

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.382 ; 546.281 ; 546.302

КОРОБКО
Александра Олеговна

**ФОРМИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СЛОЕВ
СОЕДИНЕНИЙ КРЕМНИЯ С НИКЕЛЕМ, КОБАЛЬТОМ, ЖЕЛЕЗОМ
И ПАЛЛАДИЕМ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ И ИОННО-
ПЛАЗМЕННЫМ НАНЕСЕНИЕМ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

Минск 2009

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

Научный руководитель: **Достанко Анатолий Павлович**, академик НАН Беларуси, д-р. техн. наук, профессор, зав. кафедрой электронной техники и технологии учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: **Комаров Фадей Фадеевич**, член-корр. НАН Беларуси, д-р. физ.-мат. наук, профессор, зав. лабораторией элионики научно-исследовательского учреждения «НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета

Гулай Анатолий Владимирович, доцент, канд. техн. наук, доцент кафедры интеллектуальных систем учреждения образования «Белорусский национальный технический университет»

Оппонирующая организация: Государственное научное учреждение «Физико-технический институт НАН Беларуси»

Защита состоится «19» ноября 2009 г. в 14⁰⁰ часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, E-mail: dissovet@bsuir.by, тел. 293-89-89.

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Бурное развитие микроэлектроники в последнее десятилетие требует дальнейшего углубления материаловедческих исследований. Для целого ряда научных и прикладных задач особый интерес представляет установление особенностей формирования и свойств соединений кремния с переходными металлами Ni, Co, Fe в виде конгломератов частиц, преципитатов и протяженных слоев силицидов металла на разных уровнях взаимодействия системы: в объеме и на поверхности кремния.

Наиболее перспективным типом токопроводящего материала для современного и будущего поколения микроэлектронных приборов считается моносилицид никеля NiSi, преимущества которого по сравнению с силицидами $TiSi_2$ и $CoSi_2$ в значительной степени нивелируются при повышении температур постсилицидной обработки. Для увеличения температурной стабильности фазы моносилицида никеля применяется легирование соединения металлами, но эти исследования носят фрагментарный характер и не дают четких критериев выбора нужного материала. Ограниченными являются и исследования, направленные на изучение имплантированного ионами Ni, Co и Fe кристаллического кремния, что представляет интерес с целью создания магнитных нанокластеров, а также элементов записи и хранения информации на кремнии для спинтроники.

Проведение исследований материаловедческой направленности, охватывающих технологические этапы формирования, модификации и изучения свойств и процессов, происходящих на поверхности и в объеме кремния, при создании функциональных слоев твердотельных структур на основе соединений кремния с ионами Ni, Co, Fe и силицидов никеля, а также разработка научно обоснованных критериев отбора материалов для увеличения температурной стабильности фазы моносилицида никеля являются актуальными и необходимыми для развития современных технологий микроэлектроники и спинтроники.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Тема диссертационной работы утверждена Советом учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» (протокол № 4 от 22.12.2006 г.) и соответствует подразделам 7.3 «Физические и химические процессы в полупроводниках, тонких слоях и пленках твердого тела и на границах раздела фаз» и 7.5 «Материалы с новыми свойствами, обеспечивающие создание опто-, микро- и нанозлектронных устройств, схмотехнические решения для построения

таких устройств» приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2006 – 2010 гг., утвержденных Постановлением Совета Министров Республики Беларусь 17 мая 2005 г. № 512.

Основные исследования, результаты которых представлены в диссертационной работе, получены при выполнении задания Министерства образования на тему «Исследование парамагнитных и электрических свойств материалов для кремниевой и углеродной электроники» (2006 г., № ГР 2006993), задания Министерства образования на тему «Формирование полислоистых твердотельных структур на поверхности и в приповерхностной области кремния» (2008 г., № ГР 2008538), задания государственной программы «Материалы в технике» МвТ 2.05 «Разработка энерго- и ресурсосберегающих технологий формирования тонкопленочных фотовольтаических структур на основе поликристаллического кремния методами ионно-стимулированного осаждения тонких пленочных слоев» (2006 – 2010 гг., № ГР 2006890), задания Фонда фундаментальных исследований Республики Беларусь на тему «Создание микро- и наноразмерных слоев полислоистых структур и разработка научных основ их применения в элементах силовой электроники и фотовольтаики» (2009 – 2011 гг., № ГР 20091280), а также программы совместных работ БГУИР с УП «Завод «Транзистор» по созданию тонкопленочных кремниевых фотовольтаических структур с контактами на основе силицидов Ni от 26.05.2008 г. и программы совместных работ БГУИР с УП «Завод «Транзистор» по исследованию диодов Шоттки с барьерами на основе силицидов Ni и Co от 12.04.2007 г.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы являлось создание функциональных микро- и наноразмерных слоев с заданными свойствами в твердотельных структурах путем модификации монокристаллического кремния металлами Ni, Co, Fe и Pd с помощью методов ионной имплантации и ионно-плазменного нанесения для интеграции изделий микроэлектроники и спинтроники.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Формирование слоев соединений кремния с Ni, Co, Fe, обладающих различными магнитными свойствами, в объеме монокристаллического кремния ионной имплантацией.

2. Разработка технологии формирования силицидов никеля и никеля, легированного Pd, на поверхности кремния ионно-плазменным нанесением с последующей термической обработкой.

3. Определение закономерностей формирования аморфной фазы и накопления парамагнитных центров, а также изучение особенностей магнитных свойств имплантированного ионами Ni, Co, Fe кремния.

4. Проведение анализа влияния легирующих добавок на изменение морфологии поверхности и температурную стабильность фазы моносилцида никеля в расширенном температурном диапазоне до 900 °С.

5. Установление влияния температуры отжига на структурные, фазовые, электрофизические характеристики в силицидах никеля и никеля, легированного Pd, в процессе твердофазного синтеза.

6. Создание структур диодов Шоттки и кремниевых фотовольтаических структур с применением силицидов никеля и никеля, легированного Pd, в качестве барьерного слоя и контактов соответственно.

Объектом исследования являлись функциональные слои соединений монокристаллического кремния с металлами Ni, Co, Fe и Pd, сформированные методами ионной имплантации и ионно-плазменного нанесения. Предметом исследования являлись структура, фазовый и элементный состав, температурная стабильность, магнитные и электрофизические свойства сформированных микро- и наноразмерных слоев кремниевых твердотельных структур в зависимости от метода и режимов их получения.

Положения, выносимые на защиту

1. Установленные особенности влияния имплантированных примесей Ni, Co, Fe на магнитные характеристики аморфных областей в объеме монокристаллического кремния, заключающиеся в обнаружении:

– магнитного гистерезиса широкой линии сигнала электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) от ферромагнитных примесей Ni, Co, Fe, а также линии сигнала ЭПР от оборванных Si–Si связей, свидетельствующего о возможности намагничивания и размагничивания областей имплантированного кремния;

– анизотропии значений ширины линии сигнала ЭПР и g -фактора от оборванных Si—Si связей ($g = 2,0056\text{--}2,0061 \pm 0,00005$) в зависимости от ориентации образца в магнитном поле и его отличия от g -фактора аморфного кремния ($g_a = 2,0055 \pm 0,00005$) за счет изменения локальной относительной магнитной проницаемости μ_r имплантированных областей кремния, что перспективно для применения в ячейках памяти в спинтронике.

2. Экспериментально установленное влияние легирующей добавки Pd (10 ат. %) на фазовый состав, структуру и электрофизические характеристики силицидов никеля, заключающееся:

– в сдвиге рамановской частоты колебания пиков первого порядка фазы моносилцида никеля в NiPdSi на 4 см^{-1} в красноволновую область

спектрального диапазона, свидетельствующем об изменении межатомных расстояний в кристаллической решетке соединения, и в появлении новых пиков в рамановском спектре на длинах волн 322 и 434 см⁻¹ за счет композиционной неоднородности, вносимой Pd;

– в сохранении более низкого значения удельного сопротивления для NiPdSi в диапазоне температур 750...850 °С по сравнению с NiSi;

– в увеличении термостабильности фазы моносилцида никеля в NiPdSi до 850 °С, что на 100 °С больше по сравнению с фазой моносилцида никеля в NiSi, что позволяет расширить температурный диапазон применения фазы моносилцида никеля в изделиях интегральной электроники.

3. Экспериментально полученные спектры рамановского рассеяния для образцов NiPdSi в диапазоне температур -190 ... +290 °С и результаты анализа, показывающие, что с увеличением температуры помимо основного вклада в уменьшение частоты колебаний пиков первого порядка фазы моносилцида никеля за счет распада центрального фона на низкоэнергетичные фононы впервые установлено, что вносит вклад и термическое расширение кристаллической решетки соединения.

4. Методика выбора легирующих добавок, увеличивающих термостабильность фазы моносилцида никеля, на основе рассчитанных с помощью модели Миедема теплот образования фазы моносилцида никеля в силицидах никеля, легированных Pd, V, Zr, Pt+V, Mo, W, что позволяет заранее прогнозировать эффективность легирующей добавки.

5. Разработанные методы формирования легированных силицидов никеля и их практическое применение в качестве контактов к тонкопленочным кремниевым фотовольтаическим структурам, а также в качестве барьерных слоев для диодов Шоттки.

Личный вклад соискателя

В диссертации изложены результаты научно-исследовательских работ, выполненных автором лично и в соавторстве. В совместно опубликованных научных работах автору принадлежат: определение режимов формирования и отжига исследуемых слоев, непосредственное участие в проведении экспериментальных исследований; осуществление спектроскопических, структурных, морфологических и электрофизических исследований образцов взаимодополняющими экспериментальными методами; обоснование выбора материалов легирования для увеличения температурной стабильности фазы моносилцида никеля; теоретические расчеты; анализ результатов и формулировка выводов.

Разработка методов создания фотовольтаических структур и диодов Шоттки осуществлялась совместно с НПО «Интеграл».

Апробация результатов диссертации

Основные положения диссертационной работы обсуждались и докладывались на 20 конференциях: Международной конференции «Взаимодействие излучения с веществом» (г. Минск, Беларусь, 2005 г.); Международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела» (г. Минск, Беларусь, 2005 г.); Международной научной конференции «Молодежь в науке» (г. Минск, Беларусь, 2005 г., 2006 г., 2007 г.); XIII-XVI Республиканских научных конференциях аспирантов, магистрантов и студентов «Физика конденсированного состояния» (г. Гродно, Беларусь, 2005 г., 2006 г., 2007 г., 2008 г.); International Conference EUROMAR-2006 (г. Йорк, Великобритания, 2006 г.); XVI Международном совещании «Радиационная физика твердого тела» (г. Севастополь, Украина, 2006 г.); Международных научно-практических конференциях «Современная радиоэлектроника: научные исследования и подготовка кадров» (г. Минск, Беларусь, 2007 г., 2008 г.); XII Международной научно-технической конференции «Современные средства связи» (г. Минск, Беларусь, 2007 г.); V Международной научно-технической конференции «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств» (г. Новополоцк, Беларусь, 2008 г.); 12-th International Conference on Nano Design, Technology and Computer Simulation (г. Минск, Беларусь, 2008 г.); XXI-th International Conference on Raman Spectroscopy (г. Аксбридж, Великобритания, 2008 г.); International Conference on Extended Defects in Semiconductors (г. Пуатье, Франция, 2008 г.); 2-й Международной студенческой научно-технической конференции «Новые направления развития приборостроения» (г. Минск, Беларусь, 2009 г.); 5-й Международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» (г. Севастополь, Украина, 2009 г.).

Опубликованность результатов диссертации

По материалам диссертации опубликовано 28 печатных работ: 9 статей в научных журналах, 12 статей в сборниках материалов международных конференций, 7 тезисов докладов на международных и республиканских конференциях.

Общий объем публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, составляет 6,7 авторских листа, из которых 3,7 авторских листа – статьи в научных журналах.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав с выводами по каждой главе, заключения,

библиографического списка и приложения. В первой главе дан анализ современного состояния проблемы взаимодействия переходных металлов с кремнием, представлены результаты исследований свойств соединений Ni, Co, Fe с кремнием, сформированных методом ионной имплантации, а также описаны преимущества применения силицидов никеля в современных твердотельных структурах. Во второй главе описаны технологии формирования исследуемых соединений и методы, использованные в диссертации для изучения их свойств. В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования методами Резерфордского обратного рассеяния и электронного парамагнитного резонанса особенностей формирования аморфной фазы и парамагнетизма кремния при имплантации ионов Ni, Co и Fe, приведены теоретические расчеты порога аморфизации кремния при имплантации. Четвертая глава содержит результаты теоретических расчетов теплоты образования фазы моносилцида никеля в силицидах никеля с легирующими добавками, стабильных при повышенной температуре, а также разработанную на основании применения модели Миедема и решения уравнения Томаса – Ферми – Дирака методику по повышению температурной стабильности фазы моносилцида никеля путем введения легирующих добавок. Пятая глава представляет собой результаты комплексного исследования физических свойств силицидов никеля и никеля, легированного Pd, сформированных методом магнетронного распыления, а также результаты практического применения барьерных слоев и контактов на основе легированных силицидов никеля в тонкопленочных кремниевых фотовольтаических структурах и барьерах диодов Шоттки. В приложении приведены акты использования результатов диссертации при изготовлении диодов Шоттки и фотовольтаических структур, а также акты использования результатов диссертации в учебном процессе БГУИР.

Общий объем диссертационной работы составляет 138 страниц, из которых 99 страниц основного текста, 28 рисунков на 15 страницах, 7 таблиц на 5 страницах, библиографический список использованных источников из 130 наименований на 11 страницах, список собственных публикаций автора из 28 наименований на 4 страницах и 4 приложения на 4 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во введении и в общей характеристике работы дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, определены цель, направления и задачи исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации результатов диссертации, их опубликованности, а также о структуре и объеме диссертации. Показана необходимость исследования соединений переходных металлов

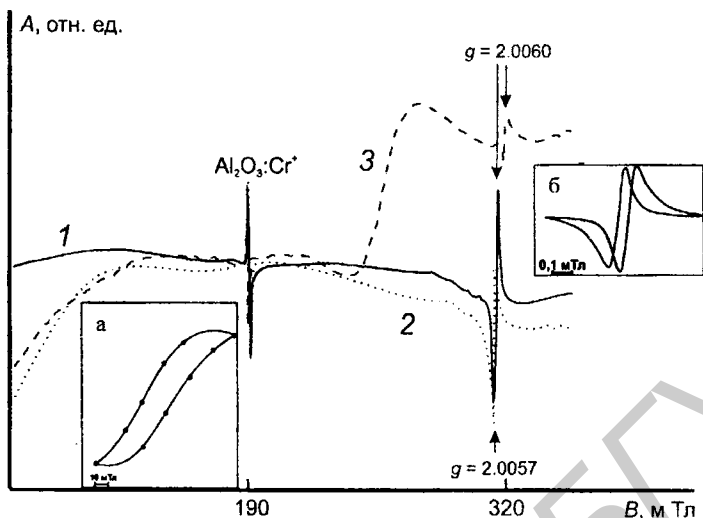
группы железа и палладия с кремнием на разных уровнях взаимодействия системы металл – кремний.

В первой главе диссертации проведен обзор научных публикаций по теме диссертации, проанализированы особенности формирования функциональных слоев соединений металлов с кремнием и определены проблемные области, нуждающиеся в дальнейших исследованиях при формировании слоев соединений кремния с никелем, кобальтом и железом методами ионной имплантации и ионно-плазменного нанесения. Проведенный анализ научно-технической литературы показал, что применение фазы моносилцида никеля NiSi в современных субмикронных технологиях обусловлено его многочисленными преимуществами по сравнению с предыдущим поколением силицидных материалов TiSi₂ и CoSi₂, а именно малым удельным сопротивлением, совместимостью с кремниевой и германо-силицидной технологиями, низкой температурой образования. Показано, что в связи с потребностью в расширении «температурного окна» в технологии постсилицидных обработок изделий интегральной электроники необходимым условием его широкого применения является расширение фазовой и морфологической температурной стабильности моносилцида никеля при повышении температуры обработки, что может быть достигнуто путем легирования силицида никеля, например, палладием. С другой стороны, установлена ограниченность исследований взаимодействия металлов Ni, Co, Fe с кремнием, когда протяженные слои силицидов не образуются и соединения обладают магнитными свойствами, что может быть использовано для реализации задач спинтроники на кремнии.

Во второй главе описаны режимы формирования и отжига полученных слоев соединений металлов Ni, Co, Fe и Pd с кремнием. Отмечено, что для образования слоев соединений металлов Ni, Co, Fe и Pd с кремнием на поверхности и в объеме кремния наибольший практический интерес представляют методы ионной имплантации и магнетронного распыления. Структура, оптические, электрофизические, фазовые и магнитные свойства полученных соединений исследовались методами рамановской спектроскопии, атомно-силовой микроскопии (АСМ), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), измерениями удельного сопротивления и резерфордского обратного рассеяния (РОР). Оценка элементного состава, профиля распределения веществ в силицидах проводилась методом оже-электронной спектроскопии на спектрометре РНІ-660 (Perkin Elmer, США). Имплантация кремния ионами Ni, Co, Fe с различными дозами в диапазоне $3 \cdot 10^{13}$ – $3 \cdot 10^{16}$ см⁻² с энергией 380 кэВ и исследование образцов методом РОР проводились на ускорителе (400 кВ) ROMEО и на ускорителе-тандетроне (3 МВ) JULIA в Университете им. Ф. Шиллера, г. Йена, ФРГ.

Измерения ЭПР выполнялись на спектрометре фирмы «RadioPAN» SE/X 2543, работающем в X-диапазоне (резонатор H_{102}) при частоте модуляции поляризующего магнитного поля 100 кГц; чувствительность спектрометра — $5 \cdot 10^{12}$ спин/мТл. Регистрация сигналов ЭПР осуществлялась при температурах $T = 20^\circ\text{C}$ и $T = -196^\circ\text{C}$. Для формирования пленок силицидов никеля и никеля, легированного палладием, использовался метод магнетронного распыления металлов на постоянном токе с последующим двухступенчатым отжигом в среде азота либо аргона в течение 30 минут при температуре 475°C , а затем в диапазоне температур $600 \dots 900^\circ\text{C}$. Режимы нанесения пленок никеля и никеля, легированного палладием, были следующими: рабочий газ – аргон, остаточное давление в камере $3 \cdot 10^{-3}$ Па, напряжение разряда $U_p = 4,0\text{--}4,4$ кВ, ток разряда $I_p = 2,5$ А, время нанесения 1,5–2,5 мин. Толщина формируемых пленок составляла ~ 100 нм и контролировалась предварительным подбором режимов и времени нанесения пленок на пластины стекла. Исследования образцов методом рамановской спектроскопии проводились в лаборатории «Физики конденсированного состояния и оптоэлектронных свойств» физического факультета Шанхайского университета Дзяо Тонг, г. Шанхай, КНР. Рамановские спектры записывались в геометрии обратного рассеяния $z(x,-)z$ на приборе Jobin Yvon LabRam HR 800UV-VIS-NIR с детектором ANDOR DU420 CCD и возбуждались линией 514,5 нм от аргонового лазера при комнатной температуре. Исследования методами АСМ И СЭМ проводились на приборах NT-206 и JEOL JSM-6460 SEM.

Третья глава диссертации суммирует результаты экспериментальных исследований по изучению структуры и магнитных свойств кремния, имплантированного ионами никеля, кобальта и железа, методами POP и ЭПР. Установлено, что степень аморфизации кремния зависит от дозы имплантации и увеличивается с ростом числа внедренных ионов. Экспериментально обнаружено, что порог аморфизации по данным POP находится в интервале доз $2\text{--}3 \cdot 10^{14}$ см^{-2} для ионов Ni, Co, Fe, внедренных в кремний. Исходя из энергетического критерия аморфизации, рассчитано, что критическая доза аморфизации для кремния, имплантированного ионами Ni, Co, Fe, составляет $\sim 2 \cdot 10^{14}$ см^{-2} , что согласуется с экспериментальными данными, определенными методом POP. Согласно данным проведенного TRIM-моделирования, определено, что средняя проекционная длина пробега ионов Ni, Co, Fe равна 0,32 мкм. Установлено, что g -фактор от оборванных Si—Si связей ($g = 2,0056\text{--}2,0061 \pm 0,00005$) имплантированного ионами никеля, железа и кобальта кремния отличается от g -фактора аморфного кремния ($g_a = 2,0055 \pm 0,00005$), что объясняется влиянием ферромагнитной примеси, а следовательно, изменением относительной магнитной проницаемости μ имплантированного слоя. При развертке поляризующего магнитного поля в



а – гистерезис широкой линии на примере кремния, имплантированного ионами кобальта; б – гистерезис узкой линии на примере кремния, имплантированного ионами никеля

Рисунок 1 – Спектры электронного парамагнитного резонанса кремния, имплантированного ионами никеля (1), кобальта (2) и железа (3)

прямом и обратном направлении обнаружен магнитный гистерезис как широкой квазирезонансной линии ЭПР, так и линии ЭПР от оборванных Si — Si связей (рисунок 1), что доказывает не только сохранение магнитных свойств имплантированных ионов Ni, Co, Fe, но и локальное магнитное упорядочение оборванных связей кремния. Показано, что g -фактор от оборванных связей кремния, имплантированного Ni, Co, Fe, является анизотропной величиной и зависит от разных ориентаций образца в магнитном поле, что дополнительно свидетельствует о способности образцов к намагничиванию и размагничиванию.

Относительная магнитная проницаемость μ_r модифицированного имплантацией слоя кремния определялась из формулы

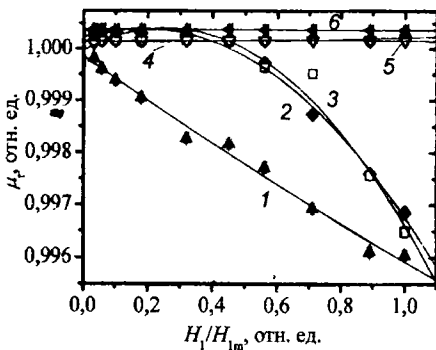
$$\mu_r = \frac{g}{g_a}, \quad (1)$$

где g – g -фактор оборванных Si–Si связей в модифицированном имплантацией кремнии;

g_a – g -фактор аморфного кремния, $g_a = 2,0055 \pm 0,00005$,

которая была получена на основании известного выражения для определения g -фактора спектроскопического расщепления

$$h\nu = g\beta\mu_0\mu_r H \quad (2)$$



Дозы имплантации: 1 – $3 \cdot 10^{16}$; 2 – $3 \cdot 10^{15}$; 3 – 10^{15} ,
4 – $7 \cdot 10^{14}$; 5 – $3 \cdot 10^{14}$; 6 – 10^{14} см^{-2} ; H_{1m} – максимальное
значение H_1 -компоненты СВЧ-поля,

Рисунок 2 – Зависимость относительной магнитной проницаемости μ_r слоя кремния, имплантированного ионами никеля, от мощности зондирующего СВЧ-излучения

ионами никеля, от мощности зондирующего СВЧ-излучения, что представлено на рисунке 2. Показано, что максимальное изменение μ_r происходит при дозах имплантации никеля $1 \cdot 10^{15} - 3 \cdot 10^{16}$ см^{-2} и определяется количеством ферромагнитной примеси никеля, внедренной в кремний.

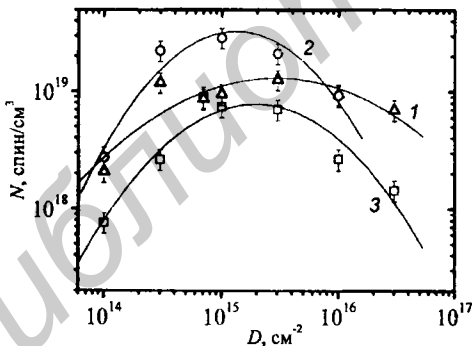


Рисунок 3 – Зависимость концентрации парамагнитных центров аморфного кремния от дозы имплантации для кремния, имплантированного ионами никеля (1), кобальта (2), железа (3)

где h – постоянная Планка, Дж·с;
 ν – резонансная частота, Гц;
 β – магнетон Бора, Дж/Тл;
 μ_0 – магнитная постоянная,
Гн/м;
 H – напряженность магнитного поля, А/м,

и предположении равенства условий наблюдения резонанса для областей аморфного кремния и областей оборванных Si-Si связей в модифицированном имплантацией кремнии.

Экспериментально установлено изменение относительной магнитной проницаемости μ_r слоя кремния, имплантированного

Установлено, что процесс накопления парамагнитных центров в аморфных областях кремния при имплантации ионов Ni, Co, Fe в отличие от известной кинетики накопления дефектов в кремнии не достигает насыщения и имеет максимум в области доз имплантации $7 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{15}$ см^{-2} в зависимости от вида внедренных ионов (рисунок 3). При этом в результате имплантации ионов Ni максимальная концентрация парамагнитных центров аморфных областей (ПЦАО) превышает начальную в шесть

раз, ионов Fe – в девять раз, а для ионов Co – максимальная концентрация химических оборванных связей кремния превышает начальную на порядок. Характерной чертой для трех видов зависимостей концентрации ПЦАО в кремнии является уменьшение числа парамагнитных центров оборванных Si—Si связей при имплантации, начиная с дозы $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Рассчитаны времена спин-спиновой и спин-решеточной релаксации для кремния, имплантированного ионами Ni, Co, Fe.

Четвертая глава содержит расчетную схему для определения теплоты образования фазы моносилцида никеля в силицидах никеля с легирующими добавками на основе применения модели Миедема и уравнений Томаса – Ферми – Дирака.

Полуэмпирическая модель Миедема позволяет осуществить прямой расчет теплоты образования жидких и твердых сплавов, содержащих атомы как переходных, так и непереходных металлов с использованием макроскопической модели атома. В модели Миедема каждый атом описывается двумя параметрами: химическим потенциалом ϕ^* и усредненной электронной плотностью по поверхности ячейки Вигнера – Зейтца $n_{WS}^{1/3}$. Для получения значений теплоты образования осуществлен расчет новых значений электронной плотности и верифицированы значения $n_{WS}^{1/3}$, экспериментально полученные Миедемом. Показано, что рассчитанные значения электронной плотности металлов совпадают с известными значениями электронной плотности с точностью 0,5 – 6,2 %. Это свидетельствует о том, что при проведении научного поиска перспективных материалов, повышающих температурную стабильность фазы моносилцида никеля, становится возможным опустить этап экспериментального определения плотности электронов на границе ячейки Вигнера-Зейтца и заменить его расчетным экспериментом, что позволит сэкономить временные и материальные затраты на проведение эксперимента.

В таблице 1 представлены результаты расчета теплоты образования фазы моносилцида никеля в легированных силицидах. Установлено, что наиболее отрицательное значение теплоты образования – 96,68 кДж/моль достигается при легировании силицида никеля 10 ат. % Pd, что на 4 кДж/моль меньше теплоты образования фазы моноси-

Таблица 1 – Результаты расчета теплоты образования фазы моносилцида никеля при различном легировании

Соединение	ΔH , кДж/моль
NiSi	-92,65
Ni _{0,9} Pd _{0,1} Si	-96,68
Ni _{0,9} Pt _{0,1} Si	-95,57
Ni _{0,9} Zr _{0,1} Si	-95,35
Ni _{0,9} Mo _{0,1} Si	-90,46
Ni _{0,9} W _{0,1} Si	-82,05
Ni _{0,93} V _{0,07} Si	-90,93
Ni _{0,83} Pt _{0,1} V _{0,07} Si	-94,78

лицида никеля в NiSi. На основании проведенных расчетов разработана методика по выбору легирующих добавок для повышения температурной стабильности фазы моносилцида никеля.

В пятой главе представлены результаты экспериментального

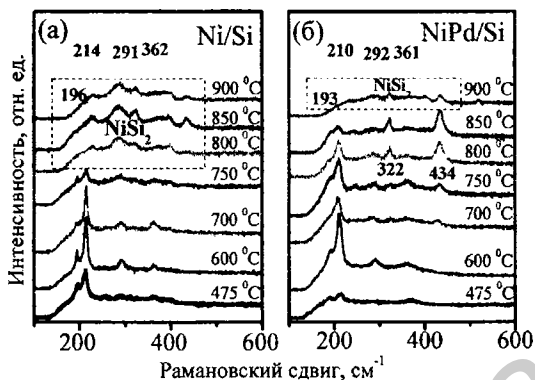


Рисунок 4 – Рамановские спектры отожженных при разных температурах пленок (а) Ni и (б) NiPd на кремнии

исследования свойств силицидов никеля и никеля, легированного Pd, методами рамановской и оже-электронной спектроскопии, АСМ и СЭМ, а также четырехзондовым методом определения удельного сопротивления. Проведено сравнение рамановских спектров для NiPdSi и NiSi, характеризующее этапы трансформации фазы моносилцида никеля в дисилицид никеля. На основе изучения рамановских спектров для пленок NiPdSi при различных температурах (рисунок 4) установлен сдвиг фазового перехода NiSi–NiSi₂ до температуры $T=900\text{ }^{\circ}\text{C}$ при добавлении в состав силицида никеля 10 ат. % палладия, тогда как аналогичный переход в нелегированных силицидах никеля наблюдается в эксперименте при температуре $T=800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Выявлен сдвиг частоты колебания фонных пиков первого порядка на длинах волн 196 и 214 см^{-1} до 193 и 210 см^{-1} в красноволновую область спектрального диапазона при комнатной температуре для пленок NiPdSi, что объяснено присутствием палладия и его влиянием на кристаллическую структуру пленки, а именно, увеличением межатомного расстояния в решетке силицида никеля.

Впервые на основе выявленных дополнительных пиков рамановского рассеяния на длинах волн 322 и 434 см^{-1} для пленок NiPdSi, отожженных при температурах 700 $^{\circ}\text{C}$ и выше, обнаружено разупорядочение структуры фазы моносилцида никеля, что объяснено неоднородностью состава пленки при внесении Pd.

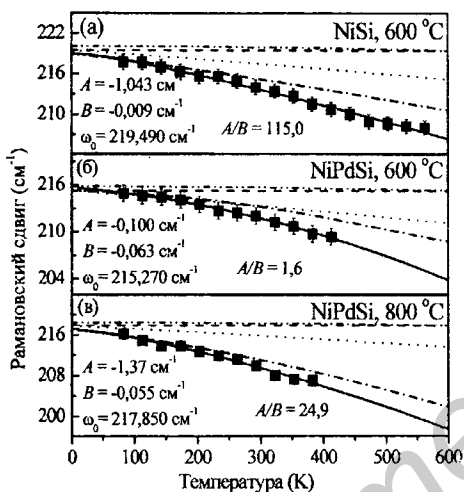
Проведено сравнение рамановских спектров для NiPdSi и NiSi с целью установления зависимости частоты колебаний пиков первого порядка от температуры. Экспериментально установлено, что с увеличением температуры

исследования свойств силицидов никеля и никеля, легированного Pd, методами рамановской и оже-электронной спектроскопии, АСМ и СЭМ, а также четырехзондовым методом определения удельного сопротивления.

Проведено сравнение рамановских спектров для NiPdSi и NiSi, характеризующее этапы трансформации фазы моносилцида никеля в дисилицид никеля. На основе изучения

измерений в диапазоне $-190 \dots +290 \text{ }^\circ\text{C}$ полный сдвиг частоты фононных колебаний наиболее интенсивных пиков на длинах волн 214 см^{-1} для NiSi и 210 см^{-1} для NiPdSi является меньшим на 4 см^{-1} для NiPdSi.

При использовании уравнения температурной зависимости частоты колебаний фононов, проведены оценки вкладов различных составляющих, приводящих к уменьшению частоты колебаний фононов с увеличением температуры для пленок силицидов никеля и никеля, легированного Pd



■ – экспериментальные данные. Сплошные линии представляют собой теоретическое моделирование при учете вкладов:

- ω_0 (пунктирные линии); $\omega_0 + \Delta\omega_d$ (точка-пунктирные линии); $\omega_0 + \Delta\omega_e$ (точечные линии); $\omega_0 + \Delta\omega_s$ (две точки-пунктирные линии)

Рисунок 5 – Температурная зависимость положения рамановских пиков в пленках NiSi (а) и NiPdSi (б), сформированных при $600 \text{ }^\circ\text{C}$, и NiPdSi (в), сформированных при $800 \text{ }^\circ\text{C}$, соответственно

силицида согласно экспоненциальному закону, достигая равновесной концентрации $\sim 4 \text{ ат. } \%$ в слое силицида при $T = 750 \text{ }^\circ\text{C}$ и выше. Обнаружено, что помимо стехиометрических фаз силицида в данных условиях формирования силицидов никеля наблюдается выпадение фазы чистого никеля на поверхности силицида, то есть имеется незначительное преобладание металлической фазы в процессе формирования силицида никеля.

(рисунок 5). При оценке учитывалось, что ω_0 – вклад гармонической частоты колебаний фононов решетки для оптической моды, $\Delta\omega_d(T)$ – вклад ангармонического взаимодействия фононов с фононами других ветвей, $\Delta\omega_e(T)$ – вклад, описывающий термическое расширение кристаллической решетки силицида или изменение объема, $\Delta\omega_s(T)$ – вклад, соответствующий термическому рассогласованию решеток силицида и кремниевой подложки. Определено, что доминирующим вкладом в уменьшение частоты колебаний фононного пика с увеличением температуры является распад центрального оптического фонона на два или три более слабых фонона, а также влияние термического расширения кристаллической решетки соединения.

Установлено, что с увеличением температуры отжига Pd распределяется по объему слоя

закону, достигая равновесной концентрации $\sim 4 \text{ ат. } \%$ в слое силицида при $T = 750 \text{ }^\circ\text{C}$ и выше. Обнаружено, что помимо стехиометрических фаз силицида в данных условиях формирования силицидов никеля наблюдается выпадение фазы чистого никеля на поверхности силицида, то есть имеется незначительное преобладание металлической фазы в процессе формирования силицида никеля.

Установлено, что наименьшее удельное сопротивление обнаружено для пленок силицида никеля при температурах отжига до 750 °С. Добавление палладия в состав силицида никеля приводит к несколько большему значению удельного сопротивления образца. Однако при температурах отжига выше 750 °С оно сохраняется постоянным и более низким вплоть до температуры фазового перехода при 900 °С, что свидетельствует о предпочтительном применении силицида никеля, легированного Pd, как материала с более низким удельным сопротивлением в расширенном диапазоне температур.

С помощью методов СЭМ и АСМ было показано, что поверхностная структура фазы моносилицида никеля в случае добавления легирующей добавки Pd является более однородной и мелкозернистой с размером зерен 100 нм, т.е. степень шероховатости поверхности в 2–4 раза меньше, чем для силицида никеля.

Для оценки новых возможностей применения силицидов никеля на предприятиях Республики Беларусь совместно с УП «Завод «Транзистор» изготовлена экспериментальная партия тонкопленочных фотовольтаических структур на основе слоев поликристаллического кремния с контактами из силицидов никеля. Их коэффициент полезного действия в условиях средней освещенности на территории Республики Беларусь составил 8 %, что сравнимо с мировыми результатами (8–9 %) для фотовольтаических структур данного класса. Сформирована также экспериментальная партия диодов Шоттки с барьерами на основе силицидов никеля и никеля, легированного Pd. Экспериментально установлено, что введение в пленку никеля 10 ат. % Pd позволяет увеличить высоту барьера Шоттки на 0,03 В.

В **приложении** представлены акты об использовании результатов диссертации при создании диодов Шоттки и кремниевых фотовольтаических структур на УП «Завод «Транзистор» и акты внедрения в учебный процесс БГУИР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Сформированы методами ионной имплантации и ионно-плазменного нанесения и изучены функциональные слои в системе металл – кремний: имплантированные слои Ni, Co, Fe в объеме монокристаллического кремния (глубина залегания 0,31-0,35 мкм), обладающие различными магнитными свойствами и перспективные для использования в структурах памяти в спинтронике, и силициды никеля и никеля, легированного Pd, на поверхности кремния (толщина пленки металла 0,1 мкм), выполняющие функции контактов

к тонкопленочным кремниевым фотовольтаическим структурам и барьерных слоев в диодах Шоттки [2-А, 4-А, 7-А, 15-А].

2. На основе измерения параметров электронного парамагнитного резонанса в кремнии, имплантированном ионами Ni, Co, Fe, показано, что g -фактор от оборванных Si—Si связей кремния является анизотропной величиной ($g = 2,0056-2,0061 \pm 0,00005$) и превышает значение g -фактора аморфного кремния ($g_a = 2,0055 \pm 0,00005$). Обнаружен магнитный гистерезис как широкой линии ЭПР от ферромагнитных атомов, так и линии ЭПР от аморфного кремния, что свидетельствует о возможности намагничивания и размагничивания имплантированного кремния. Для слоя кремния, модифицированного имплантацией ионов Ni, выявлено изменение относительной магнитной проницаемости μ в зависимости от мощности зондирующего СВЧ-излучения вследствие влияния ферромагнитной примеси, и рассчитана ее величина [2-А, 3-А, 4-А, 25-А, 12-А, 13-А, 23-А].

3. Установлено, что процесс накопления парамагнитных центров в аморфных областях кремния при имплантации ионов Ni, Co, Fe в отличие от известной кинетики накопления дефектов в кремнии не достигает насыщения и имеет максимум в области доз имплантации $7 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ в зависимости от вида внедренных ионов. Данный механизм накопления зависит от локализации внедренных ионов группы железа на оборванных связях кремния в результате разупорядочения решетки. В результате теоретических расчетов и полученных экспериментальных данных ЭПР и ПОР установлено, что кинетика процесса аморфизации кремния при имплантации ионов Ni, Co, Fe отличается, и порогом аморфизации является доза имплантации $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ [1-А, 14-А, 3-А, 4-А, 5-А, 6-А, 10-А, 11-А, 12-А, 24-А, 22-А, 26-А].

4. Экспериментально с помощью методов рамановской и оже-спектроскопии, измерений удельного электрического сопротивления показано, что легирование силицида никеля (10 ат. % добавки Pd) приводит к увеличению температурной стабильности фазы моносилицида никеля до $850 \text{ }^\circ\text{C}$, что на $100 \text{ }^\circ\text{C}$ больше, чем у силицида никеля NiSi. При этом из анализа рамановских спектров обнаружено, что наличие Pd создает сдвиг частоты колебаний фононных пиков первого порядка фазы моносилицида никеля в красноволновую область диапазона на 4 см^{-1} . Появление новых, неизвестных ранее, пиков на длинах волн 322 и 434 см^{-1} при увеличении температуры отжига свидетельствует о возникновении композиционной неоднородности в модифицированном силициде никеля [8-А, 17-А, 20-А, 21-А, 27-А].

5. Методом рамановской спектроскопии впервые установлено и подтверждено расчетом, что с увеличением температуры в диапазоне $-190 \dots +290 \text{ }^\circ\text{C}$ происходит уменьшение частоты фононных колебаний пиков первого порядка в легированном силициде никеля NiPdSi. Это обуславливается

процессом ангармонического распада фононов и влиянием термического расширения кристаллической решетки силицида [8-А, 16-А, 18-А].

6. Впервые рассчитаны значения теплоты образования фазы моносилицида никеля в силицидах NiPdSi, NiVSi, NiZrSi, NiPtVSi, NiMoSi, NiWSi в соответствии с полуэмпирической моделью Миедема. Как установлено, добавление Pd приводит к получению наименьшего значения теплоты образования фазы моносилицида никеля, что является наиболее энергетически выгодным. Рассчитаны значения электронной плотности на границе ячейки Вигнера – Зейтца при помощи уравнений Томаса – Ферми – Дирака, и показано, что расчетные значения совпадают с экспериментально полученными значениями с точностью до 0,5–6,2 %, что позволяет заменить дорогостоящие экспериментальные оценки теоретическими расчетами. Предложена методика выбора легирующих добавок, перспективных для увеличения термостабильности фазы моносилицида никеля [9-А, 19-А, 28-А].

7. С использованием полученных результатов экспериментально апробировано в производственных условиях формирование структур диодов Шоттки и фотовольтаических структур с применением силицидов никеля и никеля, легированного Pd, в качестве барьерного слоя и контактов соответственно [7-А, 15-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Разработана методика формирования термостабильных легированных силицидов никеля, которые могут быть использованы в качестве материалов контактов и межсоединениях в изделиях интегральной электроники в расширенном температурном диапазоне до 850 °С [8-А, 9-А, 20-А].

2. По разработанному технологическому маршруту на УП «Завод «Транзистор» изготовлены экспериментальные партии диодов Шоттки и тонкопленочных фотовольтаических структур, базирующихся на металлизации на основе силицидов никеля [7-А, 15-А].

3. Соединения кремния с имплантированными ионами никеля, кобальта и железа могут быть применены при разработке ячеек магнитной памяти в кремнии, в которых состоянию, аналогичному передаче сигнала «1», соответствует поворот спинов при подаче поля в прямом направлении, а сигналу «0» – подача поля в обратном направлении, что перспективно для интеграции изделий спинтроники и микроэлектроники [2-А, 4-А].

4. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1-А. Коробко, А.О. Особенности образования аморфной фазы в монокристаллическом кремнии, имплантированном ионами группы железа / А.О. Коробко, М.И. Сушко // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сeryя фізіка-тэхнічных навук. – 2005. – № 5. – С. 77–80.

2-А. Коробко, А.О. О формировании магнитного упорядочения кристаллического кремния в результате имплантации ионов кобальта / А.О. Коробко, Н.М. Лапчук, Е.Н. Шумская // Вестник Белорусского государственного университета. Серия 1. – 2005. – № 3. – С. 48–53.

3-А. Коробко, А.О. Парамагнитные центры в облученном ионами железа и никеля кремнии / А.О. Коробко // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сeryя фізіка-тэхнічных навук. – 2006. – № 5. – С. 44–46.

4-А. Poklonski, N.A. Magnetic ordering in crystalline Si implanted with Co ions with intermediate doses / N.A. Poklonski, N.M. Lapchuk, A.O. Korobko // Semiconductors. – 2006. – Vol. 40, № 10. – P. 1151–1154.

5-А. Коробко, А.О. Микроструктура соединений кремния с переходными металлами / А.О. Коробко // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – 2007. – №2. – С. 69–74.

6-А. Достанко, А.П. Парамагнитные свойства монокристаллов кремния, имплантированных переходными металлами группы железа / А.П. Достанко, А.О. Коробко, Н.М. Лапчук // Журнал прикладной спектроскопии. – 2008. – Т. 75, № 2. – С. 197–201.

7-А. Коробко, А.О. Разработка технологических процессов создания солнечных элементов с контактами на основе силицида никеля / А.О. Коробко, Я.А. Соловьёв, О.Л. Кайдов, В.В. Глухманчук, А.П. Достанко // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – 2009. – №4. – С. 61–64.

8-А. Karabko, A.O. Phase Transition and Phonon Dynamics in NiPdSi: An Annealing Study by Temperature-Dependent Raman Spectroscopy / A.O. Karabko, A.P. Dostanko, J.F. Kong, W.Z. Shen // J. Appl. Phys. – 2009. – Vol. 105, № 3. – P. 033518 (1-5).

9-А. Karabko, A.O. Structural changes and peculiarities of NiPdSi formation investigated by Raman and Auger spectroscopy / A.O. Karabko, A.P. Dostanko, J.F. Kong, W.Z. Shen. // Physica status solidi (a). – 2009. – Vol. 206, № 8. – P. 1898–1903.

Статьи в материалах конференций

10-А. Коробко, А.О. Изменение структуры кристаллов кремния *p*-типа при имплантации ионами кобальта с энергией 380 кэВ / А.О. Коробко, Н.М. Лапчук

// Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы VI междунар. конф., Минск, 28-30 сентября 2005 г. / БГУ ; редкол. : В.М. Анищик [и др.]. – Минск, 2005. – С. 123–124.

11-А. Поклонский, Н.А. Парамагнетизм кристаллов р-кремния, имплантированных ионами кобальта / Н.А. Поклонский, Н.М. Лапчук, А.О. Коробко // Актуальные проблемы физики твердого тела (ФГТ-2005) : материалы междунар. науч. конф., Минск, 26-28 ноября 2005 г. : в 2т. / Изд. центр БГУ ; редкол. : Н.М. Олехнович [и др.]. – Минск, 2005. – Т.1. – С. 456–458.

12-А. Коробко, А.О. Структурные изменения в монокристаллическом кремнии, имплантированном ионами группы железа / А.О. Коробко, Н.А. Поклонский, Н.М. Лапчук // НИРС 2005 : сб. работ студентов высших учебных заведений Республики Беларусь / РУМЦ ФВН ; редкол. : А.И. Жук [и др.]. – Минск, 2006. – С. 15–16.

13-А. Поклонский, Н.А. Парамагнетизм кристаллов кремния, модифицированных имплантацией ионов никеля / Н.А. Поклонский, А.О. Коробко, Н.М. Лапчук // Радиационная физика твердого тела: труды XVI междунар. совещания, Севастополь, 3–8 июля 2006 г. / Изд. ГНУ «НИИ ПМТ» ; под ред. Г.Г. Бондаренко (отв. ред.) [и др.]. – М., 2006. – С. 160–166.

14-А. Коробко, А.О. Исследование структурных свойств монокристаллов кремния, имплантированных ионами железа / А.О. Коробко // Современная радиоэлектроника: научные исследования и подготовка кадров : материалы междунар. науч.-практ. конф., Минск, 10-11 апреля 2007 г. : в 4 ч. / МГВРК; под общ. ред. Н. А. Цырельчука. – Минск, 2007. – Ч.1. – С. 160–163.

15-А. Достанко, А.П. Управление высотой барьера диодов Шоттки на основе силицидов никелевых сплавов / А.П. Достанко, Я.А. Соловьев, А.О. Коробко // Современные средства связи : материалы XII междунар. науч.-техн. конф., Минск, 24-28 сентября 2007 г. / БГУИР, ВГСК ; редкол. : М.А. Баркун [и др.]. – Минск, 2007. – С. 44.

16-А. Коробко, А.О. Температурная зависимость спектров комбинационного рассеяния NiPdSi и NiSi / А.О. Коробко, А.П. Достанко, С.М. Завадский // Современная радиоэлектроника: научные исследования и подготовка кадров : материалы междунар. науч.-практ. конф., Минск, 23-24 апреля 2008 г.: в 3 ч. / МГВРК; под общ. ред. Н. А. Цырельчука. – Минск, 2008. – Ч.1. – С. 70–71.

17-А. Коробко, А.О. Анализ особенностей процесса образования силицидов никеля методами рамановской и Оже-спектроскопии / А.О. Коробко, А. П. Достанко, В.А. Ухов, С.М. Завадский // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: материалы V междунар. науч.-техн.

конф., Новополоцк, 29-30 мая 2009 г. / Полоц. гос. ун-т ; под общ. ред. А.П. Достанко [и др.]. – Новополоцк, 2008. – Т. II: Технология. – С. 10–14.

18-А. Karabko, A.O. Micro-Raman investigation of phase transition and vibrational properties in NiPdSi / A.O. Karabko, A.P. Dostanko, J.F. Kong, W.Z. Shen // ICORS-2008 : Proceedings of the XXI st International Conference on Raman Spectroscopy, Uxbridge, West London , 17-22 August, 2008 / IM Publications LLP ; ed. R. Withnall [et al.]. – Uxbridge, 2008. – P. 608–609.

19-А. Karabko, A.O. On the vibrational and structural properties of compositional nickel silicides / A.O. Karabko, A.P. Dostanko, S.M. Zavadsky, J.F. Kong, W.Z. Shen // XII International Workshop on Nano-design, Technology Computer Simulations : Proceedings of NTDS-2008, Minsk 23-27 June, 2008 / BSUIR ; ed. V. Nelayev [et al.]. – Minsk, 2008. – Vol. 12. – P. 156–160.

20-А. Коробко, А. О. Electrical properties of NiPdSi and NiSi / А.О. Коробко // Новые направления развития приборостроения : материалы 2-й междунар. студ. науч.-техн. конф., Минск, 22-24 апреля 2009 г. / БНТУ; под ред. В.Л. Соломахо [и др.]. – Минск, 2009. – С. 169.

21-А. Коробко, А.О. Влияние легирующей добавки Pd на морфологию поверхности силицида никеля / А.О. Коробко // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций (РТ-2009): материалы 5-й междунар. молодежной науч.-техн. конф., Севастополь, 20-25 апреля 2009 г. / Севастопольский нац. технический ун-т : изд-во «Вебер». – Севастополь, 2009. – с. 282.

Тезисы докладов на научных конференциях

22-А. Коробко, А.О. Исследование структуры кристаллов кремния, имплантированных ионами кобальта / А.О. Коробко // Физика конденсированного состояния: тезисы докл. XIII Респ. науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 26-28 апреля 2005 г. / Гродн. гос. ун-т; редкол.: В.А. Лиопо (отв. ред.) [и др.]. – Гродно, 2005. – С. 189–191.

23-А. Коробко, А.О. ЭПР монокристаллического кремния, модифицированного ионной имплантацией ионов никеля / А.О. Коробко // Физика конденсированного состояния: тезисы докл. XIV Респ. науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 26-28 апреля 2006 г. : в 2 ч. / Гродн. гос. ун-т ; редкол. : В.Н. Горбузов (отв. ред.) [и др.]. – Гродно, 2006. – Ч. 1. – С. 198–201.

24-А. Коробко, А.О. О влиянии примесей ионов переходных металлов (Co, Fe, Ni) на аморфизацию кремния / А.О. Коробко // НИРС—2005 : сб. тезисов докл. X Респ. науч. конф. студентов и аспирантов вузов РБ, Минск, 14-16 февраля 2006 г. : в 3 ч. / БГУ ; редкол.: С.К. Рахманов [и др.]. – Минск, 2006. – Ч. 2. – С. 210.

25-A. Karabko, A.O. Paramagnetic activity of monocrystalline silicon implanted with nickel ions / A.O. Karabko, N.A. Poklonski, N.M. Lapchuk // EUROMAR : abstracts of International Conference EUROMAR, York, 16-21 July, 2006 / University of York. – York, 2006. – P. 132.

26-А. Коробко, А.О. Спин-спиновая и спин-решеточная релаксация парамагнитных центров кремния, имплантированного ионами никеля и железа / А.О. Коробко // Физика конденсированного состояния: тезисы докл. XV Респ. науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 25-27 апреля 2007 г. : в 2 ч. / Гродн. гос. ун-т; ред. коллегия: Е.А. Ровба (отв. ред.) [и др.]. – Гродно, 2007. – Ч. 1. – С. 280–284.

27-А. Коробко, А.О. Идентификация фазового перехода в композиционных силицидах никеля методом спектроскопии комбинационного рассеяния / А.О. Коробко // Физика конденсированного состояния: тезисы докл. XVI Респ. науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 23-25 апреля 2008 г. : в 2 ч. / Гродн. гос. ун-т; редкол. : Е.А. Ровба (отв. ред.) [и др.]. – Гродно, 2008. – Ч. 2. – С. 135–137.

28-A. Karabko, A.O. Structural changes and peculiarities of NiPdSi formation investigated by Raman and Auger spectroscopy / A.O. Karabko, A.P. Dostanko, J.F. Kong, W.Z. Shen // Extended defects in Semiconductors : abstracts of International Conference EDS-2008, Poitiers, 14-19 September, 2008 / Futuroscope. – Poitiers, 2008. – P. 4P.



РЭЗЮМЭ

Карабка Аляксандра Алегаўна

Фарміраванне функцыянальных слаёў злучэнняў крэмнія з нікелем, кобальтам, жалезам і паладыем іоннай імплантацыяй і іонна-плазменным нанясеннем

Ключавыя словы: крэмній, іоны Ni, Co, Fe, сіліцыд нікелю, парамагнетызм, тэрмічны адпал, мадэль Міедэма, цяплыня ўтварэння, тэрмастабільнасць.

Мэта работы заключаецца ў стварэнні функцыянальных мікра- і нанаразмерных слаёў з дадзенымі якасцямі цвёрдацельных структур шляхам мадыфікацыі монакрышталічнага крэмнію металамі Ni, Co, Fe і Pd з дапамогай метадаў іоннай імплантацыі і іонна-плазменнага нанясення для інтэграцыі вырабаў мікраэлектронікі і спінтронікі.

Атрыманя вынікі і іх навізна: З дапамогай метада электроннага парамагнітнага рэзанансу знойдзена змяненне адноснай магнітнай пранікальнасці μ слоя крэмнію, мадыфікаванага імплантацыяй іонаў нікелю, у залежнасці ад магутнасці зандзіруючага ЗВЧ-выпраменьвання з прычыны ўплыву ферамагнітнага дамешку, і падлічана яе велічыня. Паказана, што g -фактар ад абарваных Si—Si сувязей крэмнію, імплантаванага іонамі Ni, Co, Fe, з'яўляецца анізатропнай велічынёй ($g = 2,0056\text{--}2,0061 \pm 0,00005$) і надвышае значэнне g -фактару аморфнага крэмнію ($g_a = 2,0055 \pm 0,00005$). Устаноўлена, што дадатак 10 ат. % легіруючай дабаўкі паладыю ў склад сіліцыду нікелю прыводзіць да павялічэння тэрмастабільнасці фазы монасіліцыду нікелю да 850 °С, што на 100 °С болей, чым у сіліцыду нікелю. Метадам раманаўскай спектраскапіі ўстаноўлена і пацверджана разлікам, што са змяненнем тэмпературы адбываецца памяншэнне частаты фанонных ваганняў пікаў першага парадку ў NiPdSi і NiSi, што абумоўлена працэсам ангарманічнага распаду фонаў і ўплывам тэрмічнага пашырэння крышталічнай рашоткі сіліцыду. Разлічаны значэнні цяплыні ўтварэння легіраваных сіліцыдаў NiPdSi, NiVSi, NiZrSi, NiPtVSi, NiMoSi, NiWSi у суадносінах з паўэмпірычнай мадэлю Міедэма і ўстаноўлена, што дадатак Pd прыводзіць да атрымання найменшага значэння цяплыні ўтварэння фазы монасіліцыду нікелю. Прапанавана метадыка выбару легіруючых металаў, перспектыўных для павялічэння тэрмастабільнасці фазы монасіліцыду нікелю.

Ступень выкарыстання: вынікі дысертацыйнай работы выкарыстаны пры стварэнні эксперыментальнай партыі дыёдаў Шотткі і фотавальтаічных структур на аснове кантактаў з сіліцыдаў нікелю, а таксама ўкаранены ў навучальным працэсе Беларускага дзяржаўнага ўніверсітэту інфарматыкі і радыёэлектронікі.

Вобласць выкарыстання: мікра- і нанаэлектроніка.

РЕЗЮМЕ

КОРОБКО Александра Олеговна

Формирование функциональных слоев соединений кремния с никелем, кобальтом, железом и палладием ионной имплантацией и ионно-плазменным нанесением

Ключевые слова: кремний, ионы Ni, Co, Fe, силицид никеля, парамагнетизм, термический отжиг, модель Миедема, теплота образования, термостабильность

Цель работы заключается в создании функциональных микро- и наноразмерных слоев с заданными свойствами в твердотельных структурах путем модификации монокристаллического кремния металлами Ni, Co, Fe и Pd с помощью методов ионной имплантации и ионно-плазменного нанесения для интеграции изделий микроэлектроники и спинтроники.

Полученные результаты и их новизна: Методом электронного парамагнитного резонанса выявлено изменение относительной магнитной проницаемости μ_r слоя кремния, модифицированного имплантацией ионов никеля, в зависимости от мощности зондирующего СВЧ-излучения вследствие влияния ферромагнитной примеси, и рассчитана ее величина. Показано, что g -фактор от оборванных Si—Si связей кремния, имплантированного ионами Ni, Co, Fe, является анизотропной величиной ($g = 2,0056-2,0061 \pm 0,00005$) и превышает значение g -фактора аморфного кремния ($g_a = 2,0055 \pm 0,00005$). Установлено, что добавление 10 ат. % примеси палладия в состав силицида никеля приводит к увеличению термостабильности фазы моносилицида никеля до 850 °С, что на 100 °С больше, чем у силицида никеля. Методом рамановской спектроскопии установлено и подтверждено расчетом, что с увеличением температуры происходит уменьшение частоты фононных колебаний пиков первого порядка в NiPdSi и NiSi, что обуславливается процессом ангармонического распада фононов и влиянием термического расширения кристаллической решетки силицида. Рассчитаны значения теплоты образования легированных силицидов NiPdSi, NiVSi, NiZrSi, NiPtVSi, NiMoSi, NiWSi в соответствии с полуэмпирической моделью Миедема и установлено, что добавление Pd приводит к получению наименьшего значения теплоты образования фазы моносилицида никеля. Предложена методика выбора легирующих добавок металлов, перспективных для увеличения термостабильности фазы моносилицида никеля.

Степень использования: результаты диссертационной работы использованы при создании экспериментальных партий диодов Шоттки и фотовольтаических структур на основе контактов с силицидами никеля, а также внедрены в учебный процесс Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Область применения: микро- и нанoeлектроника.

SUMMARY

Karabko Aliaksandra Alegauna

Formation of functional layers of silicon with nickel, cobalt, iron and palladium compounds by means of ion implantation and ion-plasma deposition

Keywords: silicon, Ni, Co, Fe, nickel silicide, paramagnetism, thermal annealing, Miedema's model, heat of formation, thermal stability.

The aim consists in creation of functional micro- and nanosized layers with given properties in solid state structures by modifying the single crystal silicon by Ni, Co, Fe and Pd metals by means of ion implantation and ion-plasma deposition for integration of microelectronics and spintronics wares.

The results obtained and their novelty: By means of electron paramagnetic resonance the change of the magnetic permeability μ_t of silicon layer, modified by implantation of nickel ions, has been found to depend on probing UHF-radiation due to the influence of ferromagnetic additives and its value has been calculated. It has been shown that g -factor from the broken Si—Si bonds of silicon, implanted by Ni, Co, Fe, is an anisotropic value ($g = 2,0056 - 2,0061 \pm 0,00005$) and overcomes the value of g -factor of amorphous silicon ($g_a = 2,0055 \pm 0,00005$). It was found that the addition of 10 at. % of Pd in nickel silicide content leads to the enhancement of the thermal stability of nickel monosilicide phase up to 850 °C which is 100 °C more than that for NiSi. By means of Raman spectroscopy it was found and proved by calculations that with the increase of measuring temperatures the decrease in the frequency of phonon vibrations for the first order peaks of the alloyed nickel silicide NiPdSi is seen due to the process of the anharmonic decay and the impact of the thermal expansion of the crystalline lattice of the compound. The values of the heat of formation of alloyed nickel silicides NiPdSi, NiVSi, NiZrSi, NiPtVSi, NiMoSi, NiWSi are calculated in accordance with the semiempirical Miedema's model and it was found that the addition of Pd results in the lower value of the heat of formation of nickel monosilicide phase. The technique of choosing the additives which can enhance the thermal stability of nickel monosilicide phase is proposed.

Extent of usage: the results of the thesis have been applied to the formation of experimental samples of Schottky diodes and photovoltaic structures based on nickel silicides, and also have been implemented in the studying process of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Field of application: micro- and nanoelectronics.

Научное издание

КОРОБКО АЛЕКСАНДРА ОЛЕГОВНА

**ФОРМИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СЛОЕВ
СОЕДИНЕНИЙ КРЕМНИЯ С НИКЕЛЕМ, КОБАЛЬТОМ, ЖЕЛЕЗОМ
И ПАЛЛАДИЕМ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ И ИОННО-
ПЛАЗМЕННЫМ НАНЕСЕНИЕМ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

Подписано в печать 12.10.2009.	Формат 60x84 ¹ / ₁₆ .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,5.	Тираж 60 экз.	Заказ 655.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровки, 6.