят из нанокристаллов, рекомбинация носителей заряда в яме кремния имеет специфический характер. Предложена физическая модель этого процесса, учитывающая возникновение кулоновского взаимодействия между инжектированным носителем заряда и наведенным им электрическим полем, что делает практически невозможной

инжекцию носителя того же знака в нанокристалл и увеличивает вероятность инжекции носителя противоположного знака. Математическое описание этого процесса проведено также с использованием кинетических уравнений, включающих вероятность инжекции носителей заряда в нанокристаллы, вероятность процессов излучательной и безызлучательной рекомбинации инжектированных носителей заряда в нанокристаллах. Система уравнений непрерывности, описывающих рекомбинацию носителей в i -ом слое кремния рассматриваемой структуры имеет вид:

$$\begin{aligned} dN_{0,i}^0 / dt &= N_{p,i}^n / \tau_{R0} - G_{n,i} N_{0,i}^0 - G_{p,i} N_{0,i}^0, \\ dN_{0,i}^n / dt &= G_{n,i} N_{0,i}^0 + N_{p,i}^{2n} / \tau_A + N_{p,i}^{2n} / \tau_{R0} - G_{p,i} N_{0,i}^n, \\ dN_{p,i}^0 / dt &= G_{p,i} N_{0,i}^0 + N_{2p,i}^n / \tau_A + N_{2p,i}^n / \tau_{R0} - G_{n,i} N_{p,i}^0, \\ dN_{p,i}^n / dt &= G_{n,i} (N_{p,i}^0 - N_{p,i}^n) + G_{p,i} (N_{0,i}^n - N_{p,i}^n) - N_{p,i}^n / \tau_{R0}, \\ dN_{p,i}^{2n} / dt &= G_{n,i} N_{p,i}^n - N_{p,i}^{2n} / \tau_{R0} - N_{p,i}^{2n} / \tau_A, \\ dN_{2p,i}^n / dt &= G_{n,i} N_{p,i}^n - N_{2p,i}^n / \tau_{R0} - N_{2p,i}^n / \tau_A, \end{aligned} \quad (3)$$

$$N_{SUM} = N_{0,i}^0 + N_{0,i}^n + N_{p,i}^0 + N_{p,i}^n + N_{p,i}^{2n} + N_{2p,i}^n,$$

где $N_{0,i}^0$, $N_{0,i}^n$, $N_{p,i}^0$ - незаряженные нанокристаллы, нанокристаллы содержащие один электрон или одну дырку, соответственно; $N_{p,i}^n$, $N_{p,i}^{2n}$, $N_{2p,i}^n$ - нанокристаллы содержащие электрон и дырку, два электрона и дырку, две дырки и электрон, соответственно; N_{SUM} - общая концентрация нанокристаллов в слое, постоянная для всех периодов; $G_{n,i}$, $G_{p,i}$ - темпы инжекции электронов и дырок в нанокристалл; τ_A - время Оже рекомбинации; τ_{R0} - время излучательной рекомбинации.

Описана методика решения системы кинетических уравнений переноса носителей заряда через структуру и их рекомбинации в нанокристаллах кремния, а также метод конечно-разностной аппроксимации решения одномерного уравнения Пуассона для нахождения изменения потенциала по структуре вследствие возникновения внутренних полей в диэлектрике за счет заряда ловушечных состояний.

Разработан программный комплекс для численного моделирования транспорта носителей заряда в периодических структурах кремний/диэлектрик и их рекомбинации в нанокристаллах кремния на языке Фортран. Информация, получаемая в результате работы программного комплекса, по желанию пользователя может быть представлена в виде таблиц данных или в графическом виде.

В заключении проведен выбор электрофизических параметров, необходимых для расчета электрических и оптических характеристик периодических наноструктур Si/CaF_2 , Si/SiO_2 .

В третьей главе представлено описание переноса носителей заряда через потенциальный барьер, образованный слоями диэлектрика в периодической структуре кремний/диэлектрик, по механизму упругого туннелирования. Вероятность туннелирования определяли в квазиклассическом приближении Вентцеля-Крамерса-Бриллюэна. Форму потенциальных барьеров при нулевом смещении предполагали прямоугольной. В рамках предложенной во второй главе модели, определены темпы переноса носителей заряда через потенциальный барьер по механизму упругого туннелирования.

Проведено детальное описание процесса переноса носителей заряда через дискретный уровень ловушек в диэлектрике. В рамках предложенной модели предполагали, что перенос через ловушечный уровень состоит в активационном захвате носителей заряда на первую ловушку этого уровня и в последующем туннелировании захваченных носителей заряда от ловушки к ловушке через диэлектрик. В случае совпадения энергии носителя заряда в потенциальной яме с энергией ловушек в диэлектрике, когда вероятность активационного захвата на ловушки близка к единице, наблюдается туннельно-резонансный перенос носителей заряда через диэлектрик. При этом идентичность ловушечных уровней в диэлектрике предполагает сохранение энергии и импульса переносимых таким образом носителей. Превышение энергии носителей заряда в потенциальной яме уровня ловушек в диэлектрике приводит к заполнению практически всех ловушек и к нарушению резонансного условия, что обуславливает снижение общего тока переносимого через ловушки.

Проведено сравнение темпов переноса носителей заряда через потенциальный барьер, образованный диэлектриком, по механизмам упругого туннелирования и переноса носителей заряда через уровни ловушек. Показано, что в структурах Si/CaF_2 , темп переноса носителей заряда через уровень ловушек в 100-300 раз превышает темп переноса носителей заряда упругим туннелированием, в то время как для структур Si/SiO_2 эта величина снижается до 10-50 раз из-за различия высот потенциальных барьеров для электронов и дырок в этих структурах.

В рамках предложенной модели предполагается, что в потенциальных ямах, в переносе носителей заряда участвуют три параллельных процесса: рекомбинация, упругое туннелирование через барьер и активационный захват носителей на ловушечный уровень в диэлектрике с последующим их переносом по туннельно-резонансному механизму через диэлектрик. Для учета вклада каждого из перечисленных процессов в токоперенос предложена система кинетических уравнений в виде (1-3) записанная с учетом переноса носителей заряда посредством

туннельно-резонансных переходов от одной ловушки к другой в слое диэлектрика. Получено решение этой системы уравнений в стационарных условиях.

Для рассмотрения переходных процессов в периодических наноразмерных структур кремний/диэлектрик, обусловленных процессами заряда и разряда ловушечных состояний в диэлектрике при подаче внешнего смещения, предложенную систему кинетических уравнений решали в нестационарных условиях. Учет переходных процессов позволяет рассматривать накопление заряда на ловушечных состояниях в диэлектрике, которое приводит к возникновению гистерезиса вольт-амперных характеристик и отрицательного дифференциального сопротивления.

В четвертой главе приведены результаты моделирования вольт-амперных и переходных характеристик для 4 и 20-периодных наноразмерных структур Si/CaF₂ и Si/SiO₂.

В результате расчетов установлено, что основной вклад в упругое туннелирование носителей заряда через барьер вносят электроны ввиду существенного отличия высоты потенциального барьера для электронов и дырок в структурах Si/CaF₂ и Si/SiO₂. В случае переноса носителей заряда по ловушкам различие между электронным и дырочным токами незначительно, так как темп туннельно-резонансного переноса носителей заряда по ловушкам падает с ростом высоты потенциального барьера для электронов (дырок) $U_{n(p)}$ прямопропорционально $\sqrt{U_{n(p)}}$.

Установлены закономерности влияния положения уровня ловушек в диэлектрике относительно дна потенциальной ямы на протекающий ток через периодическую структуру кремний/диэлектрик. Результаты моделирования вольт-амперных характеристик 4-периодных структур Si/CaF₂ и Si/SiO₂ при различном положении уровней ловушек в диэлектрике представлены на рис. 1. При учете переноса носителей заряда по одному ловушечному уровню, ток протекающий через структуру монотонно возрастает с увеличением внешнего смещения (кривая 1); по двум ловушечным уровням с различной энергией расположенных значительно выше дна потенциальной ямы на вольт-амперных характеристиках структуры появляются ступеньки и она становится немонотонной (кривая 2); при расположении ловушечного уровня в диэлектрике вблизи дна потенциальной ямы становится возможным перенос носителей заряда через этот уровень по туннельно-резонансному механизму и на вольт-амперных характеристиках структуры наблюдается пик тока (кривая 3), возникающий при совпадении энергии носителей заряда в яме с уровнем ловушек в диэлектрике (для Si/SiO₂ структур наблюдается небольшой пик тока из-за значительного вклада переноса носителей заряда по механизму упругого туннелирования (кривая 4)).

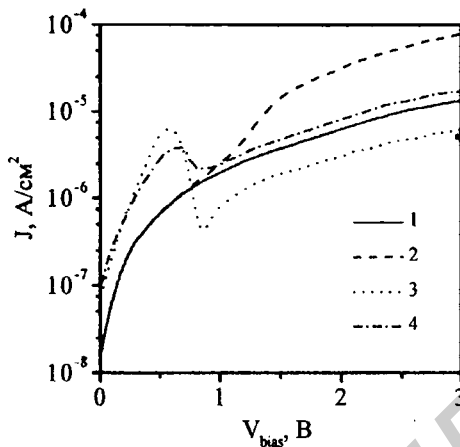


Рис. 1. Влияние энергетического положения ловушечного уровня на ВАХ 4-периодной Si/CaF₂ структуры: 1 — $E_t = (0,35 + E_{g(Si)}/2)$ эВ; 2 — $E_{t1} = (0,35 + E_{g(Si)}/2)$ эВ, $E_{t2} = (0,6 + E_{g(Si)}/2)$ эВ; 3 — $E_t = (0,08 + E_{g(Si)}/2)$ эВ; 4 — для Si/SiO₂ структуры $E_t = (0,11 + E_{g(Si)}/2)$ эВ.

Исследовано влияние длины траектории движения носителей заряда по уровню ловушек на темп такого переноса. Увеличение длины траекторий из-за увеличения угла отклонения движения носителей заряда от прямолинейного при перемещении по ловушкам или роста числа ловушечных состояний на этой траектории приводит к снижению темпа переноса носителей через слой диэлектрика.

Проведенная оценка степени накопления заряда на ловушках в диэлектрике, которая получена при моделировании электрических характеристик периодических слоистых структур Si/CaF₂ и Si/SiO₂ в динамическом режиме, показала, что увеличение прикладываемого к структуре смещения, времени его воздействия, температуры и концентрации носителей заряда на контактах ведет к росту захваченного заряда. При этом область отрицательного дифференциального сопротивления на вольт-амперных характеристиках периодических структур кремний/диэлектрик с небольшим числом периодов (2-5 периодов) становится ярко выраженной. Причиной является рост обратного тока, вызванного разрядом ловушечных состояний, который конкурирует с прямым током, обусловленным внешним смещением приложенным к структуре. С ростом числа периодов структуры снижается падение напряжения на каждом периоде и скорость разряда захваченного на ловушки заряда, в результате чего область отрицательного дифференциального сопротивления размывается. Эффект гистерезиса вольт-амперных характеристик и сдвиг нулевого тока относительно нулевого смещения достигает своего максимального значения при частичном заполнении ловушек, так как в этом случае

увеличивается расстояние между захваченными зарядами в диэлектрике противоположного знака, создающими внутреннее электрическое поле. Например, максимальное расчетное значение сдвига кривых в 20-периодной Si/CaF₂ структуре достигается при температуре 285 К при определенной скорости изменения внешнего смещения.

Исследование резонансного характера переноса носителей заряда через уровень ловушек в периодической структуре Si/CaF₂, которое возникает при условии расположения дискретного уровня ловушек в диэлектрике вблизи дна потенциальной ямы кремния, показало, что предельное отношение тока в пике и минимуме области отрицательного дифференциального сопротивления достигается при высокой концентрации ловушек в диэлектрике и короткой траектории туннельно-резонансного переноса носителей заряда по уровню ловушек. Частота переключения внешнего смещения, при которой туннельно-резонансный перенос носителей заряда по уровню ловушек максимален, составляет 10^7 - 10^8 Гц, граничная частота составляет 10^9 - 10^{10} Гц. Кроме того, туннельно-резонансный перенос носителей заряда наблюдается в широком диапазоне температур 77-300 К. Такой перенос носителей заряда в периодических структурах Si/SiO₂ характеризуются более узким диапазоном температур 150-300 К и зависимость отношение тока в максимуме и минимуме области отрицательного дифференциального сопротивления от частоты переключения внешнего смещения слабо прослеживается из-за значительного вклада в перенос упругого туннелирования.

В пятой главе проведено математическое описание процессов излучательной и безызлучательной Оже рекомбинации в стационарных условиях при инжекционном возбуждении носителей заряда в периодических наноразмерных структурах кремний/диэлектрик и в структуре металл/пористый кремний, состоящих из нанокристаллов кремния. Выведены соотношения для нахождения темпов инжекции носителей заряда в нанокристаллы кремния, интенсивности электролюминесценции и эффективности излучательной рекомбинации.

Проведено численное моделирование рекомбинационных процессов в периодических структурах Si/CaF₂. Установлены закономерности роста безызлучательной и излучательной рекомбинаций в нанокристаллическом кремнии в зависимости от плотности протекающего через структуру тока: различие в закономерностях возрастания дырочного и электронного токов ведет к нелинейной зависимости интенсивности электролюминесценции от тока, а увеличение вклада безызлучательной рекомбинации при высоком уровне инжекции обуславливает выход этой зависимости в режим насыщения. Причем, участок нелинейной зависимости тем резче, чем выше различие концентраций основных и неосновных носителей заряда на противоположных контактах структуры. Обнаружено, что относительное снижение вклада безызлучательной Оже рекомбинации достигается

увеличением концентрации наноразмерных кластеров в кремнии и числа периодов структуры. Так как темп переноса дырок через потенциальный барьер всегда меньше чем электронов, то одним из основных путей увеличения интенсивности электролюминесценции вблизи металлического контакта является увеличение концентрации дырок на контакте, инжектирующем дырки.

Проведено описание рекомбинации носителей заряда в нанокристаллах кремния в пористом кремнии с учетом их лавинного умножения при высоких внешних смещениях в структуре металл/пористый кремний/подложка.

Выполнено численное моделирование электрических характеристик структур металл/пористый кремний/подложка для обратного смещения барьера Шоттки. В результате моделирования было установлено, что лавинное умножение основных носителей заряда приводит к нелинейному росту концентрации неосновных носителей, контролирующей интенсивность электролюминесценции. Рост внешнего смещения обуславливает увеличение инжекции третьего носителя заряда в кластер кремния, т.е. увеличение вклада безызлучательной Оже рекомбинации.

В заключение предложены оптимальные параметры исследуемых структур, обеспечивающие максимальную величину интенсивности электролюминесценции: снижение безызлучательной Оже рекомбинации носителей заряда достигается при концентрации нанокристаллов кремния 10^{20} см^{-3} и выше; концентрация инжектированных в структуру дырок должна превышать в 5-10 раз концентрацию электронов; в периодических наноразмерных структурах Si/CaF₂ оптимальное число периодов составляет 15-20.

В шестой главе предложены приборные структуры, работающие на эффекте туннельно-резонансного переноса носителей заряда через ловушечные уровни в диэлектрике в периодических слоистых структурах Si/CaF₂.

Основной характеристикой приборных структур для работы в логических схемах является отношение токов в двух стабильных состояниях, соответствующих высокому и низкому уровню сигнала. Для исследуемых структур эти стабильные состояния соответствуют току в максимуме и в минимуме области ОДС. Кроме того, вольт-амперные характеристики приборных структур должны быть несимметричными, т.е. зависеть от полярности внешнего смещения. В периодических структурах Si/CaF₂; Si/SiO₂ это достигается выбором концентрации носителей заряда на инжектирующих контактах. Ввиду этого определены наиболее приемлемые электрофизические параметры периодической структуры Si/CaF₂ для работы в логических схемах. Показано, что использование периодических структур Si/SiO₂ для таких устройств является нецелесообразным из-за значительного вклада протекающего в них тока по механизму упругого туннелирования, это снижает эффект туннельно-резонансного переноса носителей заряда по ловушкам и приводит к уменьшению отношения тока в максимуме и минимуме области ОДС.

Предложена эквивалентная схема 2-периодной структуры Si/CaF₂, где описание области отрицательного дифференциального сопротивления проводится с помощью источника тока, управляемого напряжением по заданной нелинейной зависимости, определяемой туннельно-резонансным переносом носителей заряда через ловушки в диэлектрике. Результаты моделирования эквивалентной схемы показали хорошую согласованность с результатами численного моделирования.

На основе приборной двухпериодной структуры Si/CaF₂ с несимметричной вольт-амперной характеристикой, схемотехнически реализуются цифровые цепочки для кремниевых интегральных схем. Данную приборную структуру можно классифицировать как туннельно-резонансный диод, являющийся аналогом резонансно-туннельных приборов, создаваемых на основе полупроводников типа A^{III}B^V. Туннельно-резонансный диод с двумя стабильными состояниями нами предложено использовать в логических схемах как элемент, выполняющий операцию отрицания. При подаче на его эмиттер отрицательного смещения низкого уровня (0,3 В), соответствующего прямому включению периодической структуры Si/CaF₂, на выходе диода мы имеем высокий уровень сигнала (первое устойчивое состояние), так как данное смещение определяет ток в максимуме области ОДС. При подаче на этот же контакт отрицательного смещения высокого уровня (0,6 - 0,9 В), на выходе прибора снимается низкий уровень сигнала (второе устойчивое состояние), который соответствует току в минимуме области ОДС. Приведены схемные решения логических цепочек на основе туннельно-резонансных диодов, выполняющие логические операции сложения и умножения.

Предложена конструкция (рис. 2) и эквивалентная схема аналогово-цифрового преобразователя сигналов. Преобразователь состоит из k цепочек параллельно включенных туннельно-резонансных Si/CaF₂ структур с источниками напряжений, которые осуществляют сдвиг потенциала в каждой параллельной цепочке на величину $(k-1)\pi$, что позволяет получать условие резонанса в k -а двухпериодных структурах Si/CaF₂ при различном входном потенциале. Проведено моделирование многопиковой вольт-амперной характеристики разработанного аналогово-цифрового преобразователя, результаты которого представлены на рис. 3. Показано, что изменение такта и амплитуды пиков осуществляется управляющими источниками напряжения в параллельных цепочках схемы. Предложена структура преобразователя сигнала, реализованная в виде вертикальных туннельно-резонансных Si/CaF₂ структур, разделенных между собой слоями диэлектрика CaF₂ (рис. 3). Управляющее напряжение подается на контакты V_k структуры.

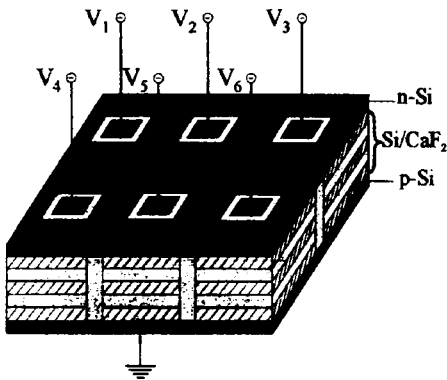


Рис. 2. Структура аналогово-цифрового преобразователя сигналов.

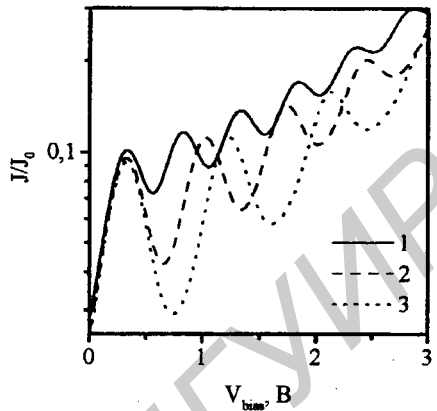


Рис. 3. ВАХ аналогово-цифрового преобразователя при $k=6$: 1 - $n=0,5$; 2 - $n=0,7$; 3 - $n=0,9$

Предложен элемент памяти, использующий зарядовые свойства 10-периодной Si/CaF₂ структуры для хранения информации, последовательно включенной с переключающей однопериодной Si/CaF₂ структурой. Проведенное моделирование переходных характеристик разработанного элемента показало приемлемые параметры (10^{-12} - 10^{-10} с) для использования этого элемента в сверхскоростных интегральных схемах.

Показано, что к основным преимуществам разработанных приборных структур можно отнести широкий диапазон рабочих температур, возможность их исполнения в рамках кремниевой технологии и удовлетворительные времена переключения этих приборов из одного состояния в другое - 10^{-12} - 10^{-10} с.

ВЫВОДЫ

1. Разработана модель транспорта носителей заряда через периодические наноразмерные структуры кремний/диэлектрик и дано ее математическое описание, на основе которого создан программный комплекс, позволяющий моделировать на персональных компьютерах электрические характеристики этих структур, что обеспечивает прогнозирование и корректную интерпретацию результатов экспериментальных исследований. Комплекс характеризуется модульной структурой, разветвленной системой сервисных программ и позволяет представлять результаты расчетов в виде удобном для непосредственного сопоставления с экспериментальными данными [1-3, 6].

2. В результате моделирования электрических характеристик периодических наноразмерных структур Si/CaF_2 и Si/SiO_2 показано, что перенос носителей заряда через ловушечные состояния в диэлектрике превалирует над упругим туннелированием носителей через барьер при комнатных температурах, что является причиной возникновения гистерезиса и области отрицательного дифференциального сопротивления на вольт-амперных характеристиках этих структур [1-3, 6, 8-9].

3. Установлено, что энергетическое положение ловушек в диэлектрике относительно дна потенциальной ямы кремния определяет характер переноса носителей заряда через них, а именно при их расположении вблизи дна ямы доминирует туннельно-резонансный перенос носителей заряда через диэлектрик, иначе транспорт носителей заряда через ловушки определяется двумя составляющими: активационным захватом носителей на ловушки и дальнейшим их переносом от ловушки к ловушке туннельными переходами [5, 6, 8-9, 11-12].

4. Разработана модель рекомбинации носителей заряда в нанокристаллах кремния и дано ее математическое описание, на основе которого разработан программный комплекс, позволяющий моделировать излучательные характеристики периодических наноразмерных структур кремний/диэлектрик и пористого кремния. Комплекс позволяет представлять результаты расчетов в виде удобном для непосредственного сопоставления с экспериментальными данными [4, 7, 11].

5. При помощи разработанного комплекса программ, обеспечивающего расчет процессов рекомбинации носителей заряда в нанокристаллах кремния, определены пути повышения эффективности излучательной рекомбинации, закономерности роста интенсивности электролюминесценции в зависимости от плотности протекающего тока. Показано, что для увеличения интенсивности электролюминесценции необходимо увеличивать концентрации нанокристаллов кремния для понижения протекания безызлучательной Оже-рекомбинации и балансировать темпы инжекции обоих типов носителей заряда в эти кристаллы [4].

6. Туннельно-резонансный перенос носителей заряда через уровень ловушек в диэлектрике в периодических наноструктурах Si/CaF₂ с характерными временами 10⁻¹⁰-10⁻⁹ с приводит к ярко выраженному участку отрицательного дифференциального сопротивления на вольт-амперных характеристиках этих структур в диапазоне температур 77-300 К, что дает основание для использования этого явления для схемотехнических решений при создании квантовых интегральных схем [5].

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

статьи в научно-технических журналах

- [1] Берашевич Ю. А., Холод А. Н., Борисенко В. Е., Особенности переноса носителей заряда в наноразмерных периодических структурах Si/CaF₂ // Известия Белорусской Инженерной Академии, - 1999.- № 1(7)/2.- С. 44-46.
- [2] Берашевич Ю. А., Данилюк А. Л., Холод А. Н., Борисенко В. Е., Активационный транспорт в периодических наноструктурах Si/CaF₂ // Известия Белорусской Инженерной Академии.- 2000.- № 1(9)/2.- С. 51-53.
- [3] Берашевич Ю. А., Данилюк А. Л., Холод А. Н., Борисенко В. Е., Перенос носителей заряда в наноразмерных периодических структурах Si/CaF₂ с участием ловушек // ФТП.- 2001.- Т. 35, № 1.- С. 110-114.
- [4] Лазарук С. Г., Берашевич Ю. А., Генерация электронно-дырочных пар и их излучательная рекомбинация при обратном смещении барьера Шоттки в пленках пористого кремния // Известия Белорусской инженерной академии.- 2001.- №1(11)/3.- С. 48-51.
- [5] Берашевич Ю. А., Королев А. В., Резонансное туннелирование в периодических структурах Si/CaF₂ // Известия Белорусской Инженерной Академии.- 2001.- № 1(11)/3.- С. 44-47.
- [6] Берашевич Ю. А., Данилюк А. Л., Холод А. Н., Борисенко В. Е., Зарядовые эффекты, контролирующие токовый гистерезис и отрицательное дифференциальное сопротивление в периодических наноразмерных структурах Si/CaF₂ // ФТП.- 2002.- Т. 36, № 1.- С. 91-96.

статьи в материалах международных конференций

- [7] Берашевич Ю. А., Козлов А., Холод А. Н., Борисенко В. Е., Рекомбинация в наноразмерных слоистых структурах кремния // Новые технологии изготовления многокристалльных модулей: материалы Международной научно-технической конференции.- Минск-Нарочь, 2000.- С. 103-106.
- [8] Berashevich J. A., Danilyuk A. L., Kholod A. N., Arnaud d'Avitaya F., Borisenko V. E., Charge effects and related transport phenomena in nanosize silicon/insulator structures // Microelectronics Microsystems and Nanotechnology.- Singapore: World Scientific, 2001.- P. 33-36.

- [9] Berashevich J. A., Danilyuk A. L. Shallow and deep traps carrier transport across nanosize silicon/insulator structures // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures.- Singapore: World Scientific, 2001.- P. 463-465.
- [10] Берашевич Ю. А., Борисенко В. Е. Электролюминесценция многослойных структур nc-Si/диэлектрик // Оптика, оптоэлектроника и технологии: труды международной конференции.- Ульяновск, 2001.- С. 62.

тезисы докладов

- [11] Берашевич Ю. А., Холод А. Н., Борисенко В. Е. Транспорт носителей заряда в наноразмерных периодических структурах Si/CaF₂ // Физика конденсированных сред: тезисы докладов VII Республиканской научной конференции студентов и аспирантов.- Гродно, 1999.- С. 23-24.
- [12] Berashevich J. A., Kholod A. N., Borisenko V. E. Charge trapping induced peculiarities of carrier transport through semiconductor/insulator quantum wells // Abstract book: Second Euroconference on Nanoscience for Nanotechnology.- Belgium, 1999.- P.56.
- [13] Берашевич Ю. А. Построение модели переноса носителей заряда через ловушки в наноразмерных периодических структурах Si/CaF₂ // Физика конденсированных сред: тезисы докладов VIII Республиканской научной конференции студентов и аспирантов.- Гродно, 2000.- С. 29-30.



РЕЗЮМЕ

Берашевич Юлия Александровна, Перенос носителей заряда и электролюминесценция в наноразмерных периодических структурах кремний/диэлектрик.

Ключевые слова: кремний, диэлектрик, нанокристалл, периодические структуры, программный комплекс, транспорт, туннельно-резонансный перенос, электролюминесценция.

Разработана модель переноса и рекомбинации носителей заряда через периодические структуры кремний/диэлектрик и дано ее математическое описание, на основе которого разработан программный комплекс, позволяющий моделировать электрические и оптические характеристики этих структур на персональных компьютерах.

Проведено численное моделирование переноса носителей заряда через периодические наноразмерные структуры Si/CaF_2 и Si/SiO_2 и установлено, что возникновение гистерезиса и области отрицательного дифференциального сопротивления на их вольт-амперных характеристиках связаны с накоплением заряда в диэлектрике при переносе носителей через уровни ловушек в нем. Определено, что эффективность проявления этих закономерностей определяется скоростью заряда-разряда ловушечных состояний в диэлектрике. Показано, что при совпадении энергии носителей в яме кремния с дискретным уровнем ловушек в диэлектрике, перенос носителей заряда через этот уровень приобретает туннельно-резонансный характер и приводит к появлению пика тока на вольт-амперных характеристиках периодических структур кремний/диэлектрик.

Установлены закономерности роста безызлучательной и излучательной рекомбинаций в нанокристаллическом кремнии в зависимости от плотности протекающего через структуру тока, а именно показано, что различие в законах возрастания дырочного и электронного токов ведет к нелинейному росту интенсивности электролюминесценции. Также исследованы пути снижения вклада безызлучательного процесса и даны рекомендации по увеличению концентрации нанокластеров кремния для уменьшения вероятности протекания безызлучательной Оже-рекомбинации.

Проведен анализ основных параметров моделируемых эффектов гистерезиса и области ОДС на вольт-амперных характеристиках периодических структур Si/CaF_2 и Si/SiO_2 и сделано обоснование возможности применения туннельно-резонансного механизма переноса носителей заряда через уровень ловушек в диэлектрике в структурах Si/CaF_2 в цифровой схемотехнике. Разработаны принципы построения логических элементов на основе использования туннельно-резонансного транспорта носителей заряда, таких как преобразователь аналоговых данных в цифровые и элемента памяти, а также элементов, выполняющих логические операции отрицания, логического умножения и сложения.

РЭЗЮМЕ

Берашэвіч Юлія Аляксандраўна, Перанос носьбітаў зараду і электралюмінісцэнцыя ў нананамерных перыядычных структурах крэмній/дыэлектрык.

Ключавыя словы: крэмній, дыэлектрык, нанакрышталь, перыядычныя структуры, праграмны комплекс, транспарт, тунэльна-рэзанансны перанос, электралюмінісцэнцыя.

Распрацавана мадэль пераносу і рэкамбінацыі носьбітаў зараду праз перыядычныя структуры крэмній/дыэлектрык і дадзена яе матэматычнае апісанне, на падставе якога распрацаваны праграмны комплекс, які дазваляе мадэляваць электрычныя і аптычныя характарыстыкі гэтых структур на персанальных камп'ютарах.

Праведзена лічбавас мадэляванне пераносу носьбітаў зараду праз перыядычныя нананамерныя структуры Si/CaF_2 і Si/SiO_2 і вызначана, што ўзнікненне гістэрэзісу і вобласці адмоўнага дыферэнцыяльнага супраціўлення на іх вольт-амперных характарыстыках звязаны з накапленнем зараду ў дыэлектрыку пад час пераносу носьбітаў праз лавушачныя ўзроўні ў ім. Вызначана, што эфектыўнасць праяўлення гэтых заканамернасцей вызначаецца хуткасцю зараду-разраду лавушачных станаў у дыэлектрыку. Паказана, што ў выпадку супадзення энергіі носьбітаў у яме крэмнію з дыскрэтным узроўнем лавушак у дыэлектрыку, перанос носьбітаў зараду праз гэты ўзровень набывае тунэльна-рэзанансны характар і вядзе да ўзнікнення піку току на вольт-амперных характарыстыках перыядычных структураў крэмній/дыэлектрык.

Вызначаны заканамернасці росту безвыпраменьваючай і выпраменьваючай рэкамбінацый у нанакрыштальным крэмніі ў залежнасці ад шчыльнасці працякаючага праз структуру току, менавіта паказана, што адрозненне ў законах узростання дзірачнага і электроннага токаў прыводзіць да нелінейнага росту інтэнсіўнасці электралюмінісцэнцыі. Таксама даследаваны шляхі зніжэння ўкладу безвыпраменьваючага працэсу і дадзены рэкамендацыі па павялічэнні канцэнтрацыі нанакластэраў крэмнію з мэтай зніжэння верагоднасці праходжання безвыпраменьваючай Ажэ-рэкамбінацыі.

Прааналізаваны асноўныя параметры мадэліруемых эфектаў гістэрэзісу і вобласці АДС на вольт-амперных характарыстыках перыядычных структураў Si/CaF_2 і Si/SiO_2 і абгрунтавана магчымасць ужывання тунэльна-рэзананснага механізма пераносу носьбітаў зараду праз узровень лавушак у дыэлектрыку ў структурах Si/CaF_2 у лічбавай схематэжніцы. Распрацаваны прынцыпы пабудовы лагічных элементаў на падставе ўжывання тунэльна-рэзананснага транспарту носьбітаў зараду, такіх як пераўтваральнік аналагавых дадзеных у лічбавыя і элемента памяці, а таксама элементаў, якія выконваюць лагічныя аперацыі адмаўлення, лагічнага памнажэння і складання.

SUMMARY

Berashevich Julia Alexandrovna, Charge carrier transport and electroluminescence in periodical silicon/insulator nanostructures.

Key words: silicon, insulator, nanocrystal, periodical structures, computer code, transport, tunnel-resonance transfer, electroluminescence.

The model of the carrier transport and recombination has been developed for periodical silicon/insulator structures. The mathematical description of the model and computer code for simulation of electrical and optical characteristics of the structures have been realized.

Simulation of the carrier transport through periodical Si/CaF₂ and Si/SiO₂ structures was performed. Hysteresis and negative differential resistance region at the current-voltage characteristic were shown to be related to charge of trap states during carrier transfer via local trap levels in dielectric. Effectiveness of detected effects is defined by the charge and discharge rate of the trap states in the dielectric. If the carrier energy in the quantum well formed in silicon coincides with local trap level in the dielectric, the carrier transport gets the tunnel-resonant character. It leads to a current peak at the electrical characteristics of the periodical silicon/insulator structures.

Regularities of the radiative and nonradiative recombination increasing in nanocrystalline silicon were shown to depend on current density passing through the structures. It has been shown that the difference in the hole and electron currents leads to the nonlinear dependence of the electroluminescence intensity. The ways for decreasing of the nonradiative process contribution has been investigated. Namely, some recommendations to rise the nanocrystal concentration that leads to decreasing of the Auger recombination probability have been made.

The tunnel-resonant carrier transport via local trap states in dielectric of nanosize periodical Si/CaF₂ structures has been proposed to be used in new generation of digital devices. Main regularities of the digital elements based on this transport mechanism such as analog-to-digital converters, memory elements and elements realizing logical summation, multiplication and negation have been developed.

БЕРАЩЕВИЧ ЮЛИЯ АЛЕКСАНДРОВНА

**ПЕРЕНОС НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА И ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В
НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ
КРЕМНИЙ/ДИЭЛЕКТРИК**

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 18.03.2002.

Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная.

Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,63.

Уч.-изд.л. 1,4.

Тираж 90 экз.

Заказ 170.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Учреждение образования

"Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники"

Лицензия ЛП №156 от 05.02.2001.

Лицензия ЛП №509 от 03.08.2001.

220013, Минск, П. Бровки, 6.