

АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОНИКИ им. У.А. Арифова

На правах рукописи
УДК 537.533.8

ТАШМУХАМЕДОВА ДИЛНОЗА АРТИКБАЕВНА

**ЭЛЕКТРОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ НАНОПЛЕНОК И
НАНОКРИСТАЛЛОВ СОЗДАННЫХ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ И
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК**

01.04.04 – Физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук

Ташкент – 2010

Работа выполнена в Ташкентском Государственном техническом университете им. Абу Райхана Беруни

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор
Умирзаков Балтаходжа Ерматович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, академик
Мамадалимов Абдугафур Тешабаевич

доктор физико-математических наук, профессор
Митягин Александр Юрьевич

доктор физико-математических наук, профессор
Джуманов Сафарали

Ведущая организация: НИИ «Прикладная физика» при Национальном
Университете Узбекистана

Защита состоится «___» _____ 2010 г. в ___ часов на заседании
Объединенного специализированного совета Д 015.23.01 при Институте
электроники им. У.А. Арифова АН РУз и Институте ядерной физики АН РУз
по адресу 100125, Ташкент, ГСП, Академгородок, ул. Дурмон йули, 33. тел.:
(998-71) 262-79-40, факс: (998-71) 262-87-67. e-mail: aie@aie.uz

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
электроники им. У.А. Арифова АН РУз.

Автореферат разослан «___» _____ 2010 года.

Ученый секретарь
Объединенного специализированного совета
доктор физико-математических наук, проф.

И. Хидиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Наиболее перспективным направлением современной науки является нанотехнология, в частности наноэлектроника, которая появилась с 90-х годов. Различие в направлениях конструирования подчеркивает удивительное влияние квантовых эффектов на структуры, построенные в молекулярном масштабе. В природе область действия квантовых сил ограничивается внутренним пространством атомов и связями между атомами. В таких системах отчетливо проявляются волновые свойства электронов, вследствие чего поведение последних начинает очень сильно зависеть от конкретной геометрии исследуемых образцов. В этих условиях состояние электронов определяется волновыми свойствами и скорее напоминает поведение электромагнитного излучения в волноводах.

Для использования квантовых эффектов в целях создания приборов необходимо получить структуры с размерами, меньшими или много меньшими, чем некоторые характерные длины. В связи с этим необходимо интенсивное развитие технологии создания новых нанопленок и нанокристаллов, свойства которых резко отличаются от свойств объемных материалов. Установление оптимальных условий создания и изучения свойств наноструктур дает возможность разработать на их основе новые приборы и устройства с уникальными параметрами. Эти объекты могут применяться при создании нанотранзисторов, составных частей интегральных схем, усилителей, генераторов работающих в области терагерц, запоминающих устройств с терабитной памятью, нейроструктур для нанокompозитов и др. Предлагаемая научная работа посвящена **актуальной проблеме:** разработка эффективной методики создания перспективных наноструктур на основе полупроводниковых и диэлектрических пленок, установление основных механизмов их образования и комплексное изучение их свойств.

Степень изученности проблемы. До начала настоящей работы исследователями (в том числе автором этой работы) были получены сплошные тонкие пленки с толщиной 10 – 100 нм и изучены их физико-химические свойства. Эти пленки в основном получены методом молекулярно – лучевой эпитаксии. Имеется ряд работ посвященных кластерообразованию в процессе имплантации ионов в различные материалы, в особенности, в кристаллы Si, GaAs и GaAlAs. В этих исследованиях нанобъекты получены путем высокоэнергетической бомбардировки ионами инертных газов и водорода двух и трех компонентных материалов, в результате чего происходит скопление одного из компонентов подложки в приповерхностной области. Например, при ионной бомбардировке SiO_2 на отдельных участках приповерхностного слоя наблюдается накопление некоторого количества атомов Si, вследствие чего формируется сверхрешетка типа Si – SiO_2 . Изучены их состав и в некоторых случаях кристаллическая структура.

Отметим, что в последние годы тонкие полупроводниковые пленки с наноразмерными кристалликами, обладающими свойствами “металла”

представляют повышенный интерес. Это в первую очередь связано с присущей таким кристаллам совершенно новым уникальным свойствам, что дает возможность использовать их при конструировании современных приборов, твердотельной электроники. В частности эпилепки Si с силицидными нанокристаллами могут применяться в создании транзисторов с металлической и проницаемой базой.

До настоящего времени в проведенных нами работах установлено, что низкоэнергетическая ($E_0 \leq 5$ кэВ) высокодозная ($D \geq 10^{16}$ см⁻²) ионная имплантация позволяет получить в приповерхностных слоях кремния тонкие сплошные монокристаллические слои с толщиной $d = 50 - 100$ Å силицидов металлов типа BaSi₂, NaSi₂, CoSi₂. Показано, что удельное сопротивление этих пленок составляет 30 – 50 мкОм·см. Также были определены оптимальные режимы ионной имплантации и отжига для создания гетероэпитаксиальных систем типа Ga_{1-x}Me_xAs/GaAs.

Однако до настоящего времени возможность создания ионной имплантацией отдельных кванто – размерных двух или трех компонентных структур на основе полупроводников, диэлектрических пленок и композиционных материалов и их свойства практически не исследованы.

Связь диссертационной работы с тематическими планами НИР. Работа выполнена на кафедре «Нанотехнологии» ТашГТУ в рамках научных проектов ГКНТ РУз: «Создание многокомпонентных наноструктур на основе полупроводников, диэлектрических пленок, композиционных материалов и изучение их электронных состояний и физических свойств» № гос. регистрации Ф-2.1.50 (2003-2007 гг.); «Разработка технологий получения многокомпонентных нанопленок для приборов твердотельной электроники (приборы микроэлектроники, преобразователей энергии, приборов СВЧ и оптоэлектроники: приборы измерения, контроля и прогноза)» № гос. регистрации П - 10.31 (2003-2005 гг.); проектов МВССО РУз: «Изучение механизмов формирования одно- и многокомпонентных нанокристаллов и нанопленок при взаимодействии заряженных частиц и лазерного излучения с поверхностью кремния, германия, полупроводниковых соединений A³B⁵ и диэлектрических пленок» № гос. регистрации ОТ-Ф2-083 (2007-2011 гг.); «Рост, физические свойства и структура многослойных наноэпитаксиальных гетероструктур» № гос. регистрации ОТ-ЁФ2-002 (2008-2010 гг.); «Разработка технологии получения наноматериалов с регулируемой шириной запрещенной зоны для приборов микро- и оптоэлектроники на основе полупроводниковых пленок» № гос. регистрации 14-002 (2009-2011 гг.); «Разработка и выбор дешевой технологии получения наноструктур на основе элементарных и бинарных полупроводников» № гос. регистрации 14-007 (2009-2011 гг.).

Цель исследования: Изучение закономерностей и выяснение физических механизмов формирования одно- и многокомпонентных нанопленок, нанокристаллов и сверхрешеток на основе полупроводниковых и диэлектрических пленок при низкоэнергетической ионной бомбардировке в сочетании с отжигом.

Для достижения поставленной цели ставились следующие задачи:

– изучить возможности создания нанопленок и нанокристаллов на основе полупроводников и диэлектрических пленок методом ионной имплантации в сочетании с отжигом (температурный прогрев, лазерная абляция). Определить оптимальные режимы их формирования. Разработать способ получения наноструктур на основе Si и GaAs;

– изучить процессы формирования однокомпонентных нанокристаллов и нанопленок в приповерхностных слоях пленок GaAs и CaF_2 при бомбардировке ионами инертных газов. Детально исследовать электронную и кристаллическую структуру наноэпитаксиальных систем типа Ga/GaAs и Ca/CaF₂;

– изучить процессы формирования двух- и трехкомпонентных нанокристаллов и нанопленок типа MeSi_2/Si , $\text{Ga}_{1-x}\text{Me}_x\text{As}/\text{GaAs}$ и $\text{Ca}_{1-x}\text{Me}_x\text{F}_2/\text{CaF}_2$. Изучить изменение состава, формы и структуры нанокластерных фаз при постимплантационном отжиге. Выявить основные механизмы формирования одно- и многокомпонентных наноструктур при ионной имплантации и отжиге;

– изучить электронную структуру полученных многокомпонентных нанокристаллов и нанопленок. Исследовать зависимость ширины запрещенной зоны нанопленок от их толщины и нанокристаллов от их размеров;

– изучить тип и параметры решетки нанопленок и нанокристаллов силицидов, оценить зависимость параметров решетки наноструктур от их размеров. Разработать модель поверхности Si с нанокристаллами силицида;

– определить критические размеры нанокристаллов при которых происходит туннелирование электронов. Дать теоретические объяснения полученных результатов. Разработать методику оценки критических размеров нанокристаллов при которых начинают проявляться кванто – размерные эффекты;

– построить энергетическую зонную диаграмму нанокристаллов и многослойных наноэпитаксиальных систем (поверхность с нанокристаллами и многослойные структуры) $\text{Si}/\text{MeSi}_2/\text{Si}$, $\text{GaAs}/\text{Ga}_{1-x}\text{Me}_x\text{As}/\text{GaAs}$, $\text{Ca}_{1-x}\text{Me}_x\text{F}_2/\text{CaF}_2$, $\text{Ca}/\text{CaF}_2/\text{Si}$;

– разработать научно-обоснованные рекомендации по созданию многокомпонентных наноструктур типа $\text{Si}/\text{CoSi}_2/\text{CaF}_2$, $\text{Si}/\text{CoSi}_2/\text{Si}$, $\text{Si}/\text{CaF}_2/\text{GaAs}$ с использованием методов ионной имплантации и МЛЭ.

Объекты исследования: Ионно-лучевая обработка и электронная спектроскопия поверхности твердых тел.

Предмет исследования: Закономерности и физические механизмы формирования нанокристаллов и нанопленок на поверхности монокристаллических пленок Si, GaAs, GaP и CaF_2 .

Методы исследования: Оже – электронная спектроскопия (ОЭС), дифракция быстрых электронов (ДБЭ), растровая электронная микроскопия (РЭМ), ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия (УФЭС), спектроскопия упруго отраженных электронов (СУОЭ), спектроскопия характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ).

Основные положения, выносимые на защиту

1. Механизмы формирования эпитаксиальных нанокристаллических фаз и нанопленок силицидов металлов в процессе низкоэнергетической имплантации ($E_0 = 0,5 - 5$ кэВ) ионов активных металлов в Si в сочетании с отжигом. Установлено, что при ($D = 10^{14} \text{ см}^{-2}$) низких дозах ионов образуются зародыши, затем с ростом дозы до $D = 10^{15} \text{ см}^{-2}$ на этих участках формируются нанокристаллы с диаметром 20 – 25 нм, а при высоких дозах ($D \geq 10^{16} \text{ см}^{-2}$) – нанопленки с толщиной 2 – 10 нм.

2. Механизмы формирования одно- и многокомпонентных нанокластерных фаз и нанопленок при бомбардировке GaAs, GaP и CaF₂ ионами Ag^+ , Na^+ , Ba^+ , Mg^+ . Установлено, что при бомбардировке бинарных соединений происходит их разложение и частичная десорбция легко испаряющихся компонентов (As, P и F₂) с поверхности, и обогащение поверхности атомами металла. После отжига в случае пленок облученных ионами Ag^+ на поверхности образуются наноструктуры металла (Ga и Ca), а в случае имплантации ионов активных металлов – трехкомпонентные соединения ($\text{Ga}_{1-x}\text{Me}_x\text{As}$, $\text{Ca}_{1-x}\text{Me}_x\text{F}_2$). Определены оптимальные режимы ионной имплантации и отжига (температурного и лазерного) для формирования эпитаксиальных наноструктур одно- и трехкомпонентных соединений.

3. Экспериментальные данные зависимости параметров зон и кристаллической решетки от размеров нанобъектов. В случае нанокристаллов CoSi₂ с уменьшением поверхностных размеров от 50 – 60 нм до 25 – 30 нм ширина запрещенной зоны увеличивается на $\sim 0,4$ эВ. Это объясняется уменьшением концентрации электронов в нанокристалле, которое приводит к перераспределению заполненных и свободных электронных состояний. Оценочные значения магического числа силицидных наноматериалов ($N_v = 78000 - 80000$, $N_s = 8000$).

4. Природа и идентифицированные основные особенности, наблюдаемые на кривых энергетического распределения валентных электронов, для одно-, двух- и трехкомпонентных нанокристаллов и нанопленок сформированных на поверхности Si, GaAs и CaF₂. Образование новых соединений приводит к перераспределению электронных состояний в валентной зоне и зоне проводимости. В частности при образовании силицидов типа BaSi₂ наличие основных особенностей обусловлено гибридизацией 3s и 3p уровней Si с 6s уровнями Ba.

5. Энергетические диаграммы, впервые построенные для полупроводниковых и диэлектрических пленок с гетероэпитаксиальными нанокристаллами ($\text{Si} + n\text{MeSi}_2$, $\text{GaAs} + n\text{Ga}_x\text{Me}_{1-x}\text{As}$, $\text{CaF}_2 + n\text{Me}$) и для многослойных гетероэпитаксиальных наноструктур КНД ($\text{Ca} - \text{CaF}_2 - \text{Si}$), полученных методами низкоэнергетической ионной имплантации в сочетании с отжигом.

6. Оценочные критические размеры нанокристаллов и нанопленок для системы $\text{MeSi}_2 - \text{Si}$, при которых происходит туннелирование электронов через барьер. В случае системы $\text{Si} - n\text{BaSi}_2$ поверхностные критические размеры нанокристаллов составляют 20 – 25 нм.

7. Модель поверхности Si с нанокристаллами MeSi_2 . Эту модель можно использовать для объяснения закономерностей наблюдающихся при образовании нанокристаллов других типов силицидов металлов. Определена роль эффекта рассогласования параметров решетки системы Si – MeSi_2 на структуру и размеры нанокристаллических фаз. Показано, что в случае Si + ncBaSi₂ нанокристаллические фазы состоят из трех участков, а в случае Si + ncCoSi₂ – из двух.

Предложенный маршрут получения нанокристаллов и нанопленок на поверхности полупроводников и диэлектрических пленок методом ионной имплантации и последующего отжига.

8. Научно – обоснованные рекомендации по получению нанокристаллов и нанопленок на основе полупроводниковых и диэлектрических пленок и по применению их при разработке приборов микро- и оптоэлектроники.

В работе развито новое **научное направление** “Формирование нанокристаллических и нанопленочных гетероструктур на основе полупроводниковых и диэлектрических пленок при низкоэнергетической ионной имплантации”.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые:

1. Определены размеры нанокристаллических фаз и толщина нанопленок полученных методом ионной имплантации в сочетании с отжигом в поверхностных слоях Si, GaAs и CaF_2 ; показано, что в процессе ионной имплантации на поверхности с ростом дозы образуются зародыши ($D = 10^{14} \text{ см}^{-2}$), нанокластерные фазы ($D = 5 \cdot 10^{14} - 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$), островки ($D = 2 \cdot 10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-2}$) и равномерное легирование всей поверхности ($D > 10^{16} \text{ см}^{-2}$). Поверхностные размеры нанокристаллов лежали в пределах 10 – 30 нм, а их толщина – 1 - 10 нм.

2. Изучены закономерности и установлены основные механизмы формирования одно-, двух- и трехкомпонентных наноматериалов (нанокристаллов и нанопленок) в приповерхностной области полупроводниковых и диэлектрических пленок при ионной бомбардировке и последующем отжиге. Показано, что в случае кремния ионная имплантация приводит к разрыву связей между атомами, обогащению поверхности примесными атомами и образованию соединений типа MeSi_2 . В случае двухкомпонентных образцов разложение соединений сопровождается десорбцией летучих атомов (в виде As_2 , F_2) с поверхности, обогащением поверхности атомами примеси и образованием после отжига новых трехкомпонентных соединений.

3. Установлено, что параметры энергетических зон и кристаллической решетки нанокристаллов и нанопленок силицидов зависят от их размеров. В частности, в случае CoSi_2 при уменьшении диаметра нанокристаллов от 70 до 25 нм ширина запрещенной зоны увеличивается на 0,1 – 0,4 эВ, а постоянная решетки на $\sim 0,05 \text{ \AA}$.

4. Построена энергетическая диаграмма для трехслойной эпитаксиальной системы нанопленок $\text{Ca} - \text{CaF}_2 - \text{Si}$, а также для поверхности исследуемых материалов с нанокристаллами: Si + ncMeSi₂, GaAs +

$\text{ncGa}_x\text{Me}_{1-x}\text{As}$ и $\text{CaF}_2 + \text{ncMe}$. Эти диаграммы очень важны для использования полученных результатов в создании нанопленочных структур типа металл – полупроводник – диэлектрик и сверхрешеток на поверхности исследуемых образцов.

5. Разработан метод оценки критических размеров нанокристаллических фаз и нанопленок при которых начинается туннелирование электронов. Метод основан на измерении изменения тока проходящего через систему $\text{Si} + \text{MeSi}_2$ (барьер + квантовая точка). В случае $\text{Si} + \text{ncBaSi}_2$ поверхностные размеры квантовых точек (BaSi_2) составляют 25 – 30 нм, а барьера (Si) - 20 – 30 нм.

6. Предложена модель поверхности Si с нанокристаллами MeSi_2 . Эта модель может быть использована для объяснения процессов происходящих на границе раздела $\text{Si}/\text{ncMeSi}_2$ и закономерностей образования сверхрешеток типа $\text{Si} + \text{ncMeSi}_2$ с близкими и различными параметрами решетки. Разработан технологический маршрут получения нанокристаллов и нанопленок на основе полупроводников и диэлектрических пленок состоящий из сверхвысоковакуумной очистки подложки, ионной имплантации, отжига.

7. Предложен способ оценки состава и структуры наноразмерных фаз. Способ основан на сравнительном анализе структуры спектров ОЭС, УФЭС и ДБЭ картин нанофаз, сплошной пленки и чистой подложки.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Установление механизмов и закономерностей формирования гетероэпитаксиальных наноструктур и выявление механизмов изменения электронной и кристаллической структуры нанообъектов при изменении их размеров являются фундаментальной базой для развития теории образования квантово-размерных объектов и для построения теоретической модели процессов образования многокомпонентных структур при ионной имплантации и последующем отжиге.

Разработанные технологии и установленные оптимальные режимы получения наноэпитаксиальных многослойных и планарных гетероэпитаксиальных периодических систем имеют перспективы при создании новых приборов электронной техники (БИС, УБИС, микро- и СВЧ – электроники, элементов памяти и связи, чувствительных элементов и оптических датчиков, солнечных батарей и др.).

Реализация результатов. Разработаны практические рекомендации для будущего использования полученных результатов в электронной промышленности Республики Узбекистан (ОАО «ФОТОН») и стран ближнего и дальнего зарубежья. В рекомендациях имеются оптимальные режимы ионной имплантации и отжига, данные по влиянию длительной эксплуатации на рабочие характеристики (Получены 2 патента Республики Узбекистан).

Результаты экспериментальных и теоретических исследований, экспериментальные установки, статьи и монографии используются в учебном процессе ТашГТУ и других специализированных вузов и научно -

исследовательских работах аспирантов и докторантов (Имеется акт внедрения в учебный процесс ТашГТУ).

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих Конференциях и Симпозиумах: 14th International Conference on Ion Beam Modification of Materials (Asilomar, 2004, Taormina, 2006); Korea-Uzbekistan joint symposium on quantum functional semiconductor materials. Physics and Application (Seoul, 2005, 2007, 2009); European Materials Research Society (Strasbourg, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009); Radiation effect in insulator (Padova, 2009); 6th European workshop on Secondary Ion Mass Spectrometry (Münster, 2008); XXXV, XXXVI, XXXVII, XXXVIII и XXXIX на международных конференциях по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009); XVII, XVIII XIX международных конференциях по взаимодействию ионов с поверхностью (Москва, 2003, 2005, 2007, 2009); Ядерная и радиационная физика (Алматы, 2005, 2009); Фотоэлектрические явления в полупроводниках (Ташкент, 2006); Хозирги замон физикасининг долзарб муаммолари (Термиз 2006, 2008); Физическая электроника (Ташкент, 2005, 2009).

Опубликованность результатов. По материалам диссертации опубликована 92 публикации, из них 15 статей в международных и республиканских научных журналах, 17 статей в сборниках трудов конференций.

Личный вклад автора. Все представленные результаты получены непосредственно автором. В совместных публикациях вклад автора является определяющим. Научные обобщения и объяснения результатов, представленные в диссертации, выполнены лично автором.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Она изложена на 242 страницах и включает: 89 рисунков, 23 таблиц, 199 наименований библиографии.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, оценивается научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится краткий обзор литературных данных, посвященных методам получения и изучения свойств нанобъектов. В появлении нанотехнологии и ее развитии основополагающими являются идеи, научные работы и разработки Г.А.Гамова, Э.Дрекслера, Р.Фейнмана, Биннинга, Рорера и др. [1 – 4]. В нанотехнике принципиальным является квантовый характер нанобъектов и нанопроцессов и уникальная возможность целенаправленной сборки веществ на атомно – молекулярном уровне. При этом особый интерес представляет получение нанопленок и нанокристаллов в условиях СВВ на поверхности и в приповерхностной

области полупроводниковых и диэлектрических пленок. Для этих целей чаще всего используются следующие традиционные и новые методы МЛЭ, ТФЭ, РЭ, электронная и лазерная литография, ионная бомбардировка и др., а также новые перспективные методы связанные с управляемой сборкой отдельных атомов и молекул с помощью наноассемблера. Наиболее уникальным среди существующих методов создания гетероэпитаксиальных структур (сверхрешеток, квантовых ям) является метод МЛЭ. В настоящее время не существует метода, который мог бы полностью заменить метод МЛЭ. Основными недостатками метода являются: громоздкость и сложность экспериментальной установки, необходимость использования подложек с сверхчистыми и гладкими поверхностями, сверхжесткие требования к чистоте и дозе напыляемых веществ, невозможность получения однородных сплошных пленок с толщиной менее 25 – 30 Å, невозможность получения без дополнительных обработок на поверхности подложки (пленки) регулярно расположенных нанокристаллов (наноточек).

Анализ литературных данных показывает, что в получении сверхтонких пленок так и нанокристаллов может быть перспективным метод низкоэнергетической ионной имплантации. Этот метод до настоящего времени использовался для модификации свойств поверхности материалов различной природы, для получения защитных слоев, омических контактов и для легирования полупроводников.

Однако результаты систематических исследований по созданию нанообъектов ионной бомбардировкой и всестороннему изучению их свойств пока еще отсутствуют. Следовательно, не имеются сведения о механизме формирования наноструктурных фаз. Что касается получения новых многокомпонентных нанопленок и нанокристаллов формируемых на основе химической связи атомов подложки и имплантируемого атома до начала **настоящей работы практически не исследованы**. Отсутствуют также результаты исследований по созданию новых многокомпонентных гетероструктур с последовательным использованием методов ионной имплантации и МЛЭ.

В конце главы приводятся выводы из обзора литературы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных установок, методик обработки и исследований поверхности нанопленок и нанокристаллов. В соответствии с задачами исследований, в диссертационной работе были использованы две сверхвысоковакуумные установки. На первой установке проведены все технологические операции (ионная имплантация, температурный и лазерный отжиг) и исследования состава, структуры и свойств наноматериалов с использованием методов вторично- и фотоэлектронной спектроскопии. Исследуемые эпитаксиальные пленки Si, GaAs, GaP и CaF₂ разной толщины были получены на второй стандартной установке методом МЛЭ. В этой же установке были определены толщина пленки, тип и параметры решетки исследуемых пленок с использованием ДБЭ.

Элементный и химический состав нанопленок и нанокристаллов определялся методом оже – электронной спектроскопии. Для получения информации о размерах нанокристаллов и степени покрытия поверхности использовался РЭМ. Известно, что степень покрытия можно оценивать и при помощи оже – электронной спектроскопии в том же приборе, где осуществлялась ионная имплантация и отжиг. По изменению низкоэнергетических пиков (формы и интенсивности) кремния (91 эВ) и кобальта (53 эВ) мы определили химический состав нанокристаллов и нанопленок, а по изменению интенсивности высокоэнергетических оже – пиков степень покрытия поверхности Si нанокристаллами CoSi_2 . При этом принималось, что интенсивность оже – сигнала кобальта (765 эВ) прямо противоположно степени покрытия поверхности силицида.

$$\theta = \frac{I_{\text{Co}}(\text{HK})}{I_{\text{Co}}(\text{HP})} \quad (1)$$

где $I_{\text{Co}}(\text{HP})$ - интенсивность пика Co (765 эВ) для сплошной пленки, $I_{\text{Co}}(\text{HK})$ - интенсивность пика для нанокристалла. $\theta = 1$ соответствует образованию сплошной пленки. Отметим, что в случае образования CoSi_2 положение пика кремния при 91 эВ практически не меняется, а изменяется лишь его интенсивность. Это объясняется тем, что соединение Si с Co в основном имеет ковалентный характер. Поэтому значение θ' можно определить по формуле, предложенной Алтуховым для МЛЭ пленок CoSi_2 [5]:

$$\theta' = 3 \left(1 - \frac{I_{\text{Si}}}{I_{\text{Si}_n}} \right) \cdot \frac{I_{\text{Si}_n}}{I_{\text{Co}}} \quad (2)$$

где I_{Co} - интенсивность оже – сигнала Co в CoSi_2 (765 эВ);

I_{Si} - интенсивность оже – сигнала Si в CoSi_2 (91 эВ);

I_{Si_n} - интенсивность оже – сигнала Si в подложке (91 эВ).

Разработана методика оценки состава, структуры и свойств отдельных нанокристаллов основанная на сравнительном анализе спектров оже-, фото- и ХПЭ электронов, полученных для подложки, нанопленки и нанокристалла.

В третьей главе приводятся результаты по применению ионной имплантации и последующего отжига (температурный, лазерный) для создания нанокристаллов и нанопленок силицидов металлов Ba^+ , Na^+ , Mg^+ , Co^+ на поверхности и в приповерхностной области кремния. Изучена динамика образования эпитаксиальных нанокристаллов и нанопленок типа MeSi_2 ; оценены их параметры энергетических зон и плотности электронных состояний и изучены эмиссионные свойства и глубина зоны выхода истинно-вторичных электронов нанопленок силицидов.

В таблице 1 приведены оптимальные режимы создания нанокристаллов типа MeSi_2 методом ионной имплантации и последующего отжига.

Таблица 1

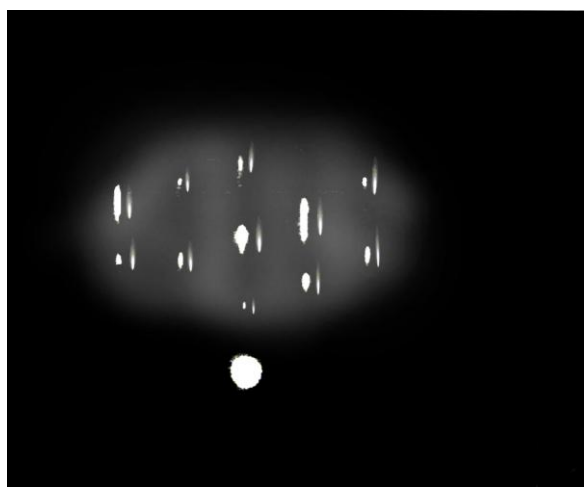
Оптимальные режимы ионной имплантации и отжига для получения нанокристаллов MeSi_2

Ионы	E_0 , кэВ	D , см^{-2}	Силицид	Оптимальный температурный и лазерный отжиг		Поверхностный диаметр НК d , нм	Толщина НК h , нм
				T , К	$W (\text{Дж} \cdot \text{см}^{-2}) + T'$ (К)		
Ba	0,5	$8 \cdot 10^{14}$	BaSi_2	1100	$1,8 + 1000$	25 – 30	30 – 35
	1,0	10^{15}		1200	$1,8 + 1000$	20 – 30	40 – 45
	5,0	10^{15}		1200	$2 + 1000$	15 – 20	50 – 60
Na	0,5	$2 \cdot 10^{14}$	NaSi_2	1000	$1,6 + 900$	15 – 20	35 – 40
	5,0	$2 \cdot 10^{15}$		1000	$1,8 + 900$	10 – 15	60 – 70
Co	0,5	10^{15}	CoSi_2	1000	$1,8 + 900$	15 – 20	30 – 40
	5,0	$2 \cdot 10^{15}$		1100	$1,8 + 900$	10 – 15	60 – 70

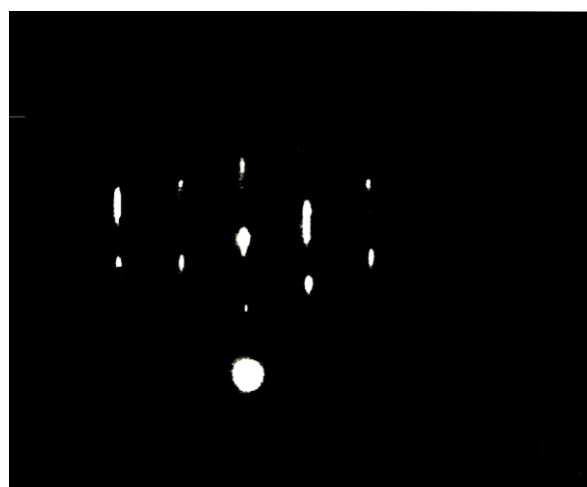
T – температура длительного отжига ($t \geq 30$ мин.)

T' – температура кратковременного отжига

Из таблицы видно, что во всех случаях с ростом дозы ионов увеличивается поверхностный диаметр нанокристаллов, а с ростом энергии ионов – их толщина. Однако, отметим, что при энергии ионов $E_0 > 5$ кэВ концентрация Me в приповерхностной области Si даже при дозе насыщения существенно уменьшается и возможность образования однородной сплошной пленки типа MeSi_2 резко снижается, а при низких энергиях ионов ($E_0 < 0,5$ кэВ) результаты имплантации мало отличаются от результатов, полученных для ионного напыления. Поэтому область энергии $E_0 = 0,5 - 5$ кэВ является наиболее оптимальным для получения наноразмерных кристаллов и пленок. При этом наиболее совершенные структуры формируются в случае образования силицидов CoSi_2 . Это доказано результатами ДБЭ. На рис. 1 приведены электронограммы от поверхности кремния с нанокристаллами BaSi_2 и CoSi_2 (размеры НК составляли $150 - 200 \text{ \AA}$).



а



б

Рис. 1. Электронограммы поверхности Si с нанокристаллами BaSi₂(а) и CoSi₂(б)

Видно, что в случае Si с НК BaSi₂ на картине ДБЭ имеются некоторые двойниковые рефлексы и слабый диффузный фон, а в случае CoSi₂ практически не наблюдаются двойниковые рефлексы и отсутствует фон, характерный для аморфных пленок. Раздвоение рефлексов на электронограммах системы BaSi₂ – Si объясняется несоответствием их постоянных решеток: для Si $a=5,43\text{Å}$, для BaSi₂ $a=6,54\text{Å}$. Отличие постоянных решеток приводит также к возникновению напряжения сопрягающихся поверхностей Si и BaSi₂, вследствие чего происходит некоторое разупорядочение приграничных слоев, а на электронограммах появляется диффузный фон. Что касается системы CoSi₂ и Si, то параметры их решеток почти совпадают друг с другом ($a_{\text{CoSi}_2}=5,40\text{Å}$) и, следовательно, не происходит заметного изменения кристалличности поверхности.

Аналогичным образом определены оптимальные режимы формирования сплошных, однородных по глубине, с минимальными дефектами пленки силицидов металлов (табл. 2).

Таблица 2

Режимы ионной имплантации и отжига для получения сплошных пленок MeSi₂/Si

Ионы	E ₀ , кэВ	D, см ⁻²	Оптимальный температурный и лазерный отжиг		Силицид		Топография поверхности*	Ширина переходного слоя
			T, K	W(Дж·см ⁻²)+T'(K)	тип	d, Å		
Ba	0,5	2·10 ¹⁶	1100	2+1100	BaSi ₂	20-30	спл., р.р.	30 – 40
	3	4·10 ¹⁶	1200	2+1100		40-50	спл., р.р.	50 – 60
	5	6·10 ¹⁶	1200	2+1200		50-60	спл., р.р.	70 – 80
Na	0,5	4·10 ¹⁶	1000	1,7+900	NaSi ₂	25-30	спл., н.ф.	–
	1	4·10 ¹⁶	1000	1,7+900		30-35	–	50 – 60
	3	6·10 ¹⁶	1100	1,9+1000		50-60	–	60 – 80
Co	1	2·10 ¹⁶	1000	1,8+1000	CoSi ₂	35-40	спл., н.р.р.	50 – 60

* спл. – сплошная пленка, р.р. – раздвоение рефлексов, н.р.р. – нет раздвоения рефлексов.

На рис. 2 приведены фотоэлектронные спектры “чистого” Si (111), Si с нанокристаллами CoSi₂ и нанопленкой CoSi₂/Si ($\theta = 40 - 50\text{Å}$), полученные при $h\nu = 10,8\text{эВ}$. По оси абсцисс отложена энергия связи E_{св} электронов, отсчитанная относительно уровня Ферми E_Ф. Видно, что все кривые обладают явно выраженной тонкой структурой. Форма и положения основных пиков пленки CoSi₂ существенно отличаются от полученных для Si. В УФЭС чистого кремния обнаружено 3 явно выраженных максимума. В случае пленки CoSi₂, также обнаруживаются три пика с энергиями E_{св} = – 0,6; – 0,7; – 3,5 эВ, соответственно. Анализ этого спектра и сравнение его со спектрами Si и Co даёт возможность предполагать, что пик А формируется вследствие гибридизации M₃ состояния кремния и M₅ состояния кобальта, а

пик В – вследствие гибридизации M_2 состояния кремния и M_3 состояния кобальта, в то время как пик С образуется вследствие гибридизации M_1 – состояния кремния и M_4 – состояния кобальта. Наиболее сложная тонкая структура наблюдается в спектре нанокристаллов $CoSi_2 + Si$, где обнаруживаются особенности, характерные как для Si, так и для $CoSi_2$.

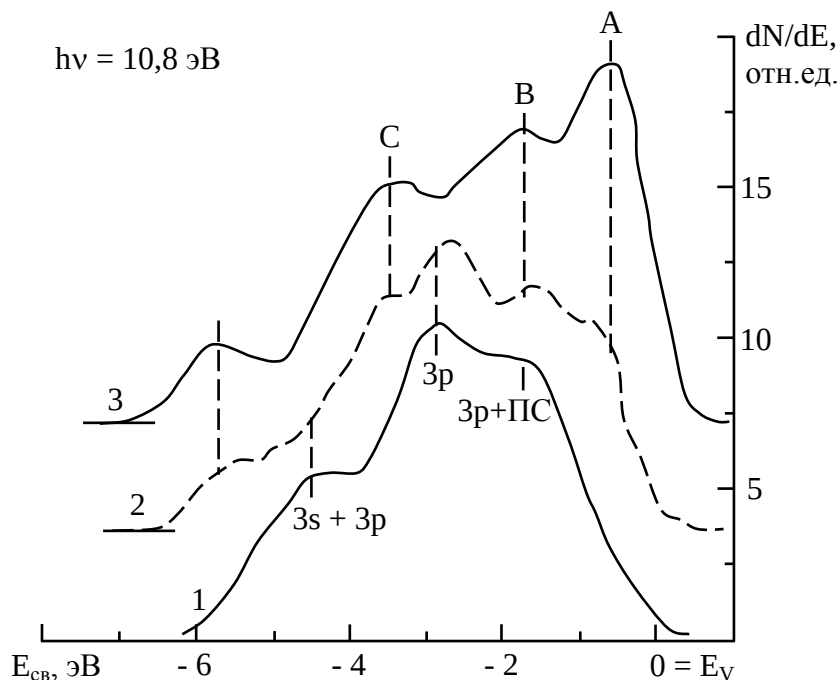


Рис. 2. КЭР фотоэлектронов: 1 – Si (111), n – тип; 2 – Si (111) с нанокристаллами $CoSi_2$ (диаметр НК 200 – 250 Å); 3 – Si (111) с нанопленкой $CoSi_2$ ($\theta \approx 40 - 50$ Å)

По спектрам УФЭС нами определены параметры энергетических зон силицидов и энергетическое распределение электронов в валентной зоне исследуемых материалов. Подобные данные невозможно получить другими методами электронной спектроскопии.

В процессе получения пленок почти все энергетические параметры зон изменяются, что требует использования чистого эталонного материала (металла). При этом уровни Ферми этого металла и пленки находятся на одном уровне. В данной работе в качестве эталонного образца использован чистый поликристаллический палладий.

Значение фотоэлектронной работы выхода Φ определялось по формуле:

$$h\omega = \Phi + \Delta E, \quad (3)$$

где $h\omega$ – энергия фотонов, ΔE – ширина кривой энергетического распределения. Определенные таким образом, значения $\Phi_{Pd} = 5,1$ эВ и $\Phi_{Si} = 4,8$ эВ удовлетворительно совпали с величиной порога фотоэмиссии. Известно [7], что при одинаковых условиях все металлические мишени, независимо от их природы, имеют одинаковую энергию задержки E_3 . Согласно [8] значение E_3 для металла и полупроводника определяется по формуле:

$$E_{3M} = h\nu - \varphi_{\text{кол}}, \quad (4)$$

$$E_{3П} = h\nu - \varphi_{\text{кол}} - \delta_s, \quad (5)$$

где $\varphi_{\text{кол}}$ - работа выхода коллектора. В нашем случае $\varphi_{\text{кол}} = 4,5$ эВ, $\delta_s - E_F - E_V$ для полупроводников р - типа, и $\varphi_{\text{кол}} = 4,5$ эВ, $\delta_s - E_F - E_D$ для полупроводников n - типа, E_F - значение уровня Ферми на поверхности, E_V - уровень, соответствующий верхнему краю (потолку) валентной зоны, E_D - уровень донорных электронной состояний. Сравнивая уравнения (4) и (5) получим, что

$$\delta_s = E_{3M} - E_{3П}. \quad (6)$$

По известной величине работы выхода коллектора $\varphi_{\text{кол}}$, можно определить термоэлектронную работу выхода образцов φ_M :

$$\varphi_M = \varphi_K + eV_{\text{КРП}}, \quad (7)$$

где $V_{\text{КРП}}$ - контактная разность потенциалов между мишенью и коллектором.

Определение величин ширины запрещенной зоны E_g и сродства к электрону требует знания значения положения уровня дна зоны проводимости E_C :

$$E_g = E_C - E_v; \quad \chi = E_B - E_C. \quad (8)$$

здесь E_B - положение уровня вакуума.

В таблице 3 приведены параметры энергетических зон силицидных нанопленок, полученных ионной имплантацией в сочетании с отжигом. Φ – фотоэлектронная работа выхода, энергетический интервал между потолком валентной зоны E_v и уровнем вакуума E_B . $e\varphi$ – термоэлектронная работа выхода, χ – сродство к электрону, δ_s – величина изгиба зоны на поверхности.

Из таблицы 3 видно, что значение Φ , $e\varphi$ и χ силицидных нанопленок значительно меньше чем для Si.

Таблица 3

Значение параметров энергетических зон силицидных нанопленок

Объекты исследования	Φ , эВ	$e\varphi$, эВ	χ , эВ	E_g , эВ	δ_s , эВ
Si	5,1	4,7	4	1,1	0,4
BaSi ₂	3,9	3,9	3,4	0,6	0
NaSi ₂	4,2	4,2	3,5	0,7	0
CoSi ₂	4,9	4,8	4,4	0,5	0
NiSi ₂	4,0	—	3,5	0,5	0

Постоянная решетки NiSi₂, CoSi₂ и Si очень близки друг другу. Поэтому эти силициды имеют особый интерес при создании структур типа ПДП и МДП.

Поверхностный изгиб зон в случае наносилицидов в пределах ошибки УФЭС ($\sim 0,1$ эВ) не обнаруживались.

В четвертой главе приводятся результаты по получению трехкомпонентных нанокристаллов и нанопленок в приповерхностной области GaAs и GaP методом низкоэнергетической ионной имплантации в сочетании с отжигом и изучению их элементного и химического состава, зонной структуры, энергетического распределения электронов в зонах, топографии и кристаллической структуры с использованием комплекса методов ВЭ- и ФЭ- спектроскопии.

Оптимальные режимы получения трехкомпонентных пленок при помощи отжига и параметры их электронной и кристаллической структуры приведены в таблице 4.

Таблица 4

Параметры энергетических зон и кристаллической решетки эпитаксиальных пленок $\text{Ga}_{1-x}\text{Me}_x\text{As}$, полученных после отжига GaAs, имплантированного ионами Me^+ с $E_0 = 1$ кэВ и $D = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$

Оптимальные режимы отжига	Пленка	Постоянная решетки, Å	Параметры энергетических зон, эВ		
			E_g	χ	E_F
$W=1,1 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$ + $T' = 1000 \text{ K}$	$\text{Ga}_{0,6}\text{Ba}_{0,4}\text{As}$	5,8	0,9	3,8	–
$W=1,2 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$ + $T' = 1200 \text{ K}$	$\text{Ga}_{0,4}\text{Na}_{0,6}\text{As}$	5,6	1,9	3,6	4,0
$W=1,2 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$ + $T' = 1000 \text{ K}$	$\text{Ga}_{0,5}\text{Sr}_{0,5}\text{As}$	5,75	1,1	3,7	–
$W=1 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$ + $T' = 850 \text{ K}$	$\text{Ga}_{0,5}\text{Mg}_{0,5}\text{As}$	5,45	0,8	4,0	–
	GaAs (p-тип)	5,65	1,4	3,7	5,0

Все трехкомпонентные соединения кристаллизуются на поверхности GaAs гетероэпитаксиально. В случае пленок, содержащих Ba и Sr, постоянная решетки несколько увеличивается, а в случае Na и Mg – уменьшается. Параметры энергетических зон трехкомпонентных соединений существенно отличаются от параметров зон нелегированного GaAs. Также можно отметить, что трехкомпонентная монокристаллическая пленка $\text{Ga}_{0,6}\text{Ba}_{0,4}\text{As}$ имеет $E_g=0,9$ эВ. В случае имплантации ионов Na^+ и образования пленки $\text{Ga}_{0,4}\text{Na}_{0,6}\text{As}$ ширина запрещенной зоны увеличивается до 1,9 эВ.

Мы методом ионной имплантации в сочетании с отжигом изготовили систему $\text{Ga}_{1-x}\text{Me}_x\text{As}/\text{GaAs}$ с разными x и исследовали их электронную структуру, эмиссионные, оптические и вольтамперные характеристики. Наибольшее значение x в зависимости от типа имплантируемой примеси лежала в пределах 0,4 – 0,6. Таким образом, постимплантационный отжиг ионно-имплантированного GaAs способствует образованию трехкомпонентных эпитаксиальных нанокристаллов (низкие дозы

имплантации) и нанопленок (высокие дозы имплантации). При этом лазерный отжиг в сочетании с импульсным температурным прогревом позволил получить наноструктуры с резкой границей. В случае температурного отжига можно получать пленки с монотонно изменяющимся составом. Установлено, что после прогрева при $T = 900$ К на поверхности ионно-имплантированного GaAs образуется соединения с примерным составом $\text{Ga}_{0,5}\text{Na}_{0,5}\text{As}$. С глубиной концентрация Na монотонно уменьшается и при $d = 100$ Å – $C_{\text{Na}} = 0$. Следовательно, в интервале $d = 0 - 100$ Å наблюдается монотонное уменьшение значения E_g пленки от 1,9 до 1,41 (рис.3).

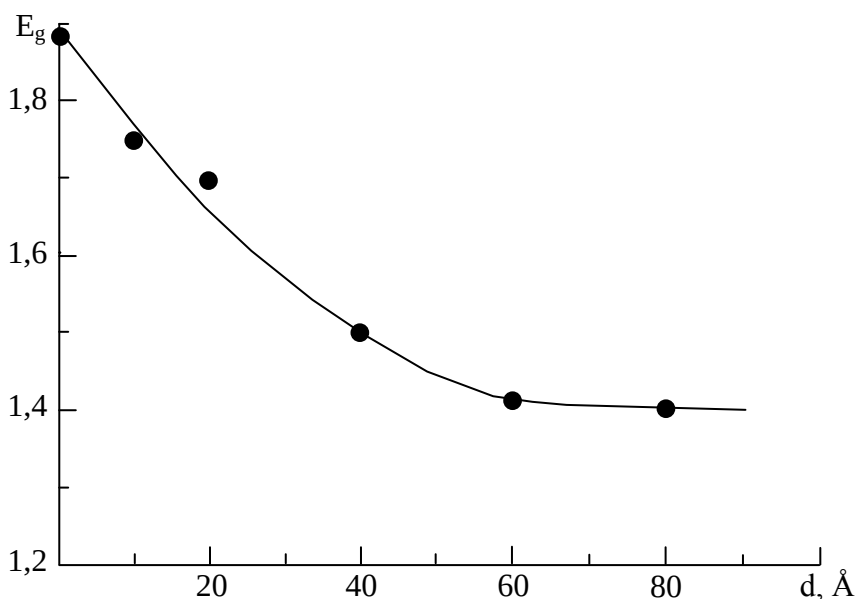


Рис. 3. Зависимость E_g от толщины d для пленки $\text{Ga}_{1-x}\text{Na}_x\text{As}$ с переменным значением x

Полученные результаты очень важны при создании нанопленочных структур для приборов микро- и оптоэлектроники, особенно при получении согласующихся слоев для нанопленочных МДП, ПДП – структур, оптических СВЧ резонаторов и лазеров.

Отметим, что в случае системы $\text{Ga}_{1-x}\text{Me}_x\text{As}/\text{GaAs}$ полученных после лазерного отжига ионно-имплантированного GaAs тонкий согласующийся переходной слой формируется самопроизвольно. При этом толщина переходного слоя составляет всего лишь 30 – 40 Å.

Пятая глава посвящена формированию наноструктурных фаз на поверхности флюоритов при бомбардировке ионами Ag^+ и активных металлов в сочетании с отжигом, а также изучению их состава, структуры и свойств.

На рис. 4 представлена динамика изменения КЭР фотоэлектронов ($h\nu = 21,2$ эВ), в зависимости от дозы ионов для CaF_2 , облученного ионами Ag^+ с $E_0 = 0,5$ кэВ. За начало отсчета принять верхний край валентной зоны чистой пленки CaF_2 . В ФЭС валентных электронов необлученной пленки CaF_2 обнаруживаются пики при энергиях связи $E_{\text{св}} = -3,5$ и $-6,5$ эВ, обусловленные переходом электронов в вакуум из 2р состояний фтора. В начальной части спектра (высокоэнергетической части), соответствующей области

запрещенной зоны, обнаруживаются слабые пики с энергиями $\sim 2,5$ и $\sim 6,5$ эВ, по-видимому, обусловленных переходами электронов из примесных уровней. Ионная бомбардировка приводит к заметному изменению спектра фотоэлектронов. С ростом дозы ионов происходят постепенное уширение (до 4 эВ) и повышение площади под кривой энергетического распределения (увеличение квантового выхода фотоэлектронов), смещение начала спектра (высокоэнергетический край) в сторону больших энергий, уменьшение интенсивности основного пика валентной зоны матрицы и появление новых пиков.

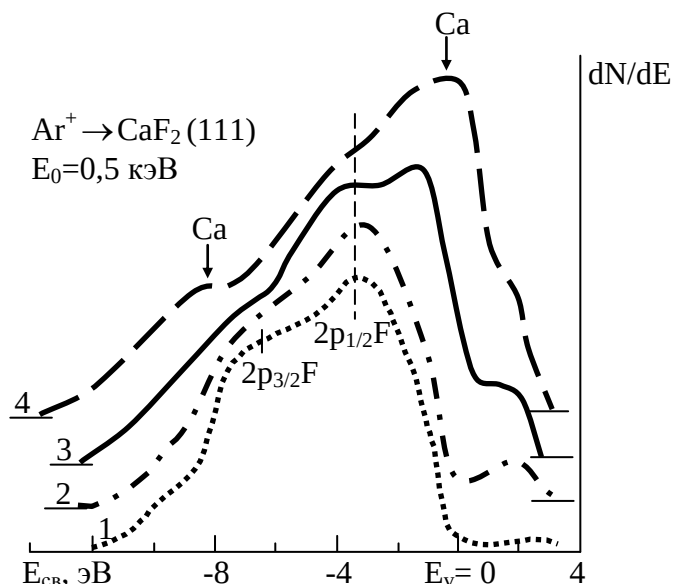


Рис. 4. УФЭС CaF_2 , облученного ионами Ar^+ с $E_0=0,5$ кэВ при дозах D , см^2 : 1 – 0; 2 – $8 \cdot 10^{14}$; 3 – $6 \cdot 10^{15}$; 4 – $8 \cdot 10^{16}$

Как уже показано выше, все эти изменения связаны с изменением стехиометрического состава и разупорядочением ионно-легированных слоев пленки CaF_2 . Уменьшение интенсивности основных пиков на КЭР валентных электронов и появление новых пиков обусловлено частичным разложением CaF_2 и обогащением поверхности атомами Ca. Отметим, что в процессе ионной бомбардировки наблюдается заметное увеличение интенсивности пика с $E_{\text{св}}$ энергией $-2,5$ эВ (относительно уровня E_v), связанного с возбуждением электронов из глубины уровней дырочного типа. При больших дозах ионов начало спектра фотоэлектронов смещается примерно до этого уровня (следовательно, спектр уширяется $\sim$ на 2,5 эВ). Поэтому можно полагать, появление данного пика обусловлено как наличием несвязанных атомов Ca, так и разупорядочением приповерхностного слоя. Обогащение поверхности атомами Ca приводит к уменьшению работы выхода поверхности до 1,5 – 2 эВ. Это приводит к уширению низкоэнергетического края (конечная часть спектра валентных электронов) КЭР фотоэлектронов. В начальной части спектра ионно-имплантированного CaF_2 появляются новые пики, характерные для примесных уровней.

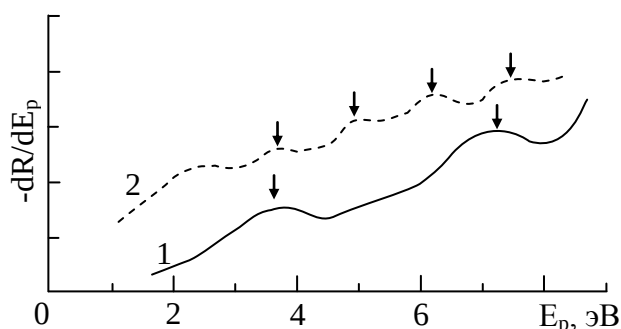
Таким образом, при бомбардировке ионами Ar^+ происходит разложение CaF_2 и фтор (в виде F_2) покидает поверхность и приповерхностную область кристалла, оставляя анионные вакансии. Эти

вакансии объединяются в кластеры, образуя области, обогащенные Са. Варьируя энергию и дозу ионов, можно контролируемо изменять толщину и поверхностные размеры этих фаз вплоть до образования сплошной тонкой нанопленки с толщиной $\theta = 20 - 50 \text{ \AA}$, обогащенной атомами Са. Такие нанофазы и нанопленки очень перспективны в создании приборов нано- и оптоэлектроники. Однако возможность практического использования тесно связана со строгой кристаллизацией этих структур с сохранением избыточных атомов Са. При прогреве пленок CaF_2 , облученных ионами низких доз до $T = 700 - 800 \text{ K}$, нанокластерные участки упорядочиваются, образуя сверхрешетку (СР или Sl) кластеров анионных вакансий в приповерхностной области кристалла $\text{CaF}_2 \rightarrow \text{CaF}_2\text{:СР}$. В случае CaF_2 , облученного с $D = 10^{15} \text{ см}^{-2}$, формировались нанокристаллические фазы с линейными размерами $\ell = 40 - 50 \text{ нм}$ и толщиной $\sim 50 \text{ \AA}$. Расстояние между центрами фаз составляло $\sim 100 \text{ нм}$. Кристаллизация пленок, облученных с высокой дозой ($D \geq 10^{16} \text{ см}^{-2}$), происходило при $T = 800 - 900 \text{ K}$. Толщина НП составляла $40 - 50 \text{ \AA}$. При этом между CaF_2 и Са формируется переходной слой (слой CaF_2 обогащенный Са) с толщиной $60 - 80 \text{ \AA}$. Отметим, что после прогрева как на поверхности НК, так и НП образовался тонкий слой «чистого» Са с толщиной $5 - 6 \text{ \AA}$ ($2 - 3$ монослоя). Возможность образования упорядоченной системы нанокристаллов при невысоких температурах отжига обусловлена среди прочего тем, что Са имеет структуру ГЦК – решетки, близкую решетке CaF_2 и рассогласование постоянных решеток Са и CaF_2 порядка 2%. Пленка CaF_2 с металлическими нанокристаллами и нанопленками обладает уникальными свойствами. При этом очень важную роль играет регулярность расположения атомов Са.

Следующим этапом наших исследований было изучение состава и структуры трехкомпонентных нанокристаллов и нанопленок, созданных низкоэнергетической имплантацией ионов активных элементов (Ba^+ , Na^+ , Sr^+) в сочетании с отжигом. На основе полученных нами данных в частности установлено: в случае имплантации ионов Ba^+ с $E_0 = 0,5 \text{ кэВ}$ при $D = 10^{14} \text{ см}^{-2}$ на поверхности CaF_2 формируются нанокластеры с линейными размерами $\sim 5 - 10 \text{ нм}$, при $D = 10^{15} \text{ см}^{-2}$ образуются островки с размерами $100 - 200 \text{ нм}$, а при $D \geq 10^{16} \text{ см}^{-2}$ происходит перекрывание границ отдельных кластеров. При больших дозах поверхность обогащается атомами Ва (до 55–60 ат.%) и Са (25–30 ат.%), а концентрация фтора резко уменьшается (до 15–20 ат.%); постимплантационный отжиг при $T = 1000 \text{ K}$ приводит к формированию трехкомпонентной пленки типа $\text{Ca}_{0,4}\text{Ba}_{0,6}\text{F}_2$. Ширина запрещенной зоны трехкомпонентной пленки составляет $\sim 10,8 \text{ эВ}$.

На рис. 5. приведены спектры УОЭ ($-dR/dE_p(E_p)$), для CaF_2 и $\text{Ca}_{0,4}\text{Ba}_{0,6}\text{F}_2$ снятых в области $E_p = 1 - 10 \text{ эВ}$, который в основном охватывает запрещенную зону исследуемых пленок. Как видно из этого рисунка, на обоих спектрах имеется ряд особенностей. Эти особенности в основном обусловлены поглощением энергии фотонов на дефектах кристалла. В случае чистой пленки CaF_2 содержится максимум при энергиях 3,5 эВ и 7,5 эВ относительно уровня вакуума. Как уже показано выше, максимум при 7,5 эВ

может быть обусловлен наличием в узлах решетки некоторого количества Са, не связанного с фтором.



**Рис. 5. Низкоэнергетическая часть спектра УОЭ для 1–CaF₂,
2–Ca_{0,4}Ba_{0,6}F₂**

Природа второго пика нами не установлена, по-видимому, его возникновение связано с наличием поверхностных состояний. В спектре Ca_{0,4}Ba_{0,6}F₂ содержатся 4 полосы поглощения (т.е. максимумы) при 3,7 эВ, 5 эВ, 6,5 эВ и 7,8 эВ. Максимумы при 7,8 и 3,7 эВ относятся к CaF₂ и их интенсивность резко уменьшается. Другие максимумы, вероятно, обусловлены дефектами замещения, т.е. замещение части атомов Са барием. Отметим, что на спектре УОЭ BaF₂ содержится пик при E = 6,5 эВ.

На основе анализа спектров фото- и упругоотраженных медленных электронов нами определены параметры энергетических зон двух и трехкомпонентных структур (табл. 5).

Таблица 5

**Параметры энергетических зон и кристаллической решетки
трехкомпонентных диэлектрических пленок, созданных на основе
флюоритов**

Пленка	ϕ , эВ	φ , эВ	E_g , эВ	χ , эВ	a , Å	ρ , Ом·см
CaF ₂	13,0	4,2	12,1	0,5	5,46	$2 \cdot 10^{14}$
Ca _{0,4} Ba _{0,6} F ₂	11,8	4	10,8	1	5,70	$4 \cdot 10^{13}$
Ca _{0,5} Na _{0,5} F ₂	12,6	—	11,6	1	6,10	$6 \cdot 10^{13}$
Ca _{0,5} Sr _{0,5} F ₂	12,1	—	11,1	1	5,65	—
BaF ₂	11,2	4,5	10,2	1	6,20	$5 \cdot 10^{13}$
Ba _{0,6} Sr _{0,4} F ₂	11,3	—	10,3	1	6,00	$6 \cdot 10^{13}$
SrF ₂	11,8	4,3	10,8	1	5,75	$8 \cdot 10^{13}$
Sr _{0,5} Na _{0,5} F ₂	11	—	10	1	—	—

Из таблицы видно, что все трехкомпонентные соединения обладают широкой запрещенной зоной. Регулируя значение x в соединении Ca_{1-x}Me_xF₂ и подбирая соответственно Me, можно в определенных пределах регулировать значениями E_g и ρ .

Шестая глава посвящена разработке модели формирования нанокристаллов и нанопленок на поверхности Si при низкоэнергетической ионной имплантации и последующем отжиге; оценке критических размеров

нанопленок и нанокристаллов, при которых начинают проявляться квантово-размерные эффекты по изменению параметров кристаллической решетки и энергетических зон.

Модель поверхности Si с нанокристаллами BaSi₂ сформированную постимплантационным отжигом (лазерный + температурный) Si, имплантированного ионами Ba⁺ с E₀ = 1 кэВ при дозе 2·10¹⁵ см⁻² можно построить на основе анализа картин РЭМ. Как видно из рис. 6, а, нанокристаллические фазы состоят из трех частей.

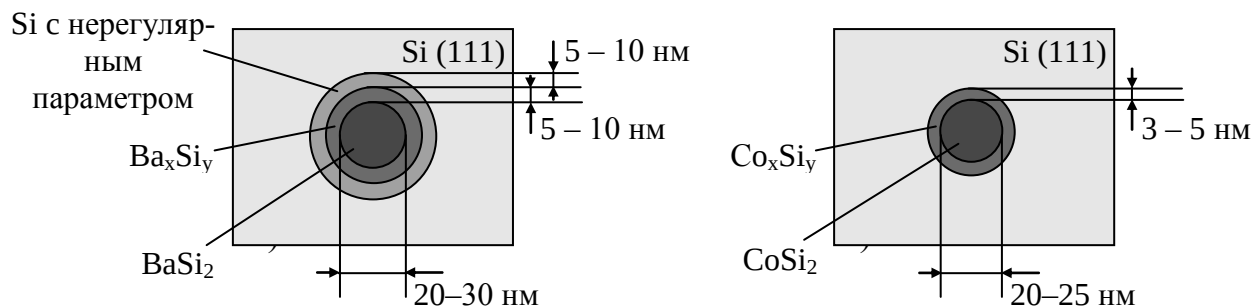


Рис. 6. Модель поверхности Si с нанокристаллом BaSi₂ (а) и CoSi₂ (б)

В центре с $d = 20 - 30$ нм формируются монокристаллы BaSi₂ имеющие кубическую решетку, кристаллическая ориентация которой совпадает с ориентацией подложки. Так как постоянная решетки BaSi₂ ($a = 6,54 \text{ \AA}$) резко отличается от постоянной решетки Si ($a = 5,43 \text{ \AA}$) на границе раздела BaSi₂/Si возникает деформация несоответствия. Вследствие чего вокруг этой фазы формируются две кольцевидные области. Ширина первого кольца (примыкающего к BaSi₂) составляет $\sim 5 - 10$ нм. В этой области концентрация Ba резко уменьшается от ~ 30 ат.% до $1 - 2$ ат.%. Следующие кольцо с шириной $5 - 10$ нм состоит из монокристаллов Si с нерегулярным параметром решетки. В случае CoSi₂ и NiSi₂ ширина первого кольца сужается до $3 - 5$ нм, а последняя область (второе кольцо) практически отсутствует (рис. 6, б).

Анализ РЭМ и ДБЭ картин позволяют полагать, что нанокристаллы силицидов металлов (BaSi₂, CoSi₂, NiSi₂, NaSi₂) и их пленки кристаллизуются в кубическую решетку. При этом нанокристаллы имеют форму цилиндра (поверхность окружность). Хорошо сформированные нанокристаллы появляются начиная с дозы ионов $D = (3 - 5) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Размеры кластерных фаз CoSi₂ и их температура полной кристаллизации T_k зависит от энергии и дозы ионов Co⁺. Результаты экспериментов показали, что независимо от энергии ионов в области $D = 10^{14} - 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ зависимость $T_k(D)$ имеет линейный характер. Затем с ростом дозы, значение T_k экспоненциально растет и начиная с $D = (2 - 5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ практически не меняется (рис. 7). При высоких энергиях ионов кристаллизация происходит при высоких температурах. Во всех случаях при полной кристаллизации поверхностные размеры ионно-легированных участков заметно (до $1,2 - 1,5$ раза) уменьшаются.

Отметим, что при этой дозе ($E_0 = \text{const}$) все нанокристаллы равномерно располагаются по поверхности и имеют почти одинаковые размеры. Можно полагать, что CoSi_2 и Si имели одинаковую кристаллическую решетку, а их постоянные решетки мало отличаются друг от друга.

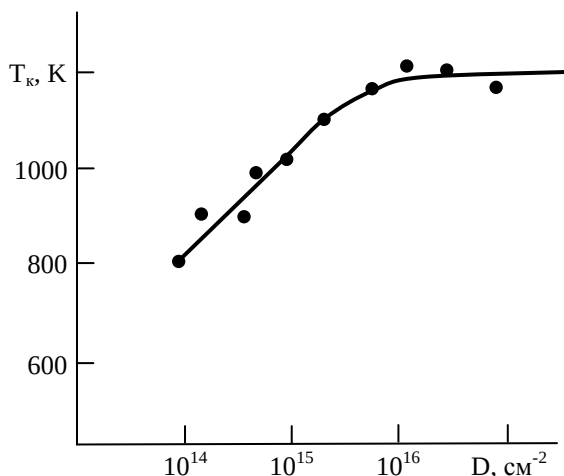


Рис. 7. Зависимость T_k от D для Si, имплантированного ионами Co^+ с $E_0 = 1 \text{ кэВ}$

Используя формулу Г.Пула, нами сделана оценка количества атомов (структурные магические числа) в нанокристалле N_v и на его поверхности N_s [9, 10]:

$$N_v = \frac{1}{3} [10n^3 - 15n^2 + 11n - 3], \quad (9)$$

$$N_s = 10n^2 - 20n + 12, \quad (10)$$

Здесь n – количество слоев наращенных на элементарной ячейке. Расчеты показали, что $N_v = 78000 - 80000$ и $N_s = 8000$. Из этого очень грубого расчета видно, что количество атомов на поверхности составляет $\sim 10\%$ от общего количества атомов в нанокристалле. Это в свою очередь должно привести к существенному изменению электронной структуры CoSi_2 .

Следует отметить, что эти изменения не очень ярко выражаются на спектрах УФЭС так как особенности характерные для нанокристаллов CoSi_2 остаются на фоне особенностей, обусловленных эмиссией электронов из Si (с не облученных участков Si). Пока еще не существует методов которые позволили бы явно получить информацию об электронной структуре отдельных нанокристаллических фаз созданных на поверхности твердых тел. Однако проводя комплексные исследования в одинаковых условиях с использованием методов УФЭС, СУРЭ, ОЭС и СХПЭЭ высокого разрешения можно получить ценную информацию не только о элементном и химическом составе, но и об электронно-зонной структуре, а также об энергии плазменных колебаний нанокластерных и нанокристаллических фаз состоящих всего лишь из несколько тысячи атомов.

В частности, используя зависимости σ , R и δ от E_p в области малых энергий ($E_p = 1 - 15 \text{ эВ}$) можно оценить значения параметров энергетических зон наноматериалов. Найдена связь структуры, хода зависимостей $\sigma(E_p)$,

$R(E_p)$, $\delta(E_p)$ и соотношением величин коэффициентов с зонным строением диэлектриков и полупроводников. На рис. 8 приведена начальная часть зависимости $\delta(E_p)$ для толстой ($\theta = 500 \text{ \AA}$), тонкой ($\theta = 50 \text{ \AA}$) пленки CoSi_2 , а также для нанокристалла CoSi_2 с поверхностными размерами $d = 25 \text{ нм}$. Из рис. 8 видно, что для толстой пленки CoSi_2 значения $E_v = 4,7 \text{ эВ}$, для тонкой пленки $\sim 5 \text{ эВ}$, что хорошо согласуется с данными УФЭС. В случае $\text{Si} + \text{НК CoSi}_2$ $E_{v_1} = 5,1 \text{ эВ}$ и $E_{v_2} = 5,4 \text{ эВ}$.

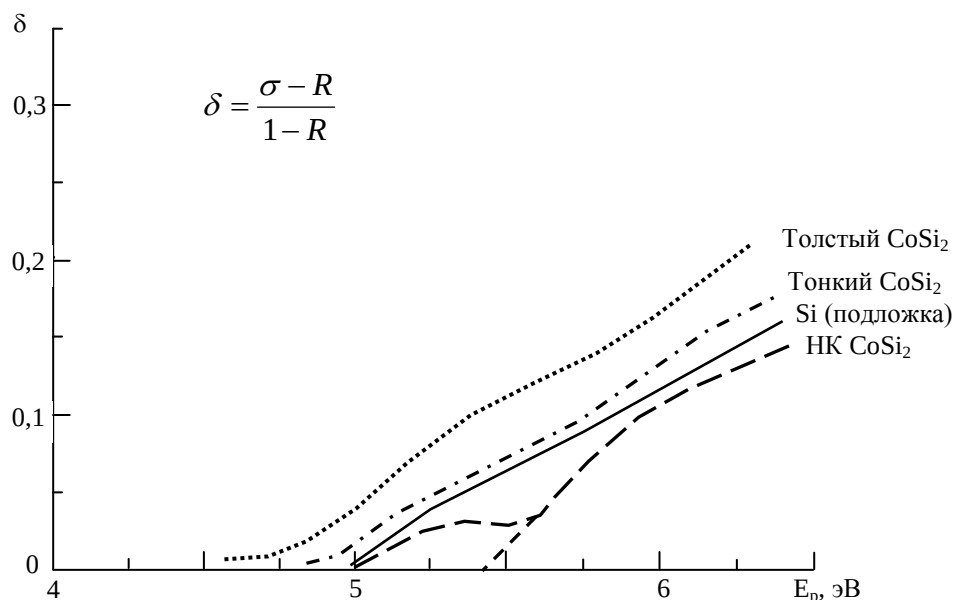


Рис. 8. Начальная часть зависимости $\delta(E_p)$ для Si с нанокристаллами и нанопленками CoSi_2

По-видимому, при $E_{v_1} = 5,1 \text{ эВ}$ истинно-вторичные электроны начинают эмитироваться с участков кремния и с $E_{v_2} = 5,4 \text{ эВ}$ к ним прибавляются электроны эмитируемые с нанокристаллов CoSi_2 . Этим и объясняется заметный рост δ начиная с $E_{v_2} = 5,4 \text{ эВ}$.

Как с научной, так и с практической точки зрения очень важно определить (оценить) размеры квантовых точек и барьеров, при которых наблюдается туннелирование электронов. В случае системы типа $\text{Si} + \text{НК MeSi}_2$ туннелирование электронов приводит к резкому снижению удельного сопротивления поверхности этой системы.

Для измерения изменения удельного сопротивления ρ кремния, при ионной имплантации и отжиге использована схема, представленная на рис. 9.

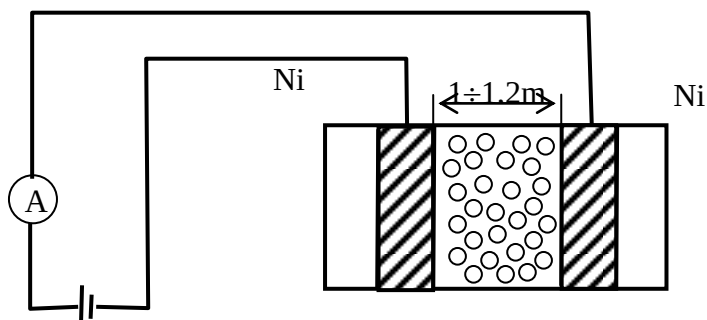


Рис. 9. Блок схема измерений удельного сопротивления ионно – имплантированного кремния

Измерения ρ проводились в вакуумной установке, где производилась ионная имплантация. Диаметр ионного пучка составлял до 1,5 – 2 мм. На исследуемом образце Si предварительно создавались контактные полосы, путем напыления атомов Ni. Расстояние между полосами составляло $\sim 1 - 1,2$ мм. Ионы металлов (Co, Ba, Na) имплантировались на участки расположенные между полосами никеля. Эта схема использована и при измерении ρ ионно-имплантированных пленок GaAs, CaF₂, SiO₂ и MgO. Отметим, что при этом значение ρ даёт очень грубые приближенные значения, особенно при не высоких дозах облучения. Однако оно очень ценно для оценки влияния ионной имплантации на удельное сопротивление материалов и получения предварительных данных о размерах нанокластерных фаз, когда начинается туннелирование электронов.

Имплантация проводилась ионами Ba⁺ с $E_0 = 1$ кэВ разными дозами. После имплантации ионов при фиксированных дозах проводился импульсный лазерный отжиг с $W = 1,6 - 2,0$ Дж·см⁻², что обеспечивало формирование нанокристаллов BaSi₂. Значение ρ для нелегированного Si составляло ~ 10 Ом·см. Формирование отдельных кластерных фаз начиналось с $D = (2 - 4) \cdot 10^{14}$ см⁻². До дозы $D = (6 - 8) \cdot 10^{14}$ см⁻² не наблюдалось заметного изменения значения ρ (показания амперметра). Начиная с $D = 2 \cdot 10^{15}$ см⁻² наблюдалось заметное увеличение тока. Это увеличение грубо можно оценить как начало туннельного перехода электронов. При этом средний диаметр кластерных фаз BaSi₂ (квантовых ям) лежал в пределах 200 – 250 Å, а расстояние между краями кластеров, т.е. размеры кремниевых фаз составляли 250 – 300 Å (квантовые барьеры). С дальнейшим ростом дозы хотя размеры кластерных фаз заметно не увеличиваются, однако между ними появляются новые кластерные фазы, что приводит к резкому уменьшению ρ . При $D \geq 2 \cdot 10^{16}$ см⁻² происходит перекрывание границ кластерных фаз и поверхность полностью покрывается силицидом Ba и ρ достигает своего наименьшего значения (табл. 6).

Таблица 6
Значение ρ для поверхности Si с нанокластерными фазами силицидов бария

№	$E_0 = 1$ кэВ	Лазерный отжиг W , Дж·см ⁻²	средний диаметр нанокристаллов BaSi ₂ , нм	расстояние между краями нанокристаллов, нм	S	ρ , Ом·см
1.	$D = 0$ см ⁻²	—	—	—	S_0	10
2.	$D = 8 \cdot 10^{14}$ см ⁻²	1,6	10 – 15	30 – 35	$S_0/10$	5 – 6
3.	$D = 2 \cdot 10^{15}$ см ⁻²	1,8	20 – 25	25 – 30	$S_0/3$	10^{-1}
4.	$D = 8 \cdot 10^{15}$ см ⁻²	2,0	30 – 40	10 – 15	$2S_0/3$	$8 \cdot 10^{-4}$
5.	$D = 6 \cdot 10^{16}$ см ⁻²	2,0	сплошной ион-	0	S_0	$2 \cdot 10^{-5}$

			НО-ИМПЛАНТИ- РОВАННЫЙ СЛОЙ			
--	--	--	-------------------------------	--	--	--

$S_0 = 1 \text{ мм}^2$, общая площадь ионно-имплантированного слоя. S – общая площадь кластерных фаз.

Таким образом можно полагать, что квантовый характер системы кремний+НК силицида начинает проявляться когда размеры нанокристаллов и расстояние между их краями составляют 20 – 30 нм. Это в определенной степени согласуется с теоретическими расчетами.

Известно, что критерием перехода к размерному квантованию служить уменьшение толщины слоя до величины порядка длины волны де-Бройля λ электрона. Длину волны можно определить из формулы для квазиимпульса:

$$p = m\nu = \frac{h}{\lambda} = \frac{2\pi\hbar}{\lambda} \text{ откуда } \lambda = \frac{h}{m\nu} = \sqrt{\frac{15,4}{(m^*/m_0)E_{\text{кин}}}} \quad [\text{нм}] \quad (11)$$

где m^* - эффективная масса электрона в твердом теле, m_0 – масса электрона в вакууме, $E_{\text{кин}}$ – кинетическая энергия электрона, в эВ.

Если учесть в [11], что для полупроводников $m^*/m_0 = 0,1$ и $E_{\text{кин}}$ при комнатной температуре 0,025 эВ, то получим $\lambda_{300} \approx 25 \text{ нм} \approx 250 \text{ \AA}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые показана возможность получения методом низкоэнергетической ионной имплантации ($E_0 = 0,5 - 5 \text{ кэВ}$) регулярных нанокластерных фаз и сплошных пленок типа $\text{MeSi}_2 - \text{Si}$, $\text{Ga} - \text{GaAs}$, $\text{Ga}_{1-x}\text{Me}_x\text{As} - \text{GaAs}$, $\text{Ga}_{1-x}\text{Me}_x\text{P} - \text{GaP}$, $\text{Ca} - \text{CaF}_2 - \text{Si}$, $\text{Ca}_{1-x}\text{Me}_x\text{F}_2 - \text{CaF}_2 - \text{Si}$ в приповерхностной области Si , GaAs , GaP и CaF_2 . Установлено, что в отличие от других методов создания ультратонких пленок, низкоэнергетическая ионная имплантация позволяет получить однородные нанокристаллы и нанопленки с толщиной $\leq 5 \text{ нм}$.

Выявлены основные механизмы формирования нанокристаллических фаз и нанопленок в процессе ионной бомбардировки и последующего отжига.

2. Исследованы элементный и химический состав, кристаллическая и электронная структура, геометрические размеры отдельной кластерной фазы и нанопленок и динамика изменения их при отжиге. Кластерные фазы и пленки были аморфными, имели нестехиометрический состав по поверхности и по глубине. Установлено, что характер формирования нанокристаллических фаз и эпитаксиальных нанопленок зависит от вида отжига: при лазерном отжиге образуются эпитаксиальные однородные по глубине нанокристаллы и нанопленки, а при температурном отжиге – содержание легирующего элемента в многокомпонентной пленке с глубиной монотонно уменьшается. Выяснены основные причины наблюдаемых изменений при отжиге.

3. Установлены режимы ионной имплантации и отжига формирования гетероструктурных нанокристаллов и нанопленок MeSi_2/Si ($\text{Me} - \text{Ba}, \text{Na}, \text{Co}$). В частности, нанокристаллы CoSi_2/Si (100) с диаметром 15 – 20 нм и толщиной 4 – 5 нм образовались после прогрева Si, имплантированного ионами Co с $E_0 = 1$ кэВ и дозе $D = 10^{15} \text{ см}^{-2}$ при $T = 1000 \text{ К}$ в течении 25 – 30 мин.

4. Установлено, что при бомбардировке ионами Ar^+ в приповерхностной области GaAs при низких дозах ($D \leq 10^{15} \text{ см}^{-2}$) образуются нанокластерные фазы обогащенные атомами As, а при высоких дозах ($D \geq 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) – нанопленки обогащенные атомами Ga. В последнем случае формируется система Ga/GaAs.

5. Впервые показано, что низкоэнергетическая имплантация ионов активных металлов ($\text{Ba}^+, \text{Na}^+, \text{Sr}^+, \text{Mg}^+$) в монокристаллические пленки GaAs и GaP в сочетании с отжигом позволяет получать нанокристаллы и нанопленки типа Ga – Me – As и Ga – Me – P. Изучены механизмы образования этих наноструктур.

Разработана методика позволяющая получить на основе GaAs нанопленки с монотонно изменяющейся (уменьшение или увеличение) шириной запрещенной зоны. Определена зависимость ширины запрещенной зоны от концентрации внедренной примеси и от толщины пленки.

6. Впервые детально изучены процессы формирования наноразмерных структур в поверхностных слоях CaF_2 и BaF_2 эпитаксиально выращенных на Si (100) при бомбардировке низкоэнергетическими ионами $\text{Ar}^+, \text{Ba}^+, \text{Na}^+$ и Sr^+ в сочетании с отжигом. Облучение ионами Ar^+ приводило к ионно-стимулированной десорбции фтора с поверхности CaF_2 и обогащению ее кальцием. После прогрева при $T = 800 \text{ К}$ в зависимости от дозы облучения формировалась либо нанокристаллическая фаза Ca с диаметром 40 – 50 нм и толщиной 5 – 6 нм образуя сверхрешетку с шагом 90 – 100 нм, либо – эпитаксиальная нанопленка Ca с толщиной 5 – 10 нм.

Бомбардировка ионами активных металлов приводило к резкому сужению запрещенной зоны флюоритов и появлению в зоне различных примесных уровней, часть которых сохранялась и после упорядочения структуры. Определены оптимальные режимы ионной имплантации и отжига для получения регулярно расположенных нанокристаллических фаз и однородных нанопленок типа Ca – Me – F_2 . Выявлены основные причины изменения электронных свойств флюоритов при имплантации активных металлов и последующем отжиге. Выяснены основные механизмы формирования трехкомпонентных диэлектрических нанокристаллов и нанопленок.

7. Впервые оценены параметры энергетических зон и кристаллической решетки силицидных нанопленок разной толщины. Установлено, что нанокристаллы и нанопленки силицидов Ba, Co и Na кристаллизуются в кубическую решетку. Обнаружено, что при $\theta \leq 5 - 6 \text{ нм}$ с уменьшением толщины пленки увеличивается ширина запрещенной зоны и значение постоянной решетки “a”.

8. Определены параметры кристаллических решеток и энергетических зон наноструктур и построена качественная энергетическая диаграмма нанокристаллов с поверхностной структурой $\text{MeSi}_2 - \text{Si}$, $\text{Ga}_x\text{Me}_y\text{As} - \text{GaAs}$, $\text{Ca}_{0,6}\text{Ba}_{0,4}\text{F}_2 - \text{CaF}_2$ и многослойных наносистем MeSi_2/Si $\text{GaMeAs}/\text{GaAs}$, $\text{Ca} - \text{CaF}_2 - \text{Si}$. В частности показано, что в случае CoSi_2/Si ширина запрещенной зоны E_g нанокристаллов на 1,2 – 1,5 раза больше, чем E_g нанопленки. Даны научно – обоснованные рекомендации по применению полученных наноструктур.

9. Разработана методика оценки состава, структуры и свойств отдельных нанокристаллов основанная на сравнительном анализе спектров оже-, фото- и характеристических потерь энергии электронов, полученных для подложки, нанопленки и нанокристалла.

10. Разработана методика оценки критических размеров нанокристаллов при которых происходит туннелирование электронов, основанная на измерении изменения удельного сопротивления. Обнаружено явление перкаляции состоящая в том, что при увеличении размера кластеров возникает сквозная электронная проводимость, при чем элементарный перескок электронов из одного кластера в другой соседний осуществляется туннельным путем. Впервые оценены размеры нанокристаллов силицидов при которых начинает происходить туннелирование электронов. В случае Si с нанокристаллами BaSi_2 средний размер нанокристаллических фаз BaSi_2 (квантовые ямы) составляет 20 – 25 нм, а расстояние между ними 20 – 25 нм (квантовые барьеры).

Оценены критические размеры нанопленок и нанокристаллов, при которых начинает формироваться электронно-зонная структура, характерная для массивных материалов.

11. Разработана модель поверхности Si с нанокристаллами силицида и модель расположения атомов на поверхности силицидной нанопленки. Показано, что силицидные нанокристаллы имеют форму окружности, между фазами силицида и кремния формируются три кольцевидные области: в центре силицид типа MeSi_2 ($d = 20 - 30$ нм), нестехиометрический силицид (ширина 5 – 10 нм) и Si с нерегулярным параметром решетки (ширина от 2 до 10 нм).

Изучена температурная зависимость полной кристаллизации T_k нанокластерных фаз от дозы облучения (от размеров нанокластерных фаз). В области доз от 10^{14} до $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ эта зависимость имеет линейный характер, в интервале доз $D = 5 \cdot 10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-2}$ – экспоненциальный характер, а при $D > 10^{16} \text{ см}^{-2}$ значение T_k не зависит от дозы ионов.

12. Все обнаруженные наноразмерные эффекты в нанобъектах подаются следующей классификации: электронные и молекулярно – кинетические.

При этих эффектах возникают изменения, связанные с тремя базовыми свойствами нанобъектов отличающих их от объемных материалов:

- а) квантовый конфайнмент;
- б) макроскопическое количество поверхностных (Таммовских) состояний;

в) существенная неравновесность (сжатость или растянутость) кластера находящегося внутри матрицы.

В рамках квантового конфайнмента (пункт а) обнаружены следующие эффекты:

- увеличение щели между низшей свободной орбиталью и высшей занятой орбиталью, при этом зависимость характера увеличения щели при уменьшении размера кластера соответствует закону $1/R^2$ рассчитанному Эфросами [12];

- при уменьшении толщины пленки явно было обнаружено уменьшение кванта плазмона от величины характерного для объемного материала до величины соответствующей чисто поверхностному плазмону;

- расщепление зон до уровней в электронной структуре нанобъектов.

В рамках макроскопического количества поверхностных состояний (пункт б) некоторые из обнаруженных в кластеризованном материале состояний обладают характерными свойствами, заключающимися в том, что отношение интенсивность сигнала от поверхностных состояний к интенсивности сигнала от объемных состояний кластера нарастает при уменьшении размера кластера. Это отражает увеличивающуюся роль поверхностных состояний с уменьшением размера кластера.

В результате существенной неравновесности кластера находящегося внутри матрицы (пункт в) проявился эффект влияния размера нанокластера на температуру кристаллизации в нанокристаллах типа MeSi_2 : с уменьшением размера кластера уменьшается температура кристаллизации.

13. Даны научно-обоснованные рекомендации по применению полученных в работе экспериментальных результатов. В частности полученные результаты перспективны как при создании многослойных полупроводник – диэлектрик – полупроводник и металл – диэлектрик – полупроводник наноструктур, так и при разработке оптоэлектронных систем с переменной шириной запрещенной зоны.

Список использованной литературы

1. Гамов Г.А. Строение атомного ядра и радиоактивность. – Москва-Ленинград: Гостехтеорфизгиздат, 1932. - 80 с.

2. Pat. US 43433993. Scanning tunneling microscope / Binning G., Rorer H. // – 1982. – Aug. 4.

3. Binning G., Quate G.F., Gerber Ch. Atomic force microscopy // J. Phys. Rev. Lett. – New York, 1986. – V. 56. – P. 930.

4. Drexler E.K. Engines of creation. – New York: Anchor Books Doubleday, 1986. - p. 299.

5. Алтухов А.А., Жирнов В.В. Анализ морфологии и стехиометрии пленок CoSi_2/Si (100), полученных методами ТФЭ и РЭ // Тонкие пленки в электронике: Материалы II-го Всесоюзного межотраслевого совещания. – Москва-Ижевск, 1991. – С. 15-22.

6. Умирзаков Б.Е. Исследование профилей распределения атомов

контактирующего материала по глубине чистого и ионно-легированного кремния // Поверхность. – Москва, 1992. – № 9. – С. 119-123.

7. Арсеньева-Гейль А.Н. Внешний фотоэффект с полупроводников и диэлектриков. – М.: Техн. -теор. лит., 1957. – 224 с.

8. Davis L.E., MacDonald N.C., Palmberg P.W., et al. Handbook of Auger electron spectroscopy. – Eden Prairie: Physical Electronic Industries, 1976. – 252 p.

9. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии / Пер. с англ. под. ред. Ю.И.Головина. – М.: Техносфера, 2004. – 376 с.

10. Poole C.P.Jr., Farach H.A. Chemical bonding. //Semiconductor physics. Vol. 1, ed. by K.Boer, Wiley, New York, 2001, Chapter 2.

11. Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А. Основы нанoeлектроники. Учебное пособие. – М.: Университетская книга; Логос; Физматкнига, 2006. – 496 с.

12. Эфрос Ал.Л., Эфрос А.Л. Межзонное поглощение света в полупроводниковом шаре // Физика и техника полупроводников. – Санкт-Петербург, 1982. – № 7. – V. 16. – С. 1209-1214.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии

1. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А. Электронная спектроскопия нанопленок и наноструктур, созданных ионной имплантацией. – Ташкент: ТашГТУ, 2004. – 147 с.
2. Умирзаков Б.Е., Нормурадов М.Т., Ташмухамедова Д.А., Ташатов А.К. Наноматериалы и перспективы их применения. – Ташкент: MERIYUS, 2008. – 256 с.

Статьи в периодических научных журналах

3. Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A. The influence of annealing on composition and structure of GaAs implanted by low-energy Ba ions // Surface Investigation. – London, 2001. – V. 16. – P. 731-736.
4. Ташмухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е., Ташатов А.К. Создание многокомпонентных эпитаксиальных пленок на поверхности GaAs методом ионной имплантации и отжига // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – Москва, 2002. – №4. – С. 80-84.
5. Normuradov M.T., Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A., Tashatov A.K. Influence of ion implantation and annealing on composition and structure of GaAs surface // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. – Kiev, 2002. – V. 5. – № 2. – P. 138-141.
6. Tashmukhamedova D.A., Umirzakov B.E. Modification of the physical and chemical properties of GaAs/Ge surface epitaxy films by ion implantation // Surface and Coatings Technology. – Holland, 2002. – № 158–159. – P. 704-707.
7. Ташмухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е., Ташатов А.К., Рисбаев А.С., Нормурадов М.Т. Ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия поверхности GaAs, легированного ионами бария // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – Москва, 2002. – № 12. – С. 90-93.
8. Ташмухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е., Балтаев Э.У. Формирование наноразмерных фаз в эпитаксиальных пленках кремния и изучение их физико-химических свойств // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – Москва, 2003. – № 8. – С. 101-104.
9. Ташмухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е., Ташатов А.К. Электронные свойства поверхности гетероструктурных пленок $\text{Me}_x\text{Si}_y/\text{Si}$ и $\text{Ga}_{1-x}\text{Me}_x\text{As}/\text{GaAs}$, созданных методом ионной имплантации // Известия Российской Академии Наук. Серия Физическая. – Москва, 2003. – Т. 67. – № 9. – С. 1362-1365.
10. Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A., Boltaev E.U., Dzhurakhalov A.A. Obtaining of epitaxial films of metal silicides by ion implantation and molecular beam epitaxy // Materials Science and Engineering B. – Holland, 2003.

– V. 101. – P. 124-127.

11. Ташмухамедова Д.А. Применение низкоэнергетической ионной имплантации для создания нанопленок на поверхности диэлектрических пленок CaF_2 // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2004. – V. 6. – № 1. – С. 46-50.

12. Ташмухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е., Миржалилова М.А. Изучение структуры и свойств нанокристаллов, созданных в приповерхностной области Si, GaAs методом низкоэнергетической ионной имплантации // Известия Российской Академии Наук. Серия Физическая. – Москва, 2004. – Т. 68. – № 3. – С. 424-426 (Tashmukhamedova D.A., Umirzakov B.E., Mirzhalilova M.A. Study of structure and properties of nanocrystals formed in Si and GaAs low-energy ion implantation // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. – Moscow, 2004. – V. 68. – № 3. – P. 483-486).

13. Умирзаков Б.Е., Ташатов А.К., Ташмухамедова Д.А., Нормурадов М.Т. Процесс формирования нанопленок на поверхности CaF_2 при ионной имплантации и последующем отжиге // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – Москва, 2004. – №12. – С.90-94.

14. Ташмухамедова Д.А. Исследование состава и электронной структуры границы раздела CoSi_2/Si // Известия Российской Академии Наук. Серия Физическая. – Москва, 2006. – Т. 70. – № 8. – С. 1230-1232 (Tashmukhamedova D.A. Study of composition and electronic structure of CoSi_2/Si interface // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. – Moscow, 2006. – V. 70. – № 8. – P. 1409-1411).

15. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А. Влияние прогрева и электронной бомбардировки на состав и структуру силицидных нанопленок // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – Москва, 2007. – № 11. – С. 1-3.

16. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Кадыров Б.А. Применение ионной имплантации для получения нанопленок силицидов металлов // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2008. – V. 10. – № 2. – С. 132-136.

17. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Ташатов А.К., Мавлонов Б.Б. Формирование нанокристаллов и нанопленок трехкомпонентных соединений на поверхности тонких пленок CaF_2 при имплантации ионов активных металлов и последующем отжиге // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2009. – V. 9. – № 5-6. – С. 371-375.

Патенты

18. Патент РУз № IAP 04080. Способ получения нанокристаллов силицида металла / Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Парманкулов И.П., Юлдашев Ю.Ю. // Расмий ахборотнома. – 2010. – № 1.

19. Патент РУз № IAP 04081. Способ получения трехкомпонентных наноструктур на основе арсенида галлия / Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Парманкулов И.П., Ташатов А.К., Мавланов Б.Б. // Расмий ахборотнома. – 2010. – № 1.

Статьи в сборниках

20. Ташмухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е. Электронные свойства поверхности гетероструктурных пленок $\text{Me}_x\text{Si}_y/\text{Si}$ и $\text{Ga}_{1-x}\text{Me}_x\text{As}/\text{GaAs}$, созданных методом ионной имплантации (обзор) // Сборник материалов XV международной конференции по взаимодействию ионов с поверхностью. – Москва, 2001. – Т. 2. – С. 208-211.

21. Tashmukhamedova D.A., Normuradov M.T., Beknazarov F.N., Umirzakov B.E., Tashatov A.K. The effect of annealing on silicon surface crystalline structure by the low energy Ba ions // Сборник материалов XV международной конференции по взаимодействию ионов с поверхностью. – Москва, 2001. – Т. 2. – С. 212-214.

22. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Ташатов А.К., Миржалилова М.А., Парманкулов И.П., Файзуллаев Р.Ф. Создание переходных согласующихся слоев на границах раздела системы $\text{GaAs} - \text{CaF}_2$ // Сборник материалов XV международной конференции по взаимодействию ионов с поверхностью. – Москва, 2001. – Т. 2. – С. 215-218.

23. Ташмухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е., Миржалилова М.А. Изучение структуры и свойств нанокристаллов, созданных в приповерхностной области Si, Ge, GaAs методом низкоэнергетической ионной имплантации // Сборник материалов XVI международной конференции по взаимодействию ионов с поверхностью. – Москва, 2003. – Т.2. – С. 67-70.

24. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Болтаев Э.У., Джураев Ш.Х., Ташатов А.К. Процесс формирования нанопленок на поверхности CaF_2 при ионной имплантации и последующем отжиге // Сборник материалов XVI международной конференции по взаимодействию ионов с поверхностью. – Москва, 2003. – Т.2. – С. 232-234.

25. Эшкулов А.А., Гаибов А.Г., Ташмухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е. Влияние ионной имплантации на электронные свойства тонких пленок $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}/\text{GaAs}$ // Сборник материалов XVI международной конференции по взаимодействию ионов с поверхностью. – Москва, 2003. – Т. 2. – С. 241-243.

26. Tashmukhamedova D.A., Umirzakov B.E., Tashatov A.K., Boltaev E.U. Electron structure of CoSi_2/Si (100) epitaxial films // Nuclear science and its application. – Almaty, 2003. – P. 66-69.

27. Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A., Tashatov A.K., Boltaev E.U. Investigating of composition, structure and properties of Si modification under variable dose ions implantation influence // Nuclear science and its application. – Almaty, 2003. – P. 113-119.

28. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Парманкулов И.П. Исследование состава и электронной структуры границы раздела CoSi_2/Si // Сборник материалов XVII международной конференции по взаимодействию ионов с поверхностью. – Москва, 2005. – Т. 2. – С. 232-235.

29. Ташмухамедова Д.А. Исследование формирования нанопленок на поверхности Si при ионной имплантации методами электронной спектроскопии // Сборник материалов XVII международной конференции по взаимодействию ионов с поверхностью. – Москва, 2005. – Т. 2. – С. 214-216.

30. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Парманкулов И.П., Мурадкабилов Д.М. Изучение динамики образования силицидных нанокристаллов и нанопленок в приповерхностной области Si в процессе ионной имплантации и последующего отжига // Харьковская нанотехнологическая ассамблея. – Харьков, 2006. – С. 25-28.

31. Нормурадов М.Т., Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Ташатов А.К., Мавлянов Б. Энергетическая диаграмма трехкомпонентной структуры типа $\text{CoSi}_2/\text{Si}/\text{CaF}_2$ // Сборник материалов XVIII международной конференции по взаимодействию ионов с поверхностью. – Москва, 2007. – Т. 2. – С. 224-226.

32. Умирзаков Б.Е., Ташатов А.К., Ташмухамедова Д.А., Мавлонов Б. Оптимальные режимы получения тонких структур методами сверхвысоковакуумного осаждения и ионной имплантации // Сборник научных статей научно-технического конгресса термистов и металлургов. – Харьков, 2008. – С. 41-46.

33. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Муродкобилов Д.М., Абдуллаев Т. Применение ионной имплантации для создания зародышей упорядоченных наноразмерных фаз // Сборник научных статей Харьковской нанотехнологической ассамблеи. – Харьков, 2008. – С. 73-75.

34. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А. Оценка критических размеров нанопленок и нанокристаллов по формированию электронно-зонной структуры характерной для твердых тел // Сборник материалов XIX международной конференции по взаимодействию ионов с поверхностью. – Москва, 2009. – Т. 2. – С. 264-267.

35. Ташмухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е., Миржалилова М.А., Мурадкабилов Д.М. Электронная структура многокомпонентных наносистем и структур с монотонно изменяющейся шириной запрещенной зоны // Сборник материалов XIX международной конференции по взаимодействию ионов с поверхностью. – Москва, 2009. – Т. 1. – С. 356-358.

36. Нормурадов М.Т., Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Ташатов А.К., Парманкулов И.П. Влияние ионной имплантации на электрофизические свойства тонких пленок CaF_2 // Сборник материалов XIX международной конференции по взаимодействию ионов с поверхностью. – Москва, 2009. – Т. 2. – С. 119-121.

Тезисы Международных и Республиканских конференций

37. Tashmukhamedova D.A., Umirzakov B.E., Kamanov B. Study of features of nano-silicides structures created by ion- implantation // The 7th Joint International Symposium NANOSCIENCE: Problems and Prospects Quantum Functional Materials and Devices. – Tashkent, 2008. – P. 25-28.

38. Tashmukhamedova D.A., Umirzakov B.E., Tashatov A.K., Beknazarov F.N., Normuradov M.T. Electronic properties of metal silicides thin films // European materials research society. – Strasbourg, 2001. – D – IX.4, D-18.

39. Tashmukhamedova D.A., Umirzakov B.E., Tashatov A.K., Beknazarov F.N., Normuradov M.T. The research influence of ion implantation with different irradiation doses on the temperature of monocrystal structure formation // Ion

Beam Analysis – 15. – Cairns, 2001. – P2 – 62.

40. Tashmukhamedova D.A., Umirzakov B.E., Ganiev K.K., Normuradov M.T. The research of thin film condition and property acquired on the basis of Si and GaAs by ion implantation method // 19th International Conference on Atomic Collisions in Solids. – Paris, 2001. – P. 146. A 127.

41. Tashmukhamedova D.A., Umirzakov B.E. The research of CaF₂ electronic characteristics at the infliction on its surface of GaAs variable thickness thin films // Radiation effects in insulators – 11. – Lisbon, 2001. – P – I.6.

42. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Нормурадов М.Т., Ташатов А.К., Парманкулов И.П. Электронная спектроскопия поверхности эпитаксиальных пленок CoSi₂/Si(100) // XXXII Меж. конф. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. – Москва, 2002. – С. 106.

43. Tashmukhamedova D.A., Umirzakov B.E. Electronic structure and properties of GaAs films under low energy Ba⁺ ion implantation // European materials research society, Symposium S. – Strasbourg, 2002. – P. S-25. S/PII.01.

44. Tashmukhamedova D.A., Umirzakov B.E., Tashatov A.K. Modification of surfaces properties Si, GaP and CaF₂ under ion implantation combined with annealing // 13th international conference on ion beam modification of materials. – Kobe, 2002. – P1-072.

45. Ташмухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е., Балтаев Э.У., Рахманкулов А. Исследование структуры и свойств наноразмерных силицидных фаз, созданных ионной имплантацией // III республиканская конференция по физической электронике. – Тошкент, 2002. – С. 70.

46. Tashmukhamedova D.A., Umirzakov B.E. Electronic properties of CaF₂ nanofilms under low energy Ba⁺ ion-implantation combined with annealing // Proceedings of the 1st seminar “The Opportunities for Application of Information Technologies for Development of Education and Economic Growth”. – Tashkent, 2003. – P. 92-93.

47. Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A. The prospects of creation the multi-layer thin-film structure on the basis of silicon by ion-implantation // Thirteenth International Conference on Microscopy of Semiconducting Materials. – Cambridge, 2003. – P. P3-3.

48. Tashmukhamedova D.A., Umirzakov B.E., Baltaev E.U. Composition and electronic properties of low-sized phases, formed on epitaxy films of silicon under ion-implantation // Thirteenth International Conference on Microscopy of Semiconducting Materials. – Cambridge, 2003. – P. P3-15.

49. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Балтаев Э.У. Создание многокомпонентных нанопленок методом ионной имплантации на основе CaF₂ // XXXIII международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. – Москва, 2003. – С. 76.

50. Ташмухамедова Д.А., Шахобиддинов З.Н. Ахмеджанов М.Р. Получение эпитаксиальных пленок силицидов металлов методами ионной имплантации и молекулярно-лучевой эпитаксии // Научно-практической и методической республиканской конференции профессорско-преподавательского состава «Технические науки в условиях рыночной экономики». – Ташкент, 2003. – С. 56.

51. Миржалилова М.А., Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Саидбеков Д.Т. Электронная спектроскопия поверхности GaAs, легированного ионами активных металлов // Научно-практической и методической республиканской конференции профессорско-преподавательского состава «Технические науки в условиях рыночной экономики». – Ташкент, 2003. – С. 54.

52. Tashmukhamedova D.A., Umirzakov B.E., Baltaev E.U. Composition and electronic properties of low sized phases, formed on epitaxy films of silicon under ion implantation // European Materials Research Society, Symposium E. – Strasbourg, 2003. – P. E/PII.28.

53. Tashmukhamedova D.A. Modification of CaF_2 films by implantation of active metals ions // European materials research society, Symposium G. – Strasbourg, 2004. – P – G/PII.12.

54. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Миржалилова М.А. Структура и свойства нанокристаллов BaSi_2 созданных ионной имплантацией // Труды второй межд. научно-технической конф. «Высокие технологии и развитие высшего технического образования в XXI веке». – Ташкент, 2004. – С. 211-212.

55. Ташмухамедова Д.А., Балтаев Э.У., Мавлянов Б. Методы получения наноструктур // Материалы II республиканской научно-практической конференции «Актуальные проблемы современной физики». – Термиз, 2004. – С. 103-105.

56. Ташмухамедова Д.А. Перспективы применения ионных пучков в создании наноструктур и нанопленок (обзор) // Материалы конференции «Фотоэлектрические явление в полупроводниках». – Ташкент, 2004. – С. 54.

57. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Парманкулов И.П., Ташатов А.К. Влияние ионной имплантации на состав, структуру и свойства тонких пленок $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}/\text{GaAs}$ // Материалы конференции «Фотоэлектрические явление в полупроводниках». – Ташкент, 2004. – С. 125.

58. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Балтаев Э.У. Электронные свойства многокомпонентных нанокристаллов и нанопленок полученных имплантацией ионов в Si и GaAs // XXXIV международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. – Москва, 2004. – С. 113.

59. Ташмухамедова Д.А. Влияние бомбардировки ионами Ag^+ и Ba^+ на состав и структуру GaP // XXXIV международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. – Москва, 2004. – С. 114.

60. Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A., Baltaev E.U., Mavlanov B. The prospects creation of semi-conductor nanocrystalline and nanofilms by ion-implantation // 8th International Conference “Solid State Physics”. – Almaty, 2004. – P. 335-336.

61. Tashmukhamedova D.A. Influence of ion and laser treatment on composition, structure and properties of epitaxy CaF_2 films // 8th International Conference “Solid State Physics”. – Almaty, 2004. – P. 159-161.

62. Tashmukhamedova D.A., Umirzakov B.E. Ion-implantation and nanotechnology // European materials research society, Symposium A. –

Strasbourg, 2005. – P – A/PI.27.

63. Ташмухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е., Парманкулов И.П., Миржалилова М.А., Ахмеджанов М.Р. Электрофизические свойства ионно – имплантированного кремния // Материалы IV республиканской конференции «Рост, свойства и применение кристаллов». – Нукус, 2005. – С. 31-32.

64. Ташмухамедова Д.А., Ахмеджанов М.Р., Балтаев Э.У. Физические свойства тонких трехкомпонентных эпитаксиальных пленок на основе A_3B_5 // Тезисы докладов IV республиканской конференции «Физическая электроника». – Ташкент, 2005. – С. 55.

65. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А. Зависимость температуры кристаллизации постимплантационного отжига приповерхностных слоев Si от энергии и дозы ионов бария // Тезисы докладов IV республиканской конференции «Физическая электроника». – Ташкент, 2005. – С. 136.

66. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А. Исследование электронной структуры поверхности ионно-имплантированного CaF_2 // XXXV международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. – Москва, 2005. – С. 190.

67. Нормурадов М.Т., Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А. Нанотехнология: развитие и будущее // Материалы III республиканской научно-практической конференции «Актуальные проблемы современной физики». – Термиз, 2006. – С. 15-17.

68. Ташмухамедова Д.А., Ташатов А.К., Мавлянов Б., Умирзаков Б.Е. Электронные свойства пленок $GaAs/CaF_2$ переменной толщины // Материалы III республиканской научно-практической конференции «Актуальные проблемы современной физики». – Термиз, 2006. – С. 106-107.

69. Ташмухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е., Парманкулов И.П., Гулямов А.М. Изучение динамики образования наносилицидов металлов в процессе ионной имплантации и отжига // XXXVI международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. – Москва, 2006. – С. 138.

70. Нормурадов М.Т., Умирзаков Б.Е., Ташатов А.К., Ташмухамедова Д.А., Миржалилова М.А. Изучение электронной структуры трехслойных ультратонких пленок $CoSi_2/CaF_2/GaAs$ // XXXVI международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. – Москва, 2006. – С. 139.

71. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Кадиров Б.А., Мурадкабиров Д.М. Влияние прогрева и электронной бомбардировки на состав и структуру силицидных нанопленок // XXXVI международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. – Москва, 2006. – С. 140.

72. Tashmukhamedova D.A., Umirzakov B.E. Obtained of nanofilms and nanostructure on the basis of $GaAs$ by low-energy ion-implantation // European materials research society, Symposium A. – Strasbourg, 2006. – P. A A1 10.

73. Tashmukhamedova D.A., Umirzakov B.E. Influence of long external actions on composition and properties silicides nanofilms // International Conference on Ion Beam Modification of Materials. – Taormina, 2006. – P. M160.

74. Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A., Kadirov B.A.,

Murodkobilov D.M. Optical properties GaAs/CaF₂ nanofilms variable thickness // International Conference on Ion Beam Modification of Materials. – Taormina, 2006. – P. M183.

75. Ташмухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е., Нормурадов М.Т., Мурадкбилов Д.М. Изучение процесса образования четырех компонентных соединений на поверхности пленки GaInAs/GaAs (111) при ионной имплантации методами электронной спектроскопии // Материалы международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» посвященной 15-летию независимости Узбекистана. – Ташкент, 2006. – С. 295.

76. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Ташатов А.К., Мавлянов Б. Электронно-спектроскопические исследования силицидных нанопленок и нанокристаллов, полученных методом низкоэнергетической ионной имплантации // Материалы международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» посвященной 15-летию независимости Узбекистана. – Ташкент, 2006. – С. 384.

77. Normuradov M.T., Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A. Electronic properties of GaAs/CaF₂ nanofilms with variable thickness // The 5th Joint International Symposium “NANOSCIENCE: Problems and Prospects (Quantum Functional Materials and Devices)”. – Tashkent, 2006. – P. 39.

78. Tashmukhamedova D.A., Umirzakov B.E., Bunazarov D. Formation silisides nanocrystals at ion-implantation and annealing // Second International Conference on Frontiers of Advanced Engineering Materials. – Lahore, 2006. – P. 06/39.

79. Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A., Mirjalilova M.A. Murodkobilov D.M. Electronic properties nanofilms CoSi₂/Si (111) // Second International Conference on Frontiers of Advanced Engineering Materials. – Lahore, 2006. – P. 06/40.

80. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Кудашев А. Получение и изучение свойств наноразмерной гетероструктуры Si/CoSi₂/Si // Международная конференция «Неравновесные процессы в полупроводниках и в полупроводниковых структурах». – Ташкент, 2007. – С. 87-88.

81. Ташмухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е., Шевляков В. Новые сведения о возможностях получения (образования) наноматериалов // Международная конференция «Неравновесные процессы в полупроводниках и в полупроводниковых структурах». – Ташкент, 2007. – С. 88-89.

82. Tashmukhamedova D.A., Umirzakov B.E. Optical properties of GaAs/CaF₂ nanofilms with variable thickness // 12th International Conference on Defects-Recognition, Imaging and Physics in Semiconductors. – Berlin. 2007. – P. 150.

83. Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A. Composition and structure nanosize phases of barium silicides created by ion-implantation // 12th International Conference on Defects-Recognition, Imaging and Physics in Semiconductors. – Berlin. 2007. – P. 134.

84. Normuradov M.T., Umirzakov B.E., Tashatov A.K., Tashmukhamedova D.A. Composition and structure nanosize phases of barium silicides created by

implantation of Ba^{+} ions in Si // The 6th Joint International Symposium on Quantum Functional Semiconductors. – Seoul, 2007. – P. 30-31.

85. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Муродкобилов Д.М., Шералиев М.У. Общие сведения о возможностях получения искусственных наноматериалов // Труды международной научно-практической конференции «Казахстан в новом мире и проблемы Национального образования». – Шымкент, 2008. – Т. 3. – С. 323-325.

86. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Миржалилова М.А., Умаров Н.Н. Кристаллическая структура нанокристаллов и нанопленок силицидов металлов // Труды международной научно-практической конференции «Казахстан в новом мире и проблемы Национального образования». – Шымкент, 2008. – Т. 3. – С. 326-330.

87. Умирзаков Б.Е., Ташатов А.К., Ташмухамедова Д.А. Оптимальные режимы получения нанопленочных структур в условиях сверхвысокого вакуума // Материалы IV республиканской научной конференции «Рост, свойства и применение кристаллов». – Андижан, 2008. – С. 13-15.

88. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Ахмеджанов М.Р., Муродкобилов Д.М. Применение ионной имплантации для создания зародышей упорядоченных наноразмерных фаз // Материалы XXXVIII международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. – Москва, 2008. – С. 147.

89. Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A., Tashatov A.K., Mavlyanov B. The investigation of structure and properties of heterostructure nanofilms produced by the methods of epitaxy and ionic implantation // 6th European workshop on Secondary Ion Mass Spectrometry. – Munster, 2008. – P. 43.

90. Tashmukhamedova D.A., Umirzakov B.E. Display of quantum properties nanocrystals depending on their sizes // 6th European workshop on Secondary Ion Mass Spectrometry. – Munster, 2008. – P. 111.

91. Ташмухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е., Ташатов А.К., Кучкаров У.Т. Применение Оже – электронной спектроскопии для определения степени покрытия поверхности Si силицидом металлов при ионной имплантации // Тезисы докладов VI международной конференции «Кремний» и V школы молодых ученых и специалистов. – Новосибирск, 2009. – С. 212-213.

92. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Холмухамедова В., Раббимов Э., Ахмеджанов М.Р. О применении низкоэнергетической ионной имплантации для создания нанопленок и нанокристаллов на поверхности полупроводников и диэлектрических пленок (обзор) // Материалы XXXIX международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. – Москва, 2009. – С. 114.

РЕЗЮМЕ

диссертации Ташмухамедовой Дилнозы Артикбаевны на тему: «Электронная спектроскопия нанопленок и нанокристаллов созданных низкоэнергетической ионной бомбардировкой полупроводниковых и диэлектрических пленок» на соискание ученой степени доктора физико – математических наук по специальности 01.04.04 – «Физическая электроника»

Ключевые слова: ионная имплантация, нанокристаллы, нанопленки, гетероструктура, дифракция электронов, электронная спектроскопия, туннельный эффект, дискретные зоны, многослойная система.

Объекты исследования: Ионно-лучевая обработка и электронная спектроскопия поверхности твердых тел.

Цель работы: Изучение закономерностей и выяснение физических механизмов формирования одно- и многокомпонентных нанопленок, нанокристаллов и сверхрешеток на основе полупроводниковых и диэлектрических пленок при низкоэнергетической ионной бомбардировке в сочетании с отжигом.

Методы исследования: Оже – электронная спектроскопия (для исследования состава), дифракция быстрых электронов, растровая электронная микроскопия (для исследования кристаллической структуры и топографии), ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия, спектроскопия упруго отраженных электронов, спектроскопия характеристических потерь энергии электронов (для исследования электронной структуры).

Полученные результаты и их новизна: Впервые разработана методика получения нанокристаллов и нанопленок на основе полупроводников и диэлектрических пленок с использованием метода низкоэнергетической ионной имплантации ($E_0 = 0,5 - 5$ кэВ) в сочетании с отжигом (температурный + лазерный). Выявлены основные механизмы их формирования. Впервые оценены параметры энергетических зон и кристаллической решетки силицидных нанопленок разной толщины. Обнаружено, что при $\theta \leq 5 - 6$ нм с уменьшением толщины пленки увеличивается ширина запрещенной зоны и значение постоянной решетки a . Разработана методика оценки критических размеров нанокристаллов при которых происходит туннелирование электронов. Разработана модель поверхности Si с нанокристаллами силицида.

Практическая значимость: Результаты могут быть использованы для создания новых наноматериалов и многослойных наноразмерных гетероструктур, необходимых для приборов микро-, опто- и наноэлектроники.

Степень внедрения и экономическая эффективность: Разработаны практические рекомендации для будущего использования полученных результатов в электронной промышленности. Результаты были использованы при выполнении грантов (Патент РУз № IAP 04080. Способ получения нанокристаллов силицида металла; патент РУз № IAP 04081. Способ получения трехкомпонентных наноструктур на основе арсенида галлия). Часть результатов используется в учебном процессе (Имеется акт внедрения в учебный процесс ТашГТУ).

Область применения: Физическая электроника и физика поверхности, микро-, опто- и наноэлектроника, ионно-лучевая и лазерная технология, производство полупроводниковых приборов.

Физика-математика фанлари доктори илмий даражасига талабгор Ташмухамедова Дилноза Артикбаевнанинг 01.04.04 – «Физикавий электроника» ихтисослиги бўйича «Ярим ўтказгич ва диэлектрик пленкаларни кичик энергияли ионлар билан бомбардимон қилганда ҳосил бўлувчи нанопленкалар ва нанокристаллларнинг электрон спектроскопияси» мавзусидаги диссертациясининг

РЕЗЮМЕСИ

Таянч сўзлар: ионлар имплантацияси, нанокристаллар, нанопленкалар, гетеротизим, электронлар дифракцияси, электрон спектроскопия, туннель эффекти, дискрет зоналар, кўп қатламли тизим.

Тадқиқот объекти: Қаттиқ жисм юзасига ион – нурли ишлов бериш ва электрон спектроскопия қилиш.

Ишнинг мақсади: Кичик энергияли ионли бомбардировка қилиш ва ундан кейинги қиздириш усули билан ярим ўтказгичли ва диэлектрик пленкалар асосида бир ва кўп компонентли нанокристаллар, нанопленкалар ва ўтапанжараларнинг шаклланиш қонуниятларини ва физик механизмларини аниқлаш.

Тадқиқот усули: оже – электрон спектроскопия (таркибни ўрганиш учун), тез электронлар дифракцияси, растрли электрон микроскопия (кристалл тузилиш ва топографияни ўрганиш учун), ультрабинафша фотоэлектронлар спектроскопияси, эластик қайтган электронлар спектроскопияси, характерли энергиясини йўқотган электронлар спектроскопияси (электрон тузилишни ўрганиш учун).

Олинган натижалар ва уларнинг янгилиги: Биринчи марта кичик энергияли ионлар имплантацияси ($E_0 = 0,5 - 5$ кэВ) ва кейинги қиздириш (*хароратли + лазерли*) усулидан фойдаланиб ярим ўтказгич ва диэлектрик пленкалар асосида нанокристаллар ва нанопленкалар олиш усули ишлаб чиқилди. Уларни қосил қилиш механизмлари аниқланди. Ҳар хил қалинликдаги силицид нанопленкаларнинг энергетик зоналари ва кристалл панжара параметрлари биринчи мартта аниқланган. Қалинлиги $\theta \leq 5 - 6$ нм бўлган пленкаларда қалинлик камайиши билан таъқиқланган зона кенлиги ва панжара доимийси a нинг қиймати ошиши кузатилган. Электронларнинг туннель ўтиши рўй берадиган нанокристаллларнинг критик ўлчамларини баҳолаш усули ишлаб чиқилган. Силицид нанокристалларига эга бўлган Si сиртининг модели ишлаб чиқилди.

Амалий ахамияти: Олинган натижалар микро-, опто- ва наноэлектроника асбоблари учун керак бўлган янги материалларни олиш ва кўп қатламли наноўлчамли гетеротизимлар яратишда қўлланилиши мумкин.

Татбиқ этиш даражаси ва иқтисодий самарадорлиги: Электрон саноатида олинган натижаларни келажакда татбиқ этиш учун амалий тавсиялар ишлаб чиқилди. Натижалар грантларни бажаришда фойдаланилди (IAP 04080 рақамли ЎЗР патенти. Способ получения нанокристаллов силицида металла; IAP 04081 рақамли ЎЗР патенти. Способ получения трехкомпонентных наноструктур на

основе арсенида галлия), ҳамда ўқув жараёнида қўлланилмоқда (ТошДТУ ўқув жараёнига қўлланилганлиги тўғрисида акт мавжуд).

Қўлланиш соҳаси: Физикавий электроника ва сирт физикаси, микро-, опто- ва наноэлектроника, ион – нурли ва лазерли технология, ярим ўтказгичли асбоблар ишлаб чиқариш.

RESUME

Thesis of Dilnoza Tashmukhamedova on the scientific degree competition of the doctor of sciences in physics-mathematics on speciality 01.04.04 – Physical electronics, subject: “Electronic spectroscopy nanofilms and nanocrystals created by low-energy ion-bombardment of semiconductor and dielectric films”

Key words: ion-implantation, nanocrystals, nanofilms, geterostructure, diffraction of electron, electronic spectroscopy, tunnel effect, discrete zones, multilayered system.

Subjects of research: Ion-beam treatment and electronic spectroscopy of a surface of solid.

Purpose of work: Research of legitimacy and finding-out of physical mechanisms of formation one- and multicomponent nanofilms, nanocrystals and superlattices on the basis of semiconductor and dielectric films at low-energy ion-bombardment in a combination with annealing.

Methods of research: Auger-electron spectroscopy (for research of composition), high energy electron diffraction, raster electron microscopy (for research of crystal structure and topography), ultraviolet photoelectron spectroscopy, spectroscopy elastic reflected electrons, spectroscopy characteristics loss energy electrons (for research of electron structure).

The results achieved and their novelty: For the first time the technique of obtained nanocrystals and nanofilms is developed on the basis of semiconductors and dielectric films with use of low-energy ion-implantation ($E_0 = 0.5 - 5$ keV) in a combination with annealing (temperature + laser). The basic mechanisms of their formation are revealed. For the first time parameters of energetic zones and a crystal lattice of silicide nanofilms different thickness are appreciated. It is revealed, that at $\theta \leq 5 - 6$ nm with decreases of thickness of a film the width of the forbidden zone and value of a constant lattice "a" increases. The technique of an estimation of the critical sizes nanocrystals is developed at which there is a tunneling electron. The model of surface Si with nanocrystals silicide is developed.

Practical value: Results can be used for creation new nanomaterials and multilayered nanosizes geterostructure, necessary for devices micro-, opto- and nanoelectronics.

Degree of embed and economic effectivity: Practical recommendations for future use of the obtained results in electronic industry are developed. Results have been used at performance of grants (Patent RUz № IAP 04080. Method of obtained nanocrystals of silicide metal; Patent RUz № IAP 04081. Method of obtained three-componential nanostructure on the basis of arsenide gallium). The part of results is used in educational process (There is an act of introduction in educational process TSTU).

Field of application: physical electronics and physics of surface, micro-, opto- and nanoelectronics, ionic-beam and laser technology, production of semiconductor devices.

Соискатель

Д.А. Ташмухамедова