

(ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ)
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 537.311.33+621.315.592:546.28+620.18

ГАЙДУК ПЕТР ИВАНОВИЧ

**ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР
В МАТЕРИАЛАХ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
ПРИ ИОННО-ЛУЧЕВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

МИНСК – 2005

Работа выполнена на кафедре физической электроники Белорусского
государственного университета

Научный консультант: член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси,
доктор физико-математических наук, профессор
Комаров Фадей Фадеевич
Научно-исследовательский институт прикладных физических
проблем им. А.Н.Севченко Белорусского государственного
университета, лаборатория элионики

Официальные оппоненты:

член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси,
доктор физико-математических наук, профессор
Гапоненко Сергей Васильевич
Институт молекулярной и атомной физики
Национальной академии наук Беларуси

член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси,
доктор технических наук, профессор
Коршунов Федор Павлович
Институт физики твердого тела и полупроводников
Национальной академии наук Беларуси

доктор физико-математических наук, профессор
Квасов Николай Трофимович
Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники, кафедра физики

Оппонирующая организация: Институт физики им. Б.И.Степанова
Национальной академии наук Беларуси

Защита диссертации состоится 29 апреля 2005 г. в 14 часов на заседании совета
по защите диссертаций Д 02.01.16 при Белорусском государственном университете по
адресу: 220050, Минск, пр-т. Ф.Скорины, 4, к. 319 (корпус физического факультета).
Тел. ученого секретаря 209 55 58

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского
государственного университета.

Автореферат разослан 24 марта 2005 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций,
доцент



Б.Ф.Стельмах

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Поиск новых материалов, модификация и исследование их свойств, разработка технологий формирования приборных структур с применением новых материалов относятся к важнейшим и приоритетным задачам материаловедения, физики твердого тела и полупроводниковой электроники. В частности, дальнейшее развитие микро- и нанoeлектроники предполагает широкое использование низкоразмерных структур, а также материалов, находящихся в метастабильных состояниях. Зачастую эти задачи взаимосвязаны. Так, уменьшение размеров активных областей интегральных схем и одновременное сохранение или улучшение их функциональных параметров требует увеличения концентрации легирующей примеси вплоть до (или выше) предела ее равновесной растворимости.

Для формирования низкоразмерных структур в материалах твердотельной электроники весьма перспективны методы ионно-лучевой модификации. Низкоразмерные структуры могут быть получены как при сверхбыстрой кристаллизации ионнолегированных слоев, так и при молекулярно-лучевом выращивании гетероэпитаксиальных структур с ионно-лучевым ассистированием. В частности, при лазерном отжиге сильнолегированных слоев происходит образование двумерных ячеистых структур, прохождение быстрых тяжелых ионов через полупроводники сопровождается формированием одномерных и нуль-мерных структур – треков и преципитатов, методы молекулярно-лучевой эпитаксии позволяют осуществлять самоорганизованный синтез низкоразмерных структур.

Приборные структуры низкой размерности, содержащие сильнолегированные или пересыщенные слои, являются нестабильными и могут релаксировать при их эксплуатации или термических воздействиях. Релаксация низкоразмерных пересыщенных и упруго-напряженных структур сопровождается формированием примесно-дефектных комплексов, их ускоренной диффузией, их взаимодействием с крупными дефектами структуры, что приводит к изменению физических свойств приборов. Эволюция примесно-дефектных комплексов, диффузия примеси, перестройка крупных дефектов структуры при распаде пересыщенных твердых растворов относятся к фундаментальным проблемам физики конденсированного состояния. Указанные проблемы подробно не изучены и являются актуальными до настоящего времени.

При формировании межэлементных соединений и контактов к мелким *p-n*-переходам СБИС широко используются слои силицидов металлов, полученные в различных температурно-временных условиях, а также в присутствии высокой плотности радиационных дефектов. Поэтому особый интерес представляют методы ионно-ассистируемого и прямого имплантационного синтеза силицидов металлов, а также методы комбинированного воздействия ионной имплантации и быстрого термического отжига на структурно-фазовые реакции в системах металл-кремний. Структурно-фазовые превращения в полупроводниках, металлах и низкоразмерных слоистых структурах на их основе, стимулированные ионной имплантацией, являются важны-

ми направлениями исследований в области радиационной физики конденсированных сред.

- Одним из основных направлений развития современной технологии БикМОП является разработка и формирование гетероэпитаксиальных структур. Например, для достижения высоких значений подвижности носителей заряда гетероэпитаксиальные каналы МОП транзисторов должны находиться в упругодеформированных состояниях и/или иметь неравновесный примесный состав. Проблемы получения как псевдоморфных, так и релаксированных слоев *SiGe* сплавов являются особенно актуальными при создании быстродействующих кремниевых приборов и интегральных схем – как альтернативных и способных заместить аналогичные приборы на полупроводниковых соединениях A_3B_5 . Несмотря на значительный прогресс последних лет (например, создание быстродействующего процессора с *SiGe* – канальными МОП транзисторами на фирме INTEL в 2003 г.), остаются неразрешенными ряд проблем выращивания слоев *SiGe* сплавов с низкой плотностью ростовых дислокаций.

Переход к технологиям нанoeлектроники предполагает разработку структур, содержащих массивы квантоворазмерных областей – слоев, проволок, точек. Для приборных применений структур с квантовыми точками необходимо исследовать механизмы пространственной самоорганизации квантовых точек, имеющих высокую однородность по размерам, химическому составу, морфологии. В настоящее время наиболее перспективными считаются подходы, использующие эпитаксиальный островковый рост, а также основанные на преципитации примесей в объеме пересыщенных твердых растворов. Систематические исследования процессов самоорганизации квантовых точек начались сравнительно недавно, и в настоящее время считаются наиболее приоритетными в сфере высоких технологий.

В целом, к началу исследований в рамках настоящей диссертационной работы (1982 год) имелись ограниченные сведения о структуре и фазовом составе слоев полупроводников после импульсного (лазерного) отжига. Исследования по ионно-стимулированному формированию силицидов, формированию треков в полупроводниках, молекулярно-лучевой эпитаксии сплавов *SiGe*, диффузии в сильнолегированных слоях *Si* и *SiGe* были или весьма отрывочными, или не проводились вообще.

Связь работы с крупными научными программами, темами. Отдельные этапы настоящей работы выполнялись в рамках следующих научных программ и исследовательских проектов:

- Плановых НИР лаборатории элионики НИИ ПФП в 1984-1997 гг. в рамках г/б тем «Синтез-5», «Синтез-6», «Синтез-7» и «Интенсивность» (Номера гос. рег. 01890010535; 01910049118; 19961213; 01910049119)
- ГНТП «Алмазы». НИР 212/97 «Выработать критерии оценки дефектности углеродных кристаллов методом электронной микроскопии и аттестовать метод и аппаратуру контроля качества кристаллов» (1997-1998, № гос. рег. 19973979).
- ГНТП «Белэлектроника» (1998-2000). Проекты БЭ-98/41.03 «Исследовать и разработать процессы получения мелкозалегающих p-n-переходов в кремнии с помо-

щью ионной имплантации» (№ гос. рег. 1999208) и БЭ-98/42.03 «Исследовать и разработать процессы управления фазовым составом на границе металл-полупроводник и металл-металл с использованием ионной имплантации» (№ гос. рег. 1999207).

- МПФИ «Разработка и исследования перспективных материалов». Проекты: «Разработка научных основ и физико-технологических методов гетероэпитаксии и легирования полупроводниковых соединений Ge_xSi_{1-x} и $GaAs$ на кремнии с буферными слоями» (1996-1998, № гос. рег. 19963448); «Исследование физических процессов в сплавах $SiGe$ при имплантации донорных примесей и быстром термическом отжиге. (1999-2001, № гос. рег. 19992331).
- Проекта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (БРФФИ) № Т96-159 «Исследование физических процессов в релаксированных $Si_{1-x}Ge_x$ гетероэпитаксиальных слоях при имплантации и импульсном отжиге» (1997-1999 гг. № гос. рег. 19973976).
- Проекта БРФФИ № Ф97-003 «Структурные превращения в $AlB5$ полупроводниках при облучении тяжелыми ионами сверхвысоких энергий» (1998-2000 гг. № гос. рег. 19982439).
- Проекта БРФФИ № Ф99-147 «Исследование физических свойств квантово-размерных структур на основе $GeAs/SiGe$ сплавов» (2000-2002 гг. № гос. рег. 20001950).
- Проекта БРФФИ № Ф03МС-027 «Самоорганизация квантовых точек в SiO_2-GeSn структурах, полученных методом магнетронного распыления» (2003-2005 гг. № гос. рег. 20032026).
- ГПОФИ «Наноматериалы и нанотехнологии». Проект 4.19 «Формирование квантовых точек $GeAs$ в слоях $Si_{1-x}Ge_x$ сплавов и моделирование электрофизических свойств квантовых структур» (2003-2005 гг. № гос. рег. 2004974).
- Проекта NATO Linkage Grant в области высоких технологий № 940672 «Ion implantation damage in relaxed $Si_{1-x}Ge_x$ heteroepitaxial layers» (1995-1997).
- Проекта NATO Linkage Grant в области высоких технологий № 976564 «Precipitated Quantum Dots formed by swift ion irradiation of multi-layered structures» (2000-2003).
- Программы Европейского содружества: "Competitive and sustainable growth" under Fifth Framework; Project GRD1-2000-25619 - NEON "Nanoparticles for Electronics" WP3: "Nanocrystal layers in SiO_2 formed by MBE" (2001-2003).
- ГПФИ Датского физического общества (Forskningsstyrelsen og Statens Teknisk-Videnskabelige Forskningsrad). Проект "Nanostructures in MBE-grown $SiGe$ semiconducting layers" (2000-2004).

Цель исследования заключается в установлении основных механизмов структурно-фазовых превращений и формирования низкоразмерных структур в материалах

лах твердотельной электроники – сильнолегированных слоях Si и $SiGe$ сплавов, кристаллах InP , силицидах металлов, гетероэпитаксиальных и квантоворазмерных структурах на основе Si , Ge и $SiGe$ сплавов – при ионной имплантации, импульсном отжиге и молекулярно-лучевой эпитаксии.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать механизмы эпитаксиальной кристаллизации при высоких скоростях затвердевания расплава, инициированного мощным лазерным облучением или прохождением тяжелых ионов сверхвысоких энергий, и формирования пересыщенных твердых растворов, ячеистых сегрегационных структур и трекров.
2. Изучить закономерности формирования силицидных фаз в системах пленка металла-кремний при комбинированных воздействиях ионной имплантации, ионного перемешивания и быстрого термического отжига.
3. Исследовать диффузионное перераспределение легирующей примеси в слоях Si и сплавов $SiGe$ после молекулярно-лучевой эпитаксии, высокодозной ионной имплантации и импульсного отжига.
4. Разработать методы гетероэпитаксиального роста протяженных и островковых слоев $SiGe$ и Ge на кремнии. Исследовать механизмы формирования релаксированных и псевдоморфных структур, а также массивов квантовых точек.
5. Изучить влияние упругих напряжений на эволюцию дефектов в псевдоморфных и релаксированных структурах $Si/SiGe$ при различных условиях имплантации и быстрого термического отжига.
6. Провести исследования механизмов формирования выделений в сильнолегированных и пересыщенных слоях. Определить условия самоорганизованного упорядоченного роста квантовых точек в слоях $SiGe$ и SiO_2 .

Объект исследования. Приповерхностные слои монокристаллов Si , InP , $SiGe$, тонкие слои SiO_2 и силицидов металлов ($NiSi_2$, $PtSi$, $CoSi_2$, $FeSi_2$, $TiSi_2$), квантовые точки Ge и $GeAs$ в слоях Si , $SiGe$ и SiO_2 после имплантации ионов As , Ge , P , Co , Sn , Sb , Kr , In , Xe и U , импульсного отжига, молекулярно-лучевой эпитаксии.

Предметом исследований, являлись: химический и фазовый состав, дефекты кристаллического строения, морфология поверхности объектов исследования, структурно-фазовые превращения в объектах при ионно-лучевых воздействиях, процессы рекристаллизации в твердой и жидкой фазах при импульсном отжиге имплантированных слоев с высокой концентрацией легирующей примеси, процессы формирования и самоорганизации квантовых точек, молекулярно-лучевая эпитаксия слоев $SiGe$ на Si в псевдоморфном и релаксированном состояниях, распад пересыщенных растворов при термических обработках.

Методология и методы проведенного исследования. Сложный характер структурно-фазовых превращений и поведения примеси в низкоразмерных структурах обусловил применение комплекса современных методов прямого исследования структуры, фазового состава и состояния примеси. В работе использованы методы просвечивающей электронной микроскопии в планарном и поперечном сечениях,

атомной силовой микроскопии, Резерфордского обратного рассеяния и каналирования ионов, масс спектрометрии вторичных ионов, Холловских измерений, Мессбауэровской спектрометрии, фотолюминесценции, комбинационного рассеяния. Для модификации материалов применялись методы ионной имплантации, молекулярно-лучевой эпитаксии, импульсного и равновесного-отжига. Режимы обработки - температура, интенсивность и доза имплантации, скорость эпитаксиального роста, скорость нагрева и длительность импульсных обработок, атмосфера отжига - варьировались в широких пределах. Как на этапе обработки материалов и структур, так и при изучении физических свойств и характеристик использовано современное промышленное, технологическое и исследовательское оборудование, проверенное и тестированное соответствующими аттестационно-поверочными службами.

Научная новизна и значимость полученных результатов.

Диссертационная работа содержит новые результаты, относящиеся к физике конденсированного состояния и описывающие структурно-фазовые превращения в материалах твердотельной электроники.

1. Впервые экспериментально обнаружены и исследованы в кристаллах InP и $Si_{1-x}Ge_x$ треки высокоэнергетических (250-2700 МэВ) тяжелых (Xe , U) ионов и установлены немонотонные зависимости формирования треков от скорости ионов, дозы, температуры, химического состава сплавов. Обнаружено выделение преципитатов $GeAs$, происходящее в треках при прохождении ионов U^{+} с энергией 0,7-2,7 ГэВ через слой пересыщенных сплавов $SiGeAs$.

2. Разработана модель формирования треков в кристаллах полупроводников, учитывающая плавление материала в узкой (~ 10 -20 нм) области вокруг траектории движения тяжелых ионов высоких энергий и отличающаяся формированием дефектов структуры при сверхбыстрой кристаллизации трекового расплава. На основе модели предсказано формирование треков в $SiGe$ сплавах, что нашло экспериментальное подтверждение.

3. Впервые экспериментально обнаружено, что при импульсном лазерном осаждении и отжиге сплавов $SiFeGe$, атомы Ge не входят в состав β - $FeSi_2$, но сегрегируют в поперечном направлении и образуют ячеистую структуру из сплава $SiGe$. Процесс сегрегации сопровождается многократным двойникованием зерен β - $FeSi_2$, что приводит к изменению соотношения концентрации атомов Fe_I и Fe_{II} в решетке β - $FeSi_2$.

4. Методами электронной микроскопии поперечных сечений впервые обнаружено, что в структуре $Si/CoSi_2/Si/CoSi_2/Si$, термический отжиг при 1000°C приводит к переползанию кристаллитов $CoSi_2$ через слой Si и их присоединению к сплошному скрытому слою $CoSi_2$.

5. Установлен механизм отжига дислокационных петель в сильнолегированных слоях $Si<P+As>$ $Si<P+Sb>$, заключающийся в последовательном формировании вакансионно-примесных комплексов $P-VAs$ и $P-VSb$, их диффузии в область локализации дислокаций, их распада с испусканием вакансий, и, наконец, аннигиляции ва-

кансий с междоузельными дислокационными петлями.

6. Впервые обнаружено, что имплантация ионов Ge^+ или As^+ (1кэВ или 800 кэВ) в упруго-деформированные эпитаксиальные структуры $Si/SiGe/Si$ приводит к пространственному разделению вакансий и собственных междоузельных атомов; при этом накопление вакансий происходит в слоях упруго сжатых $SiGe$ слоях, а междоузельных атомов – в прилегающих, упруго-растянутых слоях матричного Si .

7. Впервые обнаружено увеличение в 20 раз выхода фотолюминесценции в области 0,8-0,9 эВ от слоев $SiGe$, содержащих сферические нано-пузыри.

8. Экспериментально обнаружен эффект упорядоченного формирования квантовых точек $GeAs$ в слоях $Si_{0,5}Ge_{0,5}$ сплавов вдоль направлений $\langle 110 \rangle$ после имплантации As^+ (150-180 кэВ, $(8-25) \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$) и отжига при $T > 950^\circ\text{C}$.

9. Впервые сформированы полусферические $SiGe/Si$ наноразмерные структуры со сложной внутренней структурой: центральным микродвойниковым зародышем и полусферическими сегментами слоев Si и $SiGe$, распространяющимися вокруг двойников.

Научная достоверность полученных результатов подтверждена их согласованностью с теоретическими, модельными и экспериментальными результатами других авторов, полученных позднее или на иных полупроводниковых материалах и структурах, в том числе и в отличающихся условиях исследований. Новые результаты исследований активно обсуждались при их представлении на международных научных конференциях, совещаниях и рабочих встречах. Научная значимость обеспечена получением новых результатов и установлением закономерностей формирования неравновесных структур, обладающих принципиально новыми физическими свойствами и характеристиками. Развитие в работе модельные представления могут быть основой для интерпретации структурно-фазовых переходов в различных материалах.

Практическая значимость полученных результатов.

Разработан метод выращивания гетероэпитаксиальных структур $Si_{1-x}Ge_x/Si$ с низкой плотностью дислокаций. Метод апробирован в институте физики Орхусского университета для выращивания гетероэпитаксиальных структур, характеризующихся низкой плотностью прорастающих дислокаций, улучшенной топографией поверхности, меньшими временными затратами и низкой стоимостью.

Разработан новый способ формирования массивов самоорганизованных нанокристаллов Ge , имеющих высокую однородность по размерам и расположенных внутри слоя подзатворного диэлектрика МОП структур на расстоянии 3-10 нм от области канала. Показано существование гистерезиса C-V характеристик МОП конденсаторов с нанокристаллами Ge , что позволит разработать схемы памяти типа EEPROM или Flash.

На основе преципитации из пересыщенных твердых растворов предложен способ формирования квантоворазмерных структур. Сформированы массивы пространственно-упорядоченных преципитатов $GeAs$ нанометровых размеров в сплавах $SiGe$.

Разработан метод и соответствующий инструментарий для препарирования материалов в поперечном сечении для их исследования с помощью просвечивающей электронной микроскопии. Показана пригодность метода для препарирования многослойных, многокомпонентных, сверхтвердых покрытий и структур на их основе.

Практическая и экономическая значимость результатов диссертационной работы подтверждена 6 актами внедрений с экономическим эффектом на предприятиях электронной промышленности.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Модель формирования одномерных структур – треков в кристаллах *InP* и сплавах *SiGe* при высокоэнергетичной имплантации ионов *Xe* и *U*, учитывающая плавление материала в узкой (~10-20 нм) области вокруг траектории движения ионов и формирование дефектов структуры при последующей сверхбыстрой кристаллизации расплава. Экспериментальные доказательства модели, выявляющие:
 - немонотонные зависимости морфологического строения треков в кристаллах *InP* и сплавах *SiGe* от скорости ионов, дозы облучения, температуры, химического состава;
 - аморфизацию *InP* и формирование метастабильной вюрцитной фазы *InP* в области максимума неупругих потерь энергии ионов при дозах $(5...8) \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$;
 - выделение нуль-мерных структур - преципитатов *GeAs* в треках при прохождении ионов *U*⁺ с энергией 0,7-2,7 ГэВ через слои пересыщенных сплавов *SiGeAs*.
2. Установленные особенности и закономерности структурно-фазовых превращений в системах *Ni/Si*, *Pt/Si*, *Co/Si*, *Fe/Si* и *Ti/Si* при комбинированном ионно-лучевом и термическом воздействиях: ускорение процесса формирования силицидов в указанных системах после имплантации ионов *Kr* и *Ge*; зависимость скорости роста силицида *Pt₂Si* от ориентации подложки; распад сплава *SiFeGe* на β -*FeSi₂* и двумерную ячеистую структуру сплава *SiGe*; двухстадийное формирование многослойных гетерозиптаксиальных систем *Si/CoSi₂/Si* при высокодозной имплантации ионов *Co*⁺ и термическом отжиге.
3. Модель диффузии донорных примесей в сильнолегированных слоях *Si* и сплавах *SiGe*, учитывающая формирование высокоподвижных вакансионно-примесных комплексов *X-V-Y*, где *X* и *Y* – атом *P*, *As*, *Sb* или *Sn*, а *V* – вакансия, согласующаяся с экспериментально обнаруженными явлениями инжекции точечных дефектов при формировании нуль-мерных преципитатов, а также с механизмом отжига дислокационных петель в сильнолегированных слоях *Si*<*P*⁺+*As*⁺> и *Si*<*P*⁺+*Sb*⁺>.
4. Метод выращивания эпитаксиальных структур *SiGe/Si* с буферными слоями переменного состава, отличающийся тем, что выращивание буферных слоев проводится поэтапно с увеличением содержания *Ge* в сплаве *SiGe* на 7,5-15 ат.% на этап; на каждом этапе выращивание *SiGe* проводится вначале при температуре 350-450°C, затем - при температуре 530-570°C с последующим быстрым термическим отжигом всего слоя в течение 5 мин при 700-950°C, что обеспечивает снижение плотности дислокаций в структурах *SiGe/Si* в 10-100 раз, существенное

сглаживание поверхностного микрорельефа слоев SiGe; уменьшение длительности процесса выращивания структур.

5. Установленные особенности формирования низкоразмерных структур – квантовых точек:

- пространственно-упорядоченных вдоль направлений $\langle 110 \rangle$ нано-преципитатов *GeAs* в сплавах *SiGe*, получаемых в результате распада пересыщенных сплавов *SiGeAs*;
- квантовых точек *Ge* и низкоразмерных островков *SiGe* в многослойных структурах *Si/Ge/.../Si*, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на имплантированных слоях *SiGe*;
- квантовых точек *Ge* в слоях *SiO₂*, имеющих высокую степень однородности по размерам и расположенных на расстоянии $\sim 3,9 \pm 1,4$ нм от *Si* подложки.

Личный вклад соискателя. Основные результаты исследования, отраженные в защищаемых положениях и выводах, получены лично автором диссертации. В совместных работах автору принадлежат: обоснование и постановка задач, планирование и проведение экспериментов, обработка и интерпретация результатов, разработка физических моделей и рекомендаций. Соавторы осуществляли подготовку образцов, технологические операции в соответствии с алгоритмами, схемами и в режимах, определенных автором, участвовали в обсуждении результатов.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты, изложенные в диссертационной работе, докладывались на VIII Всес. конф. "Взаимодействие атомных частиц с твердым телом" (Москва, 1987); XV-XVIII, XX-XXIII Всес. (Межнац.) совещ. по физике взаимод. заряж. частиц с кристаллами. (Москва, 1985-1993); VIII Всес. конф. по взаимод. оптич. излучения с веществом (Ленинград, 1988); Научно-техн. конф. "Радиационная физика твердого тела" (Минск, 1989); EMRS, Physics and Technology of defects in *Si* (Strasbourg, 1989); MRS Fall Meeting (Boston, 1989); IV Всес. конфер. по взаимодействию радиации с твердым телом (Нальчик, 1990); Intern. Confer. on ion implantation and ion beam equipment (Elenite, 1990); III Всес. конф. "Ионнолучевая модификация полупроводников и др. материалов микроэлектроники" (Новосибирск, 1991); X-XII, XIV Всес. конфер. по взаимод. ионов с поверхностью (Звенигород, 1991-1995, 1999); 8th Intern. Confer. on ion-beam material modification (Germany, 1992); III, X Межнац. совещания "Радиационная физика твердого тела" (Севастополь, 1993, 2000); 17th, 18th, 20th, 21st, 22nd Intern. Confer. on Defects in Semiconductors (Gmunden, 1993, Sendai, 1995, Berkeley, 1999, Giessen, 2001, Aarhus, 2003); 1st Intern. Confer. Materials for Microelectronics (Barcelona, 1994); 8th Intern. Confer. on semi-insulated III-V- material (Poland, 1994); Междунар. конфер. "Физика и техника плазмы" (Минск, 1994); I-III, V Междунар. конфер. "Взаимодействие излучений с твердым телом" (Минск, 1995, 1997, 1999, 2003); EMRS Spring Meeting, Symposium J: "New trends in the Ion Beam Proc. of Materials", (Strasbourg, 1996); Internat. confer. on physics and technology of MBE growth (Warsaw, 1996, 1999); MRS Material modif. and syntesis by ion-beam proc. (Pittsburg, 1997); Междунар. конфер. "Физика плазмы и плаз-

менные технологии" (Минск, 1997); II Белорусского семинара по сканирующей зондовой микроскопии (Минск, 1997); II, III Intern. Symp. on ion impl. and other application of ions and electrons (Poland, 1998, 2000); 26th Intern. symp. on compound semiconductors (Berlin, 1999); V Polsko-Bialoruskie Symposjum Technologii Prozniowych (Borki, 1999); 11th European Workshop on Molecular Beam Epitaxy. (Euro-MBE), (Hinterzarten, Germany, 2001); NANOMEETING-2001, 2003 (Минск, 2001, 2003); 5th Intern. Confer. on swift heavy ions in matter (SHIM 2002) (Italy, 2002); Internat. Confer. on superlattices, nano-structures and nano-devices (ICSNN2002) (Toulouse, 2002); Granzer Workshop 2002 (Darmstadt, 2002); Internat. confer. on ion implantation in semiconductors and other materials (Lublin, 1988, 2004); 18th, 19th, 21st Internat. Confer. on atomic collisions in solids (ICACS-18) (Odense, 1999, Paris, 2001, Genova, 2004), на научных семинарах НИИ ПФП, БГУ, Йенского университета (Германия), Орхусского университета (Дания), Казанского ФТИ РАН, Института электроники НАНБ.

Опубликованность результатов. Результаты научных исследований по теме диссертационной работы опубликованы в 90 научных статьях: 64 статьи опубликованы в научных реферируемых журналах (4 – самостоятельно), 1 статья - в сборнике научных трудов, 25 статей - в материалах научных конференций (1 самостоятельно). Общее количество страниц опубликованных материалов – 473, из них 301 стр. принадлежит соискателю.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, восьми глав, заключения, списка использованных источников. Сведения об имеющихся в литературе данных, касающихся предмета диссертации, рассматриваются в начале каждой главы, а также по ходу обсуждения собственных результатов. Полный объем диссертации 280 страниц, в том числе 98 иллюстраций на 62 страницах и 8 таблиц на 5 страницах. Список литературы из 432 наименований занимает 31 страницу.

10. Обнаружено методами просвечивающей электронной микроскопии и электронографии, что слои SiO_2 , полученные после молекулярно-лучевого выращивания структуры $(10 \text{ нм})Si/(0,7 \text{ нм})Ge$ на подложке $(3-8 \text{ нм})SiO_2/Si$, термического оксидирования длительностью 14 мин при 800°C и отжига в инертной среде в течение 30 с при 950°C содержат кристаллы Ge со средним размером 4,5 нм.

Разработан и апробирован способ формирования МОП структур, содержащих массивы нанокристаллов Ge с плотностью $\sim 5 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$, самоорганизованных внутри слоя SiO_2 на расстоянии $\sim 3,9 \pm 1,4 \text{ нм}$ от подложки Si и имеющих однородность по размерам $\sim 4,5 \pm 1,8 \text{ нм}$. Способ включает формирование слоя оксида, последовательные операции молекулярно-лучевого выращивания слоев Ge (0,7-0,9 нм) и Si (10-20 нм), оксидирования поверхностного слоя Si и отжига в инертной среде для формирования нанокристаллов Ge . Обнаружено, что МОП структуры с нанокристаллами Ge обладают гистерезисом $C-V$ характеристик [52,87].

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

Статьи в реферируемых журналах

1. Gaiduk P.I., Komarov F.F., Solov'ev V.S. Epitaxial regrowth and defect formation during pulsed nanosecond annealing of amorphous layers. Part I: Experimental results // Rad. Eff. Lett.— 1986.— Vol.87, № 6.— P. 305-314.
2. Gaiduk P.I., Komarov F.F., Solov'ev V.S. Epitaxial regrowth and defect formation during pulsed nanosecond annealing of amorphous layers. Part II: Model of liquid phase epitaxy and secondary defect formation. // Rad. Eff. Lett.— 1986.— Vol. 87, № 6.— P. 315-326.
3. Гайдук П.И., Комаров Ф.Ф., Соловьев В.С. Механизм кристаллизации и формирования вторичных дефектов при наносекундном отжиге имплантационных слоев кремния // Физ. хим. обраб. матер.— 1988.— № 4.— С. 132-138.
4. Gaiduk P.I., Komarov F.F., Solov'ev V.S. Structure changes in ion implanted (111)-Si layers during pulsed nanosecond annealing and following thermal treatment. // Phys.Stat.Sol. (a).— 1989.— Vol.112.— P. 703-706.
5. Larsen A.N., Andersen P.E., Gaiduk P.I., Larsen K.K. The effect of phosphorus background concentration on the diffusion of tin, arsenic and antimony in silicon // Materials Science and Engineering.— 1989.— Vol.B4.— P. 107-112.
6. Gaiduk P.I., Komarov F.F., Prokhorenko N.L., Solov'ev V.S. Structure of silicon after B⁺ and P⁺ implantation and rapid thermal annealing. // Phys.Stat.Sol. (a).— 1988.— Vol. 107.— P. K105-K107.
7. Gaiduk P.I., Larsen A.N. Secondary defect evolution in ion-implanted silicon // J.Appl.Phys.— 1990.— Vol. 68.— P. 5081-5089.
8. Ивлев Г.Д., Баязитов Р.М., Гайдук П.И., Соловьев В.С., Хайбуллин И.Б., Жидков В.В. Модифицирование имплантационных слоев кремния моноимпульсным воздействием лазерного излучения // Поверхность. Физика, химия, механика.— 1990.— № 1.— С. 65-71.
9. Гайдук П.И., Демчук А.В., Прохоренко Н.Л. Структурные превращения и поведение примеси фосфора в ионнолегированном кремнии при быстром термическом отжиге // Физ. и хим. обраб. матер.— 1990.— № 6.— С. 29-32.
10. Gaiduk P.I., Larsen A.N. Platinum-silicide formation during rapid thermal annealing: dependence on substrate orientation and pre-implanted impurities // Appl. Phys. 1991.— Vol. A53.— P. 168-171.
11. Гайдук П.И., Соловьев В.С., Тишков В.С. Исследование структуры межфазных границ методом микроскопии поперечных сечений // Вак. техника и технология.— 1992.— Т. 2, № 1.— С.24-26
12. Бойко Е.Б., Гайдук П.И., Комаров Ф.Ф., Соловьев В.С., Тишков В.С. Использование малогабаритных каналоразрядных источников газовых ионов в научных исследованиях // Вак. техника и технология.— 1993.— Т. 3, № 2.— С.8-11.
13. Гайдук П.И., Комаров Ф.Ф., Соловьев В.С., Витцманн А., Центграф А. Формирование силицидов Со при горячем перемешивании ионами Кг и термо-

- обработке // Вак. техника и технология.— 1993.— Т.3, № 2.— С. 33-38.
14. Гайдук П.И., Комаров Ф.Ф., Соловьев В.С. Формирование силицидов в системе Ti/Si при интенсивном атомном перемешивании и термическом отжиге. // Вак. техника и технология.— 1993.— Т. 3, № 2.— С.12-18.
 15. Witzmann A., Schippel S., Zentgraf A., Gaiduk P.I. Study of Co silicide formation by multiple implantation // J. Appl. Phys.— 1993.— Vol. 73.— P. 7250-7260.
 16. Gaiduk P.I., Komarov F.F., Witzmann A., Zentgraf A., Schippel S. Effect of Kr-mixing and thermal treatment on Co-silicide formation // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res.—1994.— Vol. B94.— P. 231-236.
 17. Tishkov V.S., Gaiduk P.I., Shiryayev S.Yu., Larsen A.N. Rapid thermal annealing of arsenic-implanted $\text{Si}_{0.6}\text{Ge}_{0.4}$ alloys: Temperature effects // Appl.Phys.Lett.— 1996.— Vol. 68.— P. 655-657.
 18. Larsen A.N., Shiryayev S.Yu., Gaiduk P., Tishkov V.S. Rapid thermal annealing of arsenic implanted relaxed $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res.— 1996.— Vol. B120.— P. 161-164.
 19. Zentgraf A., Gartner K., Schippel S., Gaiduk P.I. Influence of damage on the formation of CoSi_2 by Co implantation // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys.Res. -1996.— Vol. B114.— P. 46-55.
 20. Gaiduk P.I., Komarov F.F. Formation of segregated cell structure for MBE growth of mismatched semiconductors // Thin Solid Films.— 1997.— Vol.306.— P. 352-355.
 21. Gaiduk P.I., Komarov F.F., Tishkov V.S. Device for vacuum deposition of multi-component thin films of variable composition // Elektronika.— 1997.— Vol. 38.— № 5.— P. 26-27.
 22. Wendler E., Opfermann T., Gaiduk P. I. Ion mass and temperature dependence of damage production in ion implanted InP // J. Appl. Phys.— 1997.— Vol. 82.— P. 5965-5975.
 23. Гайдук П.И., Тишков В.С., Ширяев С.Ю., Ларсен А.Н., Комаров Ф.Ф. Эволюция дефектов структуры в имплантированных мышьяком слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ // Вестник БГУ. Сер.1. Физ., Матем., Мех.— 1997.— № 3.— С. 19-25.
 24. Гайдук П.И., Тишков В.С., Ширяев С.Ю., Ларсен А.Н., Комаров Ф.Ф. Поведение мышьяка в сплавах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ при быстром термическом отжиге // Вестник БГУ. Сер.1. Физ., Матем., Мех.— 1998.— № 1.— С. 25-29.
 25. Гайдук П.И., Тишков В.С., Ширяев С.Ю., Ларсен А.Н. Структурные изменения в имплантированных мышьяком сплавах $\text{Si}_{0.6}\text{Ge}_{0.4}$ при быстром термическом отжиге // Весці НАНБ. Серыя фіз.—мат. навук.— 1998.— № 3.— С. 95-99.
 26. Тишков В.С., Гайдук П.И., Ширяев С.Ю. Формирование наноразмерных сеток в кремнии // Весці НАНБ. Серыя фіз.—мат. навук.— 1998.— № 2.— С. 91-95.
 27. Гайдук П.И., Тишков В.С., Ширяев С.Ю., Ларсен А.Н. Морфология поверхности кристаллов германия, облученных тяжелыми ионами средних энергий // Вестник БГУ. Сер.1. Физ., Матем., Мех.— 1999.— № 3.— С. 20-22
 28. Gaiduk P.I., Tishkov V.S., Shiryayev S.Yu., Larsen A.N. Effect of composition and annealing on structural defects in high-dose arsenic-implanted $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ alloys. -

- J. Appl. Phys.— 1998.— Vol. 68.— P. 4185-4193.
29. Wesch W., Herre O., Gaiduk P.I., Wendler E., Klaumunzer S., Meier P. Damage formation in InP due to high electronic excitation by swift heavy ions // Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res.— 1998.— Vol. B146.— P. 341-349.
 30. Fage-Pedersen J., Larsen A. N., Gaiduk P.I., Hansen J. L., Linnarsson M. Sn-background-induced diffusion enhancement of Sb in Si // Phys. Rev. Lett.— 1998.— Vol. 81.— P. 5856-5859.
 31. Herre O., Wesch W., Wendler E., Gaiduk P.I., Komarov F.F., Klaumunzer S., Meier P. Formation of discontinuous tracks in single-crystalline InP by 250-MeV Xe-ion irradiation // Phys. Rev. B.— 1998.— Vol. 58.— P. 4832-4837.
 32. Gaiduk P.I., Fage-Pedersen J., Hansen J., Lundsgaard, Larsen A., Nylandsted. Sb-precipitation induced injection of Si-self interstitials in Si // Phys. Rev. B.— 1999.— Vol. 59.— P. 7278-7281.
 33. Gaiduk P.I., Komarov F.F., Tishkov V.S., Herre O., Wendler E., Wesch W. Wurtzite InP phase formation during swift Xe ion irradiation // Nucleonika.— 1999.— Vol. 44.— № 2.— P. 189-194.
 34. Gaiduk P.I., Larsen A.N., Hansen J.L., Komarov F.F. Effect of hydrogen cavities in Si-substrate on heteroepitaxial growth of $\text{Si}_{0.85}\text{Ge}_{0.15}$ alloy // Vacuum Techn. and Technology.— 1999.— Vol. 123.— P. 55-59.
 35. Milchanin O.V., Gaiduk P.I., Komarov F.F. Interaction between pre-existing dislocations and hydrogen-induced defects introduced by plasma treatment // Nucleonika.— 1999.— Vol. 44.— № 2.— P. 175-180.
 36. Гайдук П.И. Преципитация GeAs в $\text{Si}_{0.75}\text{Ge}_{0.25}$ -сплавах при высокодозной имплантации ионов мышьяка // Вестник БГУ. Сер.1. Физ., Матем., Мех.— 2000.— № 1.— С. 3-8.
 37. Гайдук П.И., Тишков В.С., Ширяев С.Ю., Ларсен А.Н. Структура поверхностных слоев $\text{Si}_{0.75}\text{Ge}_{0.25}$ сплавов после имплантации мышьяка и быстрого термического отжига // Поверхность.— 2000.— № 4.— С. 44-49.
 38. Гайдук П.И., Чернявская Ю.В., Ларсен А.Н., Тишков В.С., Комаров Ф.Ф. Концентрационные зависимости подвижности носителей заряда и удельного сопротивления в имплантированных сплавах SiGe // Вестник БГУ. Сер.1. Физ., Матем., Мех.— 2000.— № 3.— С. 18-22.
 39. Гайдук П.И. Структурные изменения в имплантированных мышьяком сплавах $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ при быстром термическом отжиге // Вестн. НАНБ. Серия физ.-мат. наук.— 2000.— № 4.— С. 114-119.
 40. Гайдук П.И. Влияние микропузырей в подложке кремния на эпитаксиальный рост SiGe -сплавов // Вестник БГУ. Сер.1. Физ., Матем., Мех.— 2000.— № 3.— С. 24-28.
 41. Gaiduk P.I., Komarov F.F., Wesch W. Damage evolution in crystalline InP during irradiation with swift Xe ions // Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. B.— 2000.— Vol. 164-165.— № 1-4.— P. 377-383.

42. Gaiduk P.I., Larsen A.N., Hansen J.L. Defect-free MBE growth in SiGe/Si heteroepitaxial structures // *Thin Solid Films.*— 2000.— Vol. 367, № 1-2.— P.120-125.
43. Gaiduk P.I., Komarov F.F., Tishkov V.S., Wesch W., Wendler E. Wurtzite InP formation during swift Xe ion irradiation // *Phys. Rev. B.*— 2000.— Vol. 61.— № 23.— P. 15785-15788.
44. Fage-Pedersen J., Gaiduk P.I., Hansen J. L., Larsen A. N. Si self-interstitial injection from Sb complex formation in Si // *J. Appl. Phys.* — 2000.— Vol. 88, № 6.— P.3254-3259.
45. Гайдук П.И., Ларсен А.Н. Молекулярно-лучевой рост гетероэпитаксиальных структур SiGe/Si // *Весті НАНБ. серія фіз.-мат. наук.*— 2001.— № 3.— С.115-119.
46. Gaiduk P.I., Hansen J.L., Larsen A.N. Ion-beam assisted MBE growth of semi-spherical SiGe/Si nano-structures // *Appl. Phys.*— 2001.— Vol. A73, P. 761-763.
47. Gaiduk P.I., Larsen A.N., Hansen J.L. Self-organization of GeAs nanodots in relaxed Si_{0.5}Ge_{0.5} alloys // *Appl. Phys. Lett.*— 2001.— Vol. 79, № 21.— P. 3494-3496.
48. Komarov F., Gaiduk P., Komarou A. Damage evolution and track formation in crystalline InP and GaAs during swift Kr and Xe ion irradiation // *Vacuum.*— 2001.— Vol. 63.— P. 657-663.
49. Gaiduk P.I., Larsen A.N., Hansen J.L., Mudryj A.V., Samtsov M.P., Demenschenok A.N. Self-assembly of epitaxially grown Ge/Si quantum dots enhanced by As ion implantation // *Appl. Phys. Lett.*— 2001.— Vol. 79.— № 24.— P. 4025-4027.
50. Zenkevich A., Gaiduk P.I., Gunnlaugsson H.P., Weyer G. On the role of Ge in the growth of beta-FeSi₂ on silicon (100) surfaces // *Appl. Phys. Lett.*— 2002.— Vol.81.— P 904-906.
51. Gaiduk P.I., Larsen A.N., Trautmann C., Toulemonde M. Discontinuous tracks in arsenic-doped crystalline Si_{0.5}Ge_{0.5} alloy layers // *Phys. Rev. B.*— 2002.— Vol. 66.— P. 045316 (1-5).
52. Kanjilal A., Hansen J. L., Gaiduk P.I., Larsen A.N., Cherkashin N., Clavarie A., Normand P., Kapelanakakis E., Skarlatos D., Tsokalos D. Structural and electrical properties of silicon dioxide layers with embedded germanium nanocrystals grown by molecular-beam epitaxy // *Appl. Phys. Lett.*— 2003.— Vol. 82.— P. 1212-1214.
53. Gaiduk P.I., Larsen A.N., Hansen J.L., Trautmann C., Toulemonde M. Discontinuous tracks in relaxed Si_{0.5}Ge_{0.5} alloy layers: A velocity effect // *Appl. Phys. Lett.*— 2003.— Vol. 83.— P. 1746-1748.
54. Gaiduk P.I., Hansen J.L., Larsen A.N., Steinman E.A. Nanovoids in MBE grown SiGe alloys *in-situ* implanted with Ge⁺ ions // *Phys. Rev. B.*— 2003.— Vol. 67.— P. 235310 (1-7)
55. Gaiduk P.I., Hansen J.L., Larsen A.N., Wendler E., Wesch W. Self assembling of nanovoids in 800 keV Ge implanted Si/SiGe multi-layered structure // *Phys. Rev. B.*— 2003.— Vol. 67.— P. 235311 (1-4).
56. Gaiduk P.I., Larsen A.N., Hansen J.L., Wendler E., Wesch W. Temperature effect on defect evolution in 800 keV Ge-implanted Si/SiGe multi-layered structure // *Physica*

B: Condensed Matter.– 2003.– Vol. 340-342.– P. 813-817.

57. Gaiduk P.I., Trautmann C., Toulemonde M., Hansen J.L., Larsen A.N. Effect of alloy composition on track formation in relaxed $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ // Physica B: Condensed Matter.– 2003.– Vol. 340-342.– P. 808-812.
58. Gaiduk P.I., Larsen A.N., Hansen J.L. MBE grown Ge dots on Si/SiGe ion implanted buffers // Physica E: Low-dimens. syst. and nanostr.– 2003.– Vol. 17.– P. 510-512.
59. Wesch W., Kamarou A., Wendler E., Gärtner K., Gaiduk P.I., Klaumünzer S. Ionisation stimulated defect annealing in GaAs and InP // Nucl. Instr. Meth. B.– 2003.– Vol. 206.– P. 1018-1023.
60. Komarov F.F., Gaiduk P.I., Vlasukova L.A., Didyk A.J., Yuvchenko V.N. Track formation in germanium crystals irradiated with superhigh-energy ions // Vacuum.– 2003.– Vol. 70.– P. 75-79.
61. Гайдук П.И., Траутман К., Толемонд М., Ларсен А.Н. Трековая преципитация в пересыщенных слоях $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ сплавов // Вестник БГУ, Сер. I. Физика. Математика. Механика.– 2003.– № 3.– С.31-35.
62. Гайдук П.И., Траутман К., Толемонд М., Ларсен А.Н. Роль скорости ионов при формировании треков в сплавах $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ // Вестник БГУ, Сер. I. Физика. Математика. Механика.– 2004.– № 1.– С.44-49.
63. Гайдук П.И. Вертикальная самоорганизация квантовых точек в многослойных структурах Si/Ge // Весці НАНБ. Серыя фіз.-мат.наук.– 2004.– № 1.– С.110-113.
64. Гайдук П.И., Траутман К., Толемонд М., Ларсен А.Н. Формирование треков в сплавах $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$: эффект композиции // Весці НАНБ. Серыя фіз.-мат. наук.– 2004.– № 2.– С. 97-101.

Статьи в научных сборниках

65. Гайдук П.И., Комаров Ф.Ф. Модель эпитаксиального роста полупроводниковых соединений на профилированном кремнии // Радиофизика и электроника: Сб. научн. трудов. Вып. II / Мн.: БГУ.– 1996.– С. 130-135.

Статьи в материалах конференций

66. Гайдук П.И., Комаров Ф.Ф., Соловьев В.С. Импульсный отжиг ионнолегированных слоев кремния // Некоторые вопросы надежности и устойчивости полупр. материалов и структур к воздействию внешних дестабилизирующих факторов: Материалы Всесоюз. совещ. / ТГУ. – Душанбе, 1986.– С. 56-60.
67. Гайдук П.И., Проворкина И.В., Соловьев В.С., Сивицкий А.Г. Структурные изменения и поведение мышьяка в системе Ti-Si при ионной имплантации и отжиге // Взаимод. атомн. частиц с тв. телом: Материалы VIII Всес. конфер./ М.: Изд. МИФИ.– 1987.– т.1.– С.160-161.
68. Гайдук П.И., Соловьев В.С. Ионнолегированные импульсноотожженные $\text{Si}<\text{B}>$ -слои в условиях равновесной термообработки // Взаимод. атомн. частиц с тв. телом: Материалы VIII Всес. конфер. / М.: МГУ.– 1987.– Т. II.– С. 119-121.

69. Larsen K.K., Gaiduk P.I., Larsen A.N. A comparison of the diffusivity of As and Ge in Si at high donor concentrations // Diffusion in silicon: Proc. of Internat. Sympos. / Boston: MRS.- 1990, P. 601-605.
70. Гайдук П.И., Касько И.В., Соловьев В.С. Силицидообразование в системе Ti/Si при имплантации As и быстром термическом отжиге // Взаимод. ионов с поверхн.: Матер. X Всес. Конфер. / М.: Изд. МИФИ.- 1991.- Т.3.- С. 98-101.
71. Gaiduk P.I., Komarov F.F., Solov'ev V.S. The effect of As and P implantation on rapid thermal silicide formation. // Ion Implantation and Ion Beam Equipment: Materials of International Conference / Eds. D.S.Karpuzov, I.V.Katardjiev and S.S.Todorov.- Singapore.: World Sci.Publ.Co.- 1991.- P. 1-8.
72. Гайдук П.И., Комаров Ф.Ф., Соловьев В.С. Формирование силицидов в системе Me/Si при интенсивном или "горячем" атомном перемешивании и отжиге // Взаимод. ионов с поверхн.: Матер. XI Всес. конфер. / М.: Изд. МИФИ.- 1993.- Т. 3.- С. 146-149.
73. Гайдук П.И., Витцманн А., Шиппель С. Формирование эпитаксиальных слоев CoSi_2 при "горячей" имплантации Co и отжиге // Взаимод. ионов с поверхн.: Матер. XI Всес. конфер./ М.: Изд. МИФИ.- 1993.- Т. 3.- С. 149-151.
74. Gaiduk P.I., Komarov F.F., Witzmann A., Schippel S. Structure investigations of heteroepitaxial CoSi_2/Si layers formed by ion implantation // Material Science Forum.- 1994.- Vol. 143-147.- P. 1577-1582.
75. Гайдук П.И., Комаров Ф.Ф., Мильчанин О.В., Петров А.Ю., Тишков В.С. Пассивация и эволюция дефектов в кремнии при обработке в водородной плазме // Взаимодействие ионов с поверхностью: Матер. XII Междунар. Конфер. / М.: МИФИ.-1995.- Т. 2.- С.154-157.
76. Glaser E., Fehlhaber T., Schulz R., Bachmann T., Gaiduk P. Ion beam induced re-growth and interfacial amorphization of compound semiconductors // Materials Modific. And Syntesis by Ion-Beam Processing: Proc.Int.Symp.MRS / Pitsburg.: MRS.- 1996.- Vol. 438.- P. 175-185.
77. Гайдук П.И., Комаров Ф.Ф., Мильчанин О.В., Тишков В.С., Скибарко И.А. Эволюция вторичных дефектов структуры в кремнии при водородной плазменной обработке // Физика плазмы и плазменные технологии: Матер. межд. конфер. / Мн.: ИФАН.- 1997.- С. 555-558.
78. Гайдук П.И., Тишков В.С., Комаров Ф.Ф., Ширяев С.Ю., Ларсен А.Н. Эрозия имплантированных мышьяком $\text{Si}_{0.75}\text{Ge}_{0.25}$ сплавов при быстром термическом отжиге // Сканирующая зондовая микроскопия: Матер. II Белорусского семинара / Мн.: ИФТТ НАНБ, 1997.- С. 57-59.
79. Гайдук П.И., Тишков В.С., Комаров Ф.Ф., Веш В. Эволюция дефектов в кристаллическом InP при облучении ионами Хе сверхвысоких энергий // Взаимодействие излучений с твердым телом: Материалы 3 Международной конференции / Мн.: Изд.БГУ.- 1999.- ч. II.- С. 39-41.
80. Гайдук П.И., Тишков В.С., Комаров Ф.Ф., Веш В. Формирование вюрцитной фазы фосфида индия при имплантации ионов Хе сверхвысоких энергий // Взаимодействие ионов с поверхностью: Материалы 14-й Междун. конф., Звенигород / М.: МИФИ.- 1999.- Т. 2.- С. 29-32.

81. Мильчанин О.В., Гайдук П.И. Эволюция дислокаций в кремнии при водородной плазменной обработке // Взаимодействие излучений с твердым телом: Материалы 3 Межд. конф. / Мн.: Изд. БГУ. – 1999. – ч. I. – С. 57-59.
82. Гайдук П.И. Формирование треков в InP при имплантации ионов Хе высоких энергий // Радиационная физика твердого тела: Труды X Межнац. совещ., Севастополь, 3-8 июля 2000 / М.: Изд. МГИЭМ. – 2000. – С. 136-140.
83. Гайдук П.И., Гайдук А.В., Ларсен А.Н. Поведение примеси и квантовых GeAs структур в сплаве $\text{Si}_{0.75}\text{Ge}_{0.25}$ при имплантации мышьяка и отжиге // Радиационная физика твердого тела: Труды X Межнац. совещ., Севастополь, 3-8 июня 2000 / М.: Изд. МГИЭМ. – 2000. – С. 465-469.
84. Gaiduk P.I., Larsen A.N., Hansen J.L. Self-organized GeAs nano-dots in relaxed $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ alloys // Molecular Beam Epitaxy: Proc. 11th European Workshop, Hinterzarten 4-7.02.2001 / Stuttgart: Max-Planck-Institut. – 2001. – P. 126-127.
85. Gaiduk P.I., Hansen J.L., Larsen A.N. Evolution of dislocations in MBE-grown SiGe/Si-structures // Molecular Beam Epitaxy: Proc. 11th European Workshop, Hinterzarten 4-7.02.2001 / Stuttgart: Max-Planck-Institut. – 2001. – P. 89-90.
86. Gaiduk P.I., Hansen J.L., Larsen A.N. Semi-spherical SiGe/Si nanostructures grown by MBE with in-situ ion-beam assistance // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures: Reviews and short notes to NANOMEETING-2001 May 22-25, Minsk / Singapur: World Scientific. – 2001. – P. 372-375.
87. Larsen A. N., Kanjilal A., Hansen J. L., Gaiduk P., Cherkashin N., Clavarie A., Normand P., Kapelanakakis E., Skarlatos D., Tsoukalas D., Heinig K-H. Germanium quantum dots in SiO_2 : fabrication and characterization // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures. Reviews and short notes to NANOMEETING-2001 May 20-23, Minsk / Singapur: World Scientific. – 2003. – P. 439-446.
88. Gaiduk P.I., Hansen J.L., Larsen A.N. Strain-induced self assembling of nanovoids in Si/SiGe multi-layer structure // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures. Reviews and short notes to NANOMEETING-2001, May 22-23, Minsk / Singapur: World Scientific. – 2003. – P. 92-95.
89. Гайдук П.И., Веш В., Вендлер Е., Ларсен А.Н., Хансен Дж.Л. Разделение дефектов в имплантированных многослойных структурах Si/SiGe // Взаимодействие излучений с твердым телом : Материалы V Международной конференции, 6-9 окт. 2003 / Мн.: Изд. БГУ. – 2003. – С. 111-113.
90. Гайдук П.И., Траутман К., Толемонд М., Ларсен А. Прерывистые треки в слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ сплавов // Взаимодействие излучений с твердым телом: Материалы V Междунар. Конфер., 6-9 окт. 2003 / Мн.: Изд. БГУ. – 2003. – С. 17-19.

П. И. Гайдук

РЭЗЮМЕ

ГАЙДУК ПЕТР ІВАНАВІЧ

Працэсы фарміравання нізкаразмерных структураў у матэрыялах цвёрдацельнай электронікі пры іённа-прамяневых уздзеяннях

Ключавыя словы: іённая імплантцыя, імпульсны адпал, эпітаксія, паўправаднікі, сіліцыды, электронная мікраскапія, дэфекты структуры, дыфузія, квантавыя кропкі, самаарганізацыя

Аб'екты даследвання: прыпаверхневыя слаі монакрышталяў Si , InP , $SiGe$, тонкія слаі SiO_2 і сіліцыдаў металаў ($NiSi_2$, $PtSi$, $CoSi_2$, $FeSi_2$, $TiSi_2$), квантавыя кропкі Ge і $GeAs$ ў сляях Si , $SiGe$ і SiO_2 пасля імплантцыі іёнаў As , Ge , P , Co , Sn , Sb , Kr , In , He ці U , імпульснага адпалу, малекулярна-прамяневай эпітаксіі.

Прадмет даследвання: хімічны і фазавы састаў, дэфекты крышталевага збудавання, марфалогія паверхні аб'ектаў; структурна-фазавыя пераўтварэнні; перакрышталізацыя ў цвёрдай і вадкай фазах; самаарганізацыя квантавых кропак; рост гетэраэпітаксіяльных слаёў $SiGe$ на Si .

Мэта дысертацыйнай працы: вызначыць механізмы структурна-фазавых пераўтварэнняў і фарміравання нізкаразмерных структураў ва ўказаных аб'ектах пры іённай імплантцыі, імпульсным адпале, малекулярна-прамяневай эпітаксіі.

Метадамі прасвечваючай электроннай мікраскапіі, рэзерфордаўскага рассеявання, мас-спектраметрыі другасных іёнаў, электрафізічных і аптычных вымярэнняў даследваны структурна-фазавыя пераўтварэнні ва ўказаных аб'ектах пры апрацоўках іённа-прамяневымі метадамі. Выяўлена, што фарміраванне трэкаў у InP і сплавах $SiGe$ пры праходжанні цяжкіх быстрых іёнаў; выпусканне кропкавых дэфектаў пры распадзе перасычаных раствораў Si і $SiGe$; прасторавае раздзяленне кропкавых дэфектаў у пругкіх дэфармацыях псеўдаморфных слаёў $SiGe$ ў Si ; самаарганізаванае фарміраванне квантавых кропак Ge і (ці) $GeAs$ ў сляях $SiGe$ сплаваў і SiO_2 . Распрацавана мадэль фарміравання трэкаў у крышталях паўправаднікоў пры праходжанні цяжкіх іёнаў высокіх энергій. Вызначаны механізм прымесна-дэфектных рэакцый у Si і $SiGe$, які ўлічвае фарміраванне рухомых вакансіённа-прымесных комплексаў. Распрацаваны новы метады вырошчвання рэлаксаваных эпітаксіяльных слаёў $SiGe/Si$ з колькасцю роставых дыслакацый менш чым 10^4 - 10^6 $см^{-2}$. Распрацаваны метады фарміравання наакрышталяў Ge ў тонкіх сляях SiO_2 , якія прыводзяць да гістэрэзісу C-V характарыстык.

Вобласць скарыстання вынікаў: фізіка паўправаднікоў, матэрыялазнаўства, тэхналогія паўправадніковай электронікі, нанаэлектроніка, фізіка і тэхналогія квантавапамерных структураў.

РЕЗЮМЕ

ГАЙДУК ПЕТР ИВАНОВИЧ

Процессы формирования низкоразмерных структур в материалах твердотельной электроники при ионно-лучевых воздействиях

Ключевые слова: *Ионная имплантация, импульсный отжиг, эпитаксия, полупроводники, силициды, электронная микроскопия, дефекты структуры, диффузия, квантовые точки, самоорганизация*

Объекты исследования: приповерхностные слои монокристаллов Si , InP , $SiGe$, тонкие слои SiO_2 и силицидов металлов ($NiSi_2$, $PtSi$, $CoSi_2$, $FeSi_2$, $TiSi_2$), квантовые точки Ge и $GeAs$ в слоях Si , $SiGe$ и SiO_2 после имплантации ионов As , Ge , P , Co , Sn , Sb , Kr , In , Xe или U , импульсного отжига, молекулярно-лучевой эпитаксии.

Предмет исследования: химический и фазовый состав, дефекты кристаллического строения, морфология поверхности объектов; структурно-фазовые превращения; рекристаллизация в твердой и жидкой фазах; самоорганизация квантовых точек; рост гетероэпитаксиальных слоев $SiGe$ на Si .

Цель диссертационной работы: установить механизмы структурно-фазовых превращений и формирования низкоразмерных структур в указанных объектах при ионной имплантации, импульсном отжиге и молекулярно-лучевой эпитаксии.

Методами просвечивающей электронной микроскопии, Резерфордского обратного рассеяния, масс-спектрометрии вторичных ионов; электрофизических и оптических измерений исследованы структурно-фазовые превращения в указанных объектах при ионно-лучевых обработках. Впервые обнаружено: формирование треков в InP и $SiGe$ сплавах при прохождении тяжелых быстрых ионов; испускание точечных дефектов при распаде пересыщенных слоев Si и $SiGe$; пространственное разделение точечных дефектов в области упругих напряжений псевдоморфных слоев $SiGe$ в Si ; самоорганизованное формирование квантовых точек Ge и (или) $GeAs$ в слоях $SiGe$ сплавов и SiO_2 . Разработана модель формирования треков в кристаллах полупроводников при прохождении тяжелых ионов высоких энергий. Предложен механизм примесно-дефектных реакций в Si и $SiGe$, учитывающий формирование подвижных вакансионно-примесных комплексов. Разработан и апробирован метод роста релаксированных эпитаксиальных слоев $SiGe/Si$ с низкой плотностью ростовых дислокаций менее 10^4 - 10^6 см⁻². Разработан метод формирования нанокристаллов Ge в тонких слоях SiO_2 , приводящих к гистерезису C-V характеристик структур.

Область применения результатов: физика полупроводников, материаловедение, технология полупроводниковой электроники, наноэлектроника, физика и технология квантоворазмерных структур.

SUMMARY

GAIDUK PETER IVANOVICH

Processes of low-dimension structure formation in materials of solid-state electronics during ion-beam treatments

Key words: *Ion implantation, pulsed annealing, epitaxy, semiconductors, silicides, electron microscopy, structural defects, diffusion, quantum dots, self-ordering*

The objects of investigation: surface layers of single-crystalline *Si*, *InP*, *SiGe*, the thin films of *SiO₂*, the metal silicides (*NiSi₂*, *PtSi*, *CoSi₂*, *FeSi₂*, *TiSi₂*), the quantum dots of *Ge* and *GeAs* in *Si*, *SiGe* and *SiO₂* after ion implantation of *As*, *Ge*, *P*, *Co*, *Sn*, *Sb*, *Kr*, *In*, *Xe* or *U*, pulsed annealing, molecular-beam epitaxy.

The subjects of investigation: chemical and phase composition, crystalline defects, surface morphology of samples; structural-phase transformation; the recrystallization in solid and liquid phase; the quantum dot self-ordering; the hetero-epitaxial growth of *SiGe* on *Si*.

The aim of the thesis: to establish the mechanisms of structural-phase transformation and low-dimension structure formation in mentioned subjects during ion implantation, pulsed thermal annealing and MBE growth.

Transmission electron microscopy, Rutherford back-scattering and secondary ion-mass spectrometry, electrophysical and optical measurements were used to investigate structural-phase transformations in the objects during the treatment in nonequilibrium conditions. The following effects were established for the first time: tracks are formed in *InP* and *SiGe* alloy layers after implantation of swift heavy ions; point defects are injected into the bulk as a result of the decay of supersaturated alloys *Si* and *SiGe*; spatial separation of interstitials and vacancies in the field of the strain of pseudomorphic *SiGe/Si* structures; self-assembled formation of quantum dots of *Ge* and (or) *GeAs* in *SiGe* alloy layers and *SiO₂*. A model of track formation in semiconductors during penetration of heavy swift ions is developed. A mechanism of dopant-defect interaction and mobile vacancy-dopant complex formation in heavily doped *Si* and *SiGe* is proposed. A new method for MBE growth of epitaxial *SiGe/Si* layers with dislocation density as low as 10^4 - 10^6 cm⁻² is proposed and developed. A method for nanocrystalline *Ge* formation in thin layers of *SiO₂* is proposed and developed. A hysteresis of CV characteristic is obtained using MOS structures with incorporated *Ge* dots.

The area of the result utilization: semiconductor physics, material science, VLSI technology, nano-electronics, physics and technology of quantum-sized structures.

Подписано в печать 21.03.2005. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Гарнитура Таймс. Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,56. Уч.-изд. л. 2,75.
Тираж 100 экз. Зак. 287.

Отпечатано с готового оригинала-макета заказчика
в Республиканском унитарном предприятии
«Издательский центр Белорусского государственного университета».
ЛП № 02330/0056850 от 30.04.2004.
220030, Минск, ул. Красноармейская, 6.