

АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
НПО «ФИЗИКА-СОЛНЦЕ» им. С.А.АЗИМОВА
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. С.В.СТАРОДУБЦЕВА

На правах рукописи
УДК 621. 315. 592.

МАВЛОНОВ ГИЁСИДДИН ХАЙДАРОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ
КРЕМНИЯ С НАНОКЛАСТЕРАМИ АТОМОВ МАРГАНЦА

01.04.10 - физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Ташкент 2010

Работа выполнена на кафедре «Электроника и микроэлектроника» Ташкентского государственного технического университета имени Абу Райхана Беруни.

Научный руководитель : кандидат физико-математических наук, доцент
Аюпов Кутуб Саутович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Мирсагатов Шавкат Акрамович

кандидат физико-математических наук, доцент
Назыров Дилшод Эргашевич

Ведущая организация: Самаркандский государственный университет

Защита состоится «__»_____ 2010 года в ____ часов на заседании Специализированного Совета Д.015.08.01 при Физико-техническом институте НПО «Физика-Солнце» им. академика С.А.Азимова АН РУз по адресу: 100084, г.Ташкент, ул. Г. Бодомзор йули, 2^Б. Тел. (871) 233-12-71, Факс (871) 235-42-91, E-mail:karimov@physic.uzsci.net

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технического института НПО «Физика-Солнце» АН РУз.

Автореферат разослан «____» _____ 2010 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по выше указанному адресу на имя ученого секретаря Специализированного Совета.

Ученый секретарь
Специализированного Совета
д.ф-м.н., профессор

А.В. Каримов

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность работы. Формирование нанокластеров примесных атомов в кристаллической решетке полупроводников, с управляемой концентрацией и структурой является принципиально новым подходом в получении наноразмерных структур. В отличие от существующих способов создания наноразмерных структур с помощью дорогостоящего оборудования в процессе сложных технологических операций, наш способ формирования нанокластеров примесных атомов обладает рядом преимуществ: возможностью создания наноразмерных структур по всему объему кристалла, управления их размером и структурой, а также возможностью создания магнитных и многозарядных нанокластеров.

До настоящего времени практически не исследованы возможности формирования многозарядных нанокластеров в полупроводниках и свойства таких материалов. Формирование магнитных и многозарядных нанокластеров в решетке полупроводника позволяет раскрыть еще не известные физические особенности и грани таких наноструктур, представляющие большой научный и практический интерес.

Формирование нанокластеров примесных атомов в решетке полупроводника с магнитными моментами и различными зарядовыми состояниями, требует нового технологического и термодинамического подхода к управлению состоянием примесных атомов в решетке. Получение полупроводниковых материалов с многозарядными и магнитными кластерами, это практически новое научное направление позволяющее раскрыть уникальные физические явления с большими функциональными возможностями их практического применения в электронике.

Степень изученности проблемы. Формирование нанокластеров примесных атомов с помощью ионной имплантации, радиации и химических методов, их влияние на свойства материалов, изучается недавно, но достаточно интенсивно [1,2,3]. Однако создание многозарядных и магнитных кластеров методом диффузионного легирования и исследование влияния таких нанокластеров на физические свойства полупроводников еще практически не изучены.

Связь диссертационной работы с тематическими планами НИР.

Диссертационная работа выполнялась на кафедре «Электроника и микроэлектроника» ТашГТУ согласно программе государственного гранта ОТ-Ф2-079 «Исследование термодинамических условий формирования наноразмерных магнитных кластеров в кремнии, изучение магнитных и фотомагнитных свойств материалов и структур, полученных на их основе». 2008-2011 г

Цель диссертационной работы - разработка технологии формирования нанокластеров атомов марганца в решетке кремния с управляемым магнитным моментом и зарядовым состоянием, исследование влияния таких нанокластеров на электрические, магнитные и фотоэлектрические свойства кремния и определение их функциональных возможностей для использования в электронике.

Задачи исследования:

1. Разработать технологию низкотемпературного диффузионного легирования и определить оптимальные термодинамические условия формирования нанокластеров атомов марганца в решетке кремния

2. Исследовать электрофизические свойства кремния с нанокластерами атомов марганца и определить температурную область существования нанокластеров со стабильными параметрами.

3. Исследовать особенности магнитных свойств кремния с нанокластерами атомов марганца. Определить магнитную восприимчивость, намагниченность и магнитный момент в таких материалах. Установить условия обнаружения максимального отрицательного магнитосопротивления и закономерности изменения отрицательного магнитосопротивления в зависимости от параметров материала.

4. Исследовать особенности фотоэлектрических свойств кремния с многозарядными нанокластерами.

5. Определить структуру и состав нанокластеров, а также функциональные возможности использования кремния с нанокластерами атомов марганца.

Объект и предмет исследования. В качестве исследуемого объекта был выбран монокристаллический кремний *p*-типа, марки КДБ с удельными сопротивлениями $\rho=2, 5, 10, 100$ Ом·см. В качестве примеси был выбран марганец, так как марганец обладает уникальной электронной структурой $3d^5 4s^2$, является одним из эффективных парамагнитных атомов, а также химически активно взаимодействует с другими дефектами в решетке. Предметом исследования являются закономерности влияния нанокластеров на электрические, магнитные и фотоэлектрические свойства кремния.

Методы исследования. Структура нанокластеров атомов марганца в Si исследовалась методом электронного парамагнитного резонанса, а также методом атомного силового микроскопа. Электрические свойства таких материалов изучались методом эффекта Холла в широкой области температур, магнитное сопротивление изучалось на специально разработанной установке позволяющей варьировать электрические и магнитные поля, температуру и интенсивность освещения. Фотоэлектрические свойства образцов исследовались на установке ИКС-21, снабженной специальным криостатом, дающим возможность изучения спектральной зависимости фотопроводимости в широком интервале температур, электрического поля, различной интенсивности, фонового и инфракрасно освещения.

Гипотеза исследования. Многозарядные и магнитные нанокластеры примесных атомов - новый вид проявления квантовых точек с особыми характеристиками. В полупроводниковых материалах с такими кластерами должны наблюдаться принципиально новые физические явления, представляющие большой научный и практический интерес. Формирование многозарядных и магнитных нанокластеров с управляемыми параметрами требует принципиально новых технологических решений.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Научно обоснованная возможность образования нанокластеров атомов марганца в решетке кремния и практическое осуществление управления их зарядовым состоянием в интервале $[(Mn)_4^{+4}, B^{-1}]^{+3} \div [(Mn)_4^{+8}, B^{-1}]^{+7}$.

2. Методика получения полупроводникового материала-кремния с нанокластерами атомов марганца в многозарядном состоянии с концентрацией от $5 \cdot 10^{13}$ до $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

3. Обнаруженный высокотемпературный эффект аномально большого отрицательного магнитосопротивления в кремнии в диапазоне температур от 230 К до 300 К, связанный с магнитными кластерами атомов марганца, значение, которого меняется до $\Delta\rho/\rho=300\%$.

4. Фотоэлектрические и электрофизические свойства кремния с многозарядными нанокластерами создающими энергетическую полосу в запрещенной зоне кремния с шириной $\Delta E=(E_v+0,42)\div(E_c-0,4)$ эВ и обеспечивающими гигантскую примесную фотопроводимость в области длин волн $\lambda=1,5\div 8$ мкм.

Научная новизна исследования:

1. Определены и научно обоснованы оптимальные технологические режимы формирования нанокластеров атомов марганца в решетке кремния.

2. Определены магнитный момент, магнитная восприимчивость, намагниченность, а также возможность управления магнитными моментами и кратностью зарядового состояния нанокластеров в кремнии в зависимости от концентрации исходных атомов бора.

3. Впервые показана возможность получения кремния с многозарядными центрами, как материала нового класса электроники с наноразмерными структурами, обладающего новыми уникальными физическими свойствами.

4. Впервые обнаружен эффект гигантского высокотемпературного отрицательного магнитосопротивления ($T=230-320\text{K}$) ($\Delta\rho/\rho\approx 300\%$) и установлены закономерности его изменения в зависимости от величины магнитного ($0,6\div 2,1$ Тл) и электрического ($0,1\div 400$ В/см) поля, интенсивности освещения, а также температуры, которые существенно отличаются от наблюдаемых магнитосопротивлений в других полупроводниковых.

5. Обнаружен эффект двойной инверсии знака магнитосопротивления в образцах кремния при температурах $T=170$ К и $T=400$ К. Установлена зависимость величины отрицательного магнитосопротивления от концентрации и зарядового состояния нанокластеров атомов марганца.

6. Обнаружена гигантская примесная фотопроводимость в области $\lambda=1,5\div 8$ мкм, а также аномально большая величина остаточной фотопроводимости в кремнии с нанокластерами атомов марганца.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

1. Разработана технология получения кремния с наноструктурами атомов марганца по всему объему кристалла.

2. Установлено, что гигантское высокотемпературное отрицательное магнитосопротивление, позволяет создать принципиально новый класс чувствительных магнитодатчиков и фотоманитных приборов.

3. Показано, что кремний с многозарядными нанокластерами является высокоэффективным материалом для создания инфракрасных фотоприемников, элементов оптической и электрической памяти. Также показано, что на основе таких материалов могут быть созданы более эффективные фотоэлементы с примесным фотоэлектрическим эффектом.

4. Разработаны высокочувствительные магнитодатчики на основе кремния с

магнитными нанокластерами.

Реализация результатов. Полученные в работе результаты могут быть внедрены на ОАО «ФОТОН» для серийного выпуска различных полупроводниковых приборов, и на кафедре " Электроника и микроэлектроника" ТашГТУ для мелкосерийного выпуска различных датчиков и учебных стендов. Также полученные результаты исследований могут быть использованы для повышения стабильности параметров кремния в процессе изготовления различных полупроводниковых приборов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и Республиканских конференциях «Физика фанининг бугунги ривожиди истедодли ёшларнинг ўрни» (Тошкент, Узбекистан, 2010); «Физик ва физик таълимнинг замонавий муаммолари» (Самарканд, Узбекистан, 2009); «Неравновесные процессы в полупроводниках и в полупроводниковых структурах» (Ташкент, Узбекистан, 2009); «VI Международная конференция и V Школа молодых ученых и специалистов Кремний -2009» (Новосибирск, Россия, 2009); «Рост, свойства и применение кристаллов» (Андижан, Узбекистан, 2008), на объединенном семинаре при Специализированном совете Физико-технического института НПО «Физика-Солнце» АН РУз.

Опубликованность результатов. По материалам диссертации опубликовано 10 научных работ, из них 5 статей, 5 трудов конференций. Список работ приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 117 страницах печатного текста, состоит из введения, 4 глав, заключения, содержит 46 рисунков, 4 таблицы и список литературы из 102 наименований.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении проведен анализ состояния проблемы и обоснована актуальность темы исследования, научная новизна направления, изложены цель работы и основные задачи для решения данной проблемы, научная и практическая ценность проведенного исследования.

В первой главе сделан литературный обзор, где проанализированы существующие способы управления свойствами полупроводниковых материалов и процессы легирования их примесями. Исследование взаимодействия примесных атомов между собой и другими дефектами кристаллической решетки открывает новые возможности в получении полупроводниковых материалов с наноразмерными структурами с уникальными электрофизическими свойствами. При этом особый интерес представляют такие примесные атомы которые обладают большим коэффициентом диффузии и находятся в различных состояниях в кристаллической решетке, а также активно взаимодействуют между собой и другими дефектами кристаллической решетки. Определение оптимальных термодинамических и технологических условий взаимодействия примесных атомов является одной из главных задач формирования примесных кластеров. Практически это есть управление химической реакцией в твердых телах, которая позволяет создать, вместо дискретных одиночных примесных атомов, различные нанокластеры обладающие аномальными

свойствами отличными от свойств дискретных примесных атомов. Управление взаимодействием примесных атомов между собой и дефектами решетки, позволяет разработать новые технологические решения получения принципиально новых полупроводниковых материалов с уникальными свойствами.

Во второй главе приведены научно обоснованные, оптимальные термодинамические и технологические условия формирования нанокластеров атомов марганца в кремнии, разработанная технология получения нанокластеров с управляемыми параметрами. Сущность данной технологии основана на использовании принципиально нового способа легирования кремния при низкотемпературной и поэтапной диффузии примесей. Показано, что разработанная технология, позволяет осуществить максимальное участие введенных атомов в формировании нанокластеров. Структура и состав таких нанокластеров исследованы и подвержены методом электронного парамагнитного резонанса (рис. 1,а) (ЭПР) и атомного силового микроскопа (рис. 1,б).

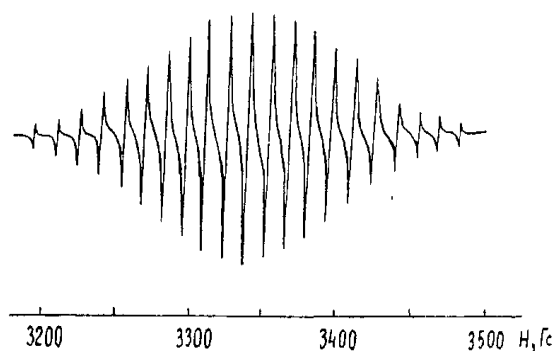


Рис.1,а. Спектр ЭПР наноклстера состоящий из 4х атомов марганца в кремнии

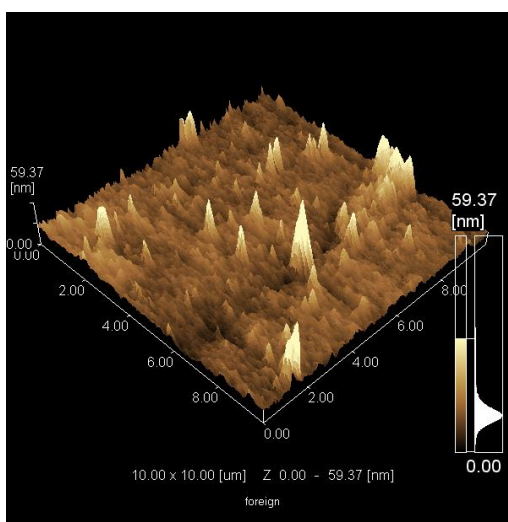


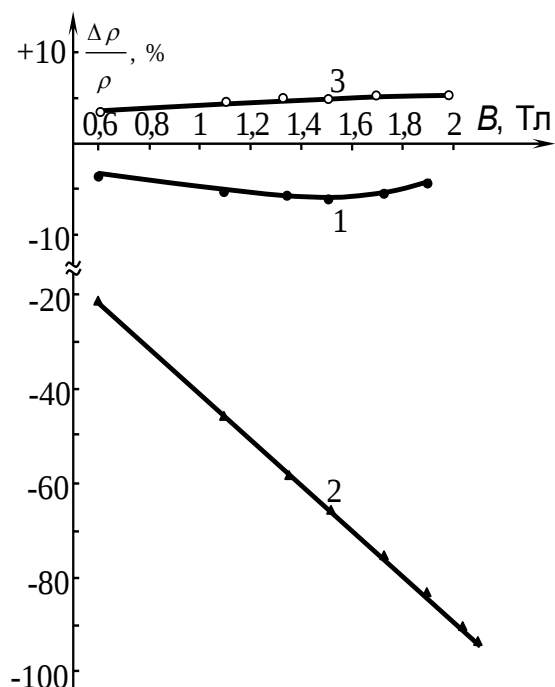
Рис.1,б. Изображение нанокластеров примесных атомов марганца в кремнии, полученное на силовом атомном микроскопом

Установлено что нанокластеры атомов марганца формируются только в компенсированном кремнии p - типа с определенным положением уровня Ферми ($F=(E_v+0,3)\div(E_v+0,45)$ эВ).

Установлено, что нанокластеры атомов марганца распределены по объему кристалла. На основе полученных результатов предложено, что нанокластеры состоят из четырех положительно заряженных атомов марганца, которые находятся в ближайших эквивалентных междоузлиях вокруг заряженного атома бора т.е. $[(Mn)_4^{+n} B^{-}]^{+(n-1)}$. Расчеты показывают, что кулоновская сила взаимодействия между положительно заряженными атомами марганца, а также между атомом бора (B^-), определяет размеры кластеров. Расчет был определен размер кластеров атомов марганца, который находится в интервале 1÷2 нм, в зависимости от зарядового состояния атомов марганца. Исследование подвижности носителей заряда и её температурной зависимости в образцах с нанокластерами атомов марганца в широкой об-

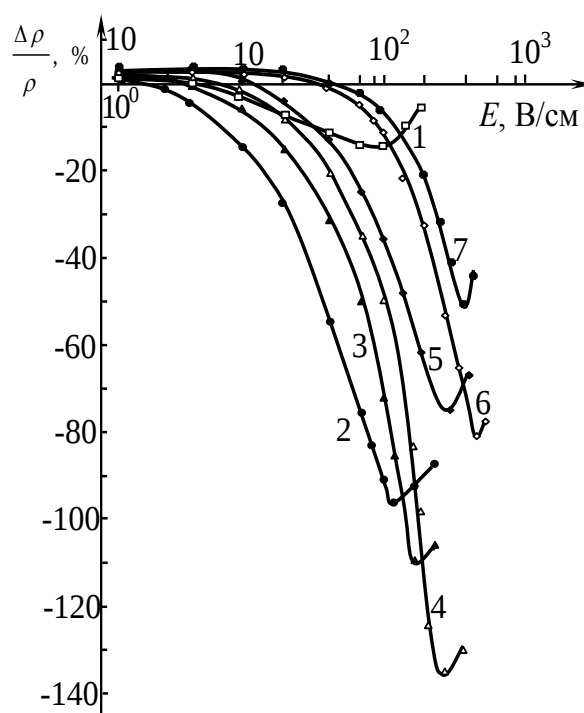
ласти температур показало, что в таких образцах не только наблюдаются anomalно маленькие подвижности носителей заряда, но и наблюдается anomalная температурная зависимость, что не характерно для кремния.

В третьей главе приводятся результаты исследования магнитосопротивления в кремнии с нанокластерами, а также без нанокластеров, особенности отрицательного магнитосопротивления в этом материале и его зависимость от магнитного и электрического поля, от температуры, освещенности, от концентрации нанокластеров и от угловой зависимости направления магнитного поля. Зависимость магнитосопротивления от напряженности магнитного поля для образцов без нанокластеров полученных по стандартной технологии и полученных по новой технологии, в которых четко наблюдаются нанокластеры, с одинаковыми параметрами, при $T=300\text{K}$ представлена на рис. 2. Как видно из рисунка, не только по характеру, но и по значению магнитосопротивления в образцах существенно отличаются.



1. $\rho=8 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ Si<B,Mn> p-типа,
2. $\rho=6 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ без нанокластеров
Si<B,Mn>p-типа; 3. Контрольный Si
 $\rho=10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$,

Рис.2. Зависимость магнитосопротивления образцов Si с нанокластерами от величины магнитного поля. $T=300\text{K}$, $E=100\text{В/см}$



1. $\rho=8 \cdot 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, 2. $\rho=8 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$,
3. $\rho=1,2 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, 4. $\rho=2 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$,
5. $\rho=4 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, 6. $\rho=1,2 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$,
7. $\rho=2 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ p-типа,

Рис.3. Зависимость магнитосопротивления от электрического поля при различных удельных сопротивлениях. $T=300\text{K}$, $B=2 \text{ Тл}$

Установлено, что в образцах с нанокластерами значение отрицательного магнитосопротивления не только существенно больше чем в образцах без нанокластеров, но также с ростом магнитного поля оно практически линейно увеличивается и не наблюдается его насыщения. Величина отрицательного магнитосопротивления в этих образцах в 20÷30 раз больше чем, в образцах без нанокластеров. Таким обра-

зом, однозначно установлено, что в образцах с нанокластерами наблюдается высокотемпературное аномально высокое отрицательное магнитосопротивление, которое не было обнаружено в других полупроводниковых материалах. Эти результаты показывают, что формирование нанокластеров атомов марганца в решетке кремния стимулирует эффект отрицательного магнитосопротивления. Эксперименты показали, что пороговое удельное сопротивление, где проявляется эффект отрицательного магнитосопротивления, это $3 \cdot 10^2$ Ом·см. Показано, что путем изменения электрического поля и температуры, это пороговое значение может быть смещено как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения удельного сопротивления. Установлено, что максимальное отрицательное магнитосопротивление наблюдается в образцах с положением уровня Ферми $F = E_v + (0,38 \div 0,42)$ эВ. Определены закономерности изменения отрицательного магнитосопротивления от положения уровня Ферми в таких образцах.

В третьей главе также была исследована зависимость отрицательного магнитосопротивления от приложенного электрического поля при $T = 300$ К. Как показали результаты исследований значение отрицательного магнитосопротивления имеет максимальное значение при определенных значениях электрического поля (E_0) и зависит от удельного сопротивления образцов (рис.3). Установлено, что с ростом удельного сопротивления образцов кремния с нанокластерами, значение электрического поля при котором наблюдается максимальное отрицательное магнитосопротивление, смещается в сторону больших значений. Показано, что, когда значение напряженности электрического поля достаточно низкое $E < 2$ В/см, не зависимо от величины удельного сопротивления во всех образцах наблюдается небольшое положительное магнитосопротивление. С ростом электрического поля значение положительного магнитосопротивления уменьшается, а при $E \sim E_{пор}$ происходит инверсия знака магнитосопротивления, т.е. происходит переход от положительного магнитосопротивления к отрицательному. При дальнейшем увеличении $E > E_{пор}$, значение отрицательного магнитосопротивления достаточно быстро увеличивается и достигает своего максимального значения при $E = E_m$, далее при $E > E_m$, значение отрицательного магнитосопротивления уменьшается т.е. происходит полевое гашение отрицательного магнитосопротивления.

Интересные результаты были обнаружены при понижении температуры $T < 300$ К. Установлено, что с понижением температуры значение отрицательного магнитосопротивления достаточно быстро увеличивается и достигает своего максимального значения при $T = 240 \div 235$ К. При такой температуре величина отрицательного магнитосопротивления достигает гигантского значения $\Delta\rho/\rho = 300\%$. Дальнейшее понижение температуры до $T = 215 \div 220$ К достаточно быстро приводит к уменьшению значения отрицательного магнитосопротивления, затем темп уменьшения отрицательного магнитосопротивления существенно замедляется. При температуре $T \leq 170 \div 175$ К магнитосопротивление опять меняет знак, и переходит от отрицательного магнитосопротивления к положительному магнитосопротивлению. Значение положительного магнитосопротивления при дальнейшем понижении температуры заметно увеличивается. Таким образом экспериментально установлено, что в отличие от других полупроводниковых материалов, в кремнии с нанокласте-

рами отрицательное магнитосопротивление не увеличивается в области низких температур, а наоборот существенно уменьшается и переходит в положительное магнитосопротивление. Эти результаты с одной стороны доказывают, что действительно отрицательное магнитосопротивление в образцах Si (Mn)_4 , является высокотемпературным эффектом, а с другой стороны показывают возможности эффекта двойной инверсии знака магнитосопротивления с изменением температуры. Установлено, что такая температурная зависимость отрицательного магнитосопротивления имеет место не зависимо от величины магнитного поля (рис. 4).

Следует отметить, что в интервале температур $T=240\div340$ К значение отрицательного магнитосопротивления увеличивается в 300 раз, т.е. при изменении температуры на один градус, отрицательное магнитосопротивление увеличивается на 3 %, что позволяет создать принципиально новый тип магниточувствительных термодатчиков.

Результаты исследования влияния интенсивности монохроматического освещения на отрицательное магнитосопротивление, показали, что с ростом интенсивности освещения, значение отрицательного магнитосопротивления существенно уменьшается. При этом следует отметить, что значение температуры, при которой наблюдается максимальное отрицательное магнитосопротивление, с ростом интенсивности освещения смещается в область более высоких температур, а также имеет место существенное сужение температурной области существования отрицательного магнитосопротивления (рис. 5).

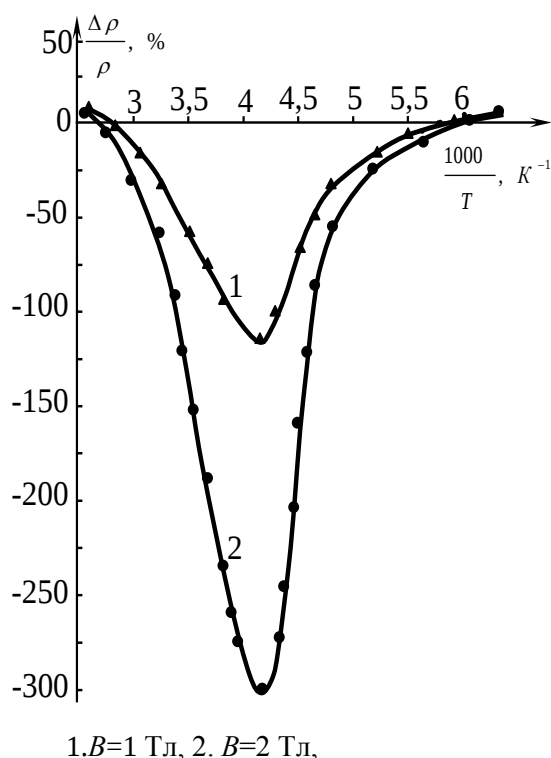


Рис.4. Зависимость магнитосопротивления образцов $p\text{-Si}\langle\text{B,Mn}\rangle$ с $\rho=8\cdot10^3$ Ом·см от температуры. $E=100$ В/см

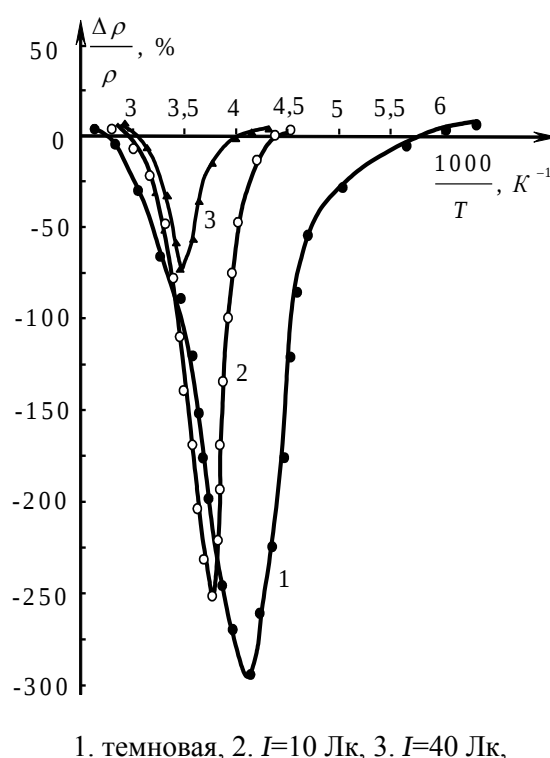


Рис.5. Зависимость магнитосопротивления от температуры в образцах $p\text{-Si}\langle\text{B,Mn}\rangle$ с $\rho=8\cdot10^3$ Ом·см при различных уровнях освещенности. $E=100$ В/см, $B=2$ Тл

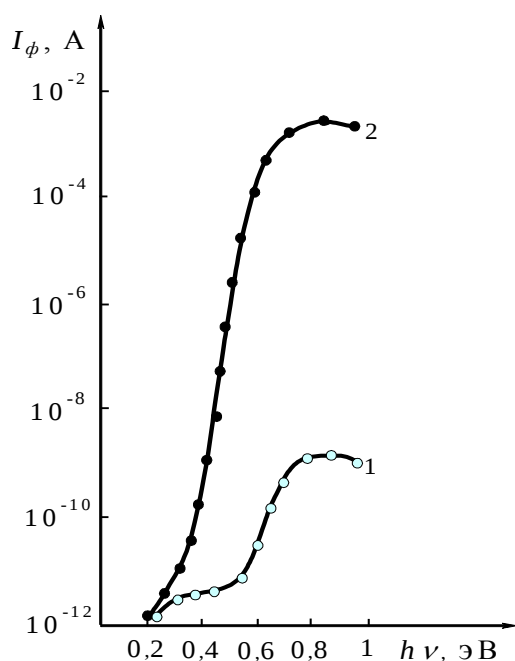
Эти результаты показывают т.е. происходит эффект гашения отрицательного магнитосопротивления при освещении. Установлено, что меняя интенсивность освещения, можно варьировать температурной областью существования отрицательного магнитосопротивления, смещать значение T_m , а также осуществлять инверсию знака магнитосопротивления.

На основе разработанной технологии удалось получить образцы с одинаковыми электрическими параметрами, но с различной концентрацией нанокластеров $N_{(Mn)_4} \sim (5 \cdot 10^{13} \div 2 \cdot 10^{15}) \text{ см}^{-3}$. Установлено, что с ростом концентрации нанокластеров значение отрицательного магнитосопротивления существенно увеличивается, т.е. при изменении концентрации нанокластеров в интервале $N_{(Mn)_4} \sim (5 \cdot 10^{13} \div 2 \cdot 10^{15}) \text{ см}^{-3}$, при одинаковых условиях эксперимента, значение отрицательного магнитосопротивления отличается в $8 \div 10$ раз. Обнаружено, что в образцах с максимальной концентрацией нанокластеров, можно существенно управлять значением отрицательного магнитосопротивления в интервале $(100 \div 2500) \%$ при изменении электрического поля.

В конце главы анализируются полученные экспериментальные данные. На основе полученных результатов однозначно установлено, что каждый нанокластер атомов марганца состоит из 4-х ионизованных (Mn^+ , Mn^{++}) атомов марганца расположенных вокруг отрицательно заряженного атома бора в ближайших эквивалентных тетроиических междоузлиях. Для образования нанокластеров необходимо наличие отрицательно заряженных атомов бора и ионизация атомов марганца в кремнии. Это подтверждается тем, что при введении примесных атомов по разработанной технологии в кремний n -типа, нанокластеры в образцах не наблюдаются, не зависимо от условий проведения эксперимента отрицательное магнитосопротивление отсутствует и имеет место только маленькое положительное магнитосопротивление. Таким образом можно однозначно утверждать, что отрицательное магнитосопротивление непосредственно связано с наличием нанокластеров атомов марганца. Условиями введения атомов бора и марганца в кремний можно варьировать концентрацией атомов марганца в состояниях Mn^0 , Mn^+ и Mn^{++} . Это означает, что можно варьировать не только концентрацией нанокластеров, но и их зарядовым состоянием в интервале $[(Mn)_4^{+8} B^{-1}]^{+7} \div [(Mn)_4^{+4} B^{-1}]^{+3}$. Результаты экспериментов показывают, что чем больше зарядовое состояние нанокластеров, тем более интенсивно наблюдаются обнаруженные эффекты. Поэтому предполагается, что в отличии от механизма отрицательного магнитосопротивления в других полупроводниковых материалах, где отрицательное магнитосопротивление объясняется слабой локализацией носителей заряда, т.е. спин решеточной релаксацией, в образцах кремния с нанокластерами атомов марганца, вклад этих механизмов не существен, в этом основную роль играет созданный мощный электрический и магнитный потенциал создаваемый нанокластерами. Поэтому отрицательное магнитосопротивление существенно зависит от внешнего электрического поля и интенсивности освещения. В конце главы на основе полученных материалов делается вывод о том, что кремний с нанокластерами атомов марганца является новым видом магнитных полупроводниковых материалов.

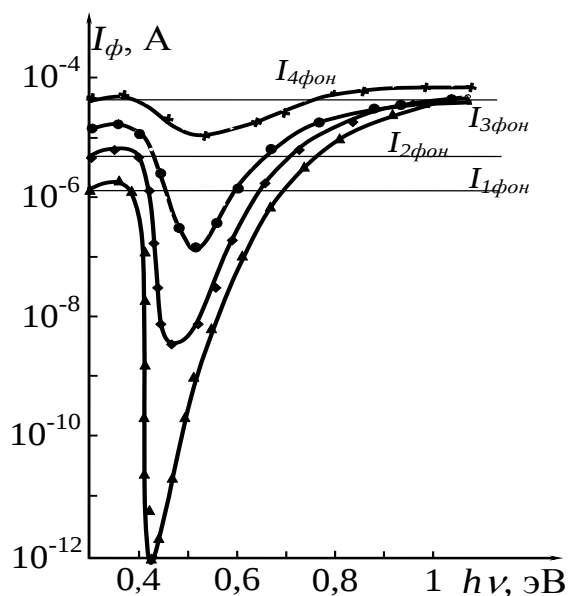
В четвертой главе приводятся экспериментальные данные по особенностям фотоэлектрических свойств кремния с нанокластерами атомов марганца. Фотоэлектрические свойства исследовались в тех образцах, в которых более подробно были исследованы их электрические и магнитные свойства. Поэтому результаты полученные по фотоэлектрическим свойствам, позволяют установить взаимосвязь между электрическими, магнитными и фотоэлектрическими свойствами кремния, с многозарядными нанокластерами и выяснить физику эффектов, наблюдаемых в таких материалах.

Исследование спектральной зависимости фотопроводимости образцов с нанокластерами, с максимальным отрицательным магнитосопротивлением, показало, что в таких образцах наблюдается ряд уникальных явлений: фотоответ в них наблюдается при $h\nu=0,2$ эВ, значение фототока при $h\nu=0,2$ эВ непрерывно растет и в течение нескольких минут увеличивается на $5\div 6$ порядков, хотя при этом интенсивность ИК излучения достаточно слабая ($I < 10^{-5}$ Вт/см²). При выключении света значение фототока остается без существенных изменений достаточно долгое время, т.е. появляется аномально большая остаточная фотопроводимость. Установлено, что в области $h\nu=(0,2\div 0,4)$ эВ образцы работают как счетчик, регистрирующий каждый фотон. Следующая особенность это непрерывный рост фототока в образцах в области $h\nu=(0,4\div 0,75)$ эВ. Значение фототока при этом увеличивается в $10^9\div 10^{10}$ раз, а в области $h\nu=0,7\div 1,1$ эВ значение фототока существенно не меняется, т.е. наблюдается гигантская примесная фотопроводимость в области спектра $h\nu=0,4\div 0,75$ эВ (рис. 6).



1. Образцы с нанокластерами (Mn)₄;
2. Образцы без нанокластеров.

**Рис.6. Спектральная зависимость ФП в образцах $p\text{-Si}<\text{B},\text{Mn}>$.
 $E=5$ В/см, $T=80$ К**



$I_1=5$ люкс, $I_2=20$ люкс, $I_3=40$ люкс,
 $I_4=80$ люкс,

Рис.7. Спектральная зависимость ФП в образцах $p\text{-Si}<\text{B},\text{Mn}>$ с $\rho=1,6\cdot 10^5$ Ом-см, при наличии фонового освещения. $E=5$ В/см, $T=80$ К

Этот эффект наблюдается только в образцах, где наблюдается максимальное отрицательное магнитосопротивление.

Установлено, что со смещением уровня Ферми к середине запрещенной зоны кремния, наблюдается эффект инфракрасного гашения при $h\nu=0,4$ эВ, значения которого существенно усиливается (рис.7) и достигает аномально большой кратности гашения $\kappa=10^5\div10^6$ в образцах с $\rho\sim(10^4\div10^5)$ Ом·см. Эффект гашения имеет место в достаточно широкой области интенсивностей фонового света, хотя при этом интенсивность падающего инфракрасного света гораздо меньше чем фонового света.

Эти результаты показывают возможность создания чувствительных инфракрасный фотоприемников для области $h\nu=(0,4\div0,8)$ эВ, регистрирующих слабый инфракрасный свет при наличии достаточно сильного фонового интегрального света. Установлены закономерности управления фоточувствительностью образцов при изменении зарядового состояния нанокластеров. Расчет показывает, что наблюдаемые аномально глубокое инфракрасного гашение и гигантская остаточная проводимость связаны с наличием центров с аномально маленькими сечениями захвата дырок $S_p<10^{-26}$ см², многозарядными нанокластерами.

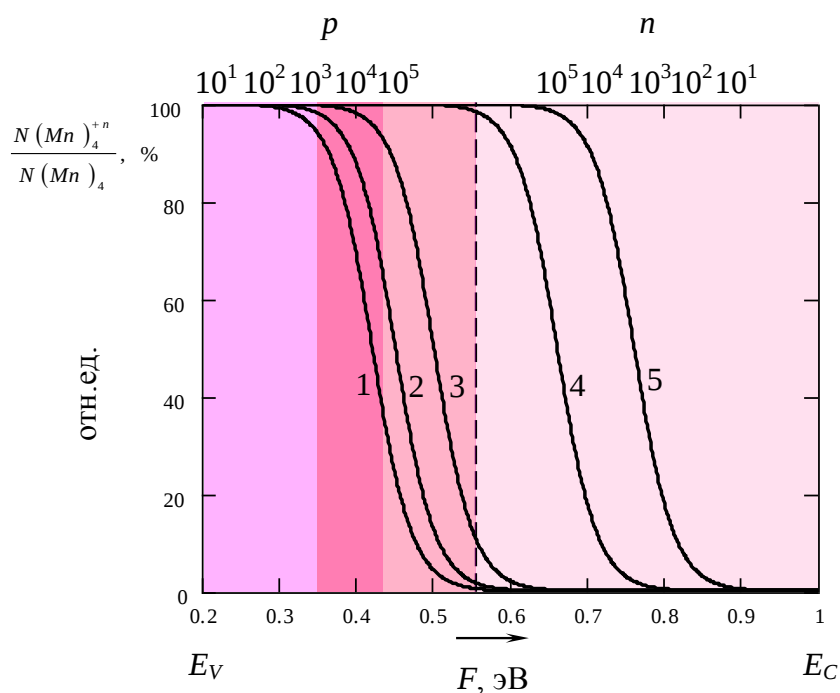
В этой главе также приводятся экспериментальные результаты по исследованию влияния электрического поля и температуры на фотопроводимость образцов. Установлено, что увеличение электрического поля, приложенного к образцу, существенно стимулирует примесную фотопроводимость в образцах. При увеличении электрического поля всего в 5÷6 раз, примесный фототок увеличивается на 3 порядка. Показано, что высокая фоточувствительность образцов кремния с нанокластерами без существенных изменений сохраняется в интервале температур $T=100\div240$ К, и при более высоких температурах ($T=300$ К) она ослабляется но остается на достаточно высоком уровне.

На основе полученных экспериментальных результатов определены энергетические уровни нанокластеров $(Mn)_n$ в запрещенной зоне. Нанокластеры создают энергетическую полосу лежащую в интервале $\Delta E=(E_v+0,42)\div(E_c-0,4)$ эВ и содержащую 5 энергетических уровней отличающихся сечениями захвата носителей заряда.

В конце главы приведены расчеты относительного изменения концентрации нанокластеров с различным зарядовым состоянием к общей концентрации нанокластеров, в зависимости от положения уровня Ферми в запрещенной зоне кремния (рис. 8), на основе решения (1) уравнения непрерывности.

$$N_{(Mn)_4} = \frac{(N_{(Mn)_4})^{+7}}{1 + g \exp\left(\frac{E_1 - F}{kT}\right)} + \frac{(N_{(Mn)_4})^{+6}}{1 + g \exp\left(\frac{E_2 - F}{kT}\right)} + \frac{(N_{(Mn)_4})^{+5}}{1 + g \exp\left(\frac{E_3 - F}{kT}\right)} +$$

$$\frac{(N_{(Mn)_4})^{+4}}{1 + g \exp\left(\frac{E_4 - F}{kT}\right)} + \frac{(N_{(Mn)_4})^{+3}}{1 + g \exp\left(\frac{E_5 - F}{kT}\right)} \quad (1)$$



1- $[(\text{Mn})_4^{+8} \text{B}^{-1}]^{+7}$, 2- $[(\text{Mn})_4^{+7} \text{B}^{-1}]^{+6}$, 3- $[(\text{Mn})_4^{+6} \text{B}^{-1}]^{+5}$,
4- $[(\text{Mn})_4^{+5} \text{B}^{-1}]^{+4}$, 5- $[(\text{Mn})_4^{+4} \text{B}^{-1}]^{+3}$.

Рис.8. Относительное изменение концентрации заряженных нанокластеров от общей концентрации нанокластеров в зависимости от положения уровня Ферми в образцах

Анализ полученных результатов на основе расчет в показали, что максимальные отрицательного магнитосопротивления, высокая примесная фотопроводимость, гигантская остаточная проводимость наблюдаются только в образцах, где уровень Ферми $F=(0,35 \div 0,42)$ эВ, т.е. в образцах, где основная часть нанокластеров находится в зарядовом состоянии $[(\text{Mn})_4^{+8} \text{B}^{-1}]^{+7} \div [(\text{Mn})_4^{+7} \text{B}^{-1}]^{+6}$. При смещении уровня Ферми $F > 0,42$ эВ, концентрация нанокластеров с максимальной кратностью заряда существенно уменьшается и соответственно наблюдается ослабление эффектов или вообще их исчезновение. Этот расчет позволят не только объяснить полученные результаты, но и спрогнозировать получение образцов с необходимыми параметрами.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана технология низкотемпературного диффузионного легирования и определены оптимальные термодинамические условия формирования нанокластеров атомов марганца в решетке монокристаллического кремния. Разработана технологии формирования нанокластеров примесных атомов с управляемой структурой и свойствами в решетке кремния является одной из актуальнейших и перспективнейших решенных задач современной нанoeлектроники, так как создание нанокластеров примесных атомов в кремнии

позволяет не только управлять фундаментальными параметрами кремния, его магнитными свойствами, но и выявляет ряд новых еще неизвестных нам физических явлений.

2. Исследованы электрофизические свойства кремния с нанокластерами атомов марганца и определена температурная область существования нанокластеров со стабильными параметрами.

3. Впервые исследованы магнитные свойства кремния с нанокластерами атомов марганца и обнаружено гигантское высокотемпературное отрицательное магнитосопротивление.

4. Установлена закономерность изменения отрицательного магнитосопротивления от изменения параметров материала, электрического и магнитного полей, а также и от концентрации нанокластеров.

5. На основе полученных экспериментальных данных, показана возможность создания нового класса чувствительных магнитодатчиков, фотомагнитных приборов, фотоприемников ИК излучения для области $\lambda=1,5\div 8$ мкм, элементов памяти, оптических запоминающих устройств, инфракрасных фотоприемников нового типа работающих при наличии фонового освещения и т.д.

6. Дальнейшем совершенствовании технологии формирования нанокластеров, способов управления их концентрацией и равномерностью их распределения в объеме полупроводника, открывается перспективная область применения таких материалов при разработке и создании объемных интегральных микросхем с большой степенью интеграции, без применения многоэтапных, сложных и трудоемких технологических процессов.

Список использованной литературы

1. Gerasimenko N.N., Parhomenko Yu.N., Troitskiy V.Yu., Irzhak A.V., Pavluchenko M.N., Djamanbalin K.K. Quantum-dimensional structures produced by ion inplation // NIMB, 2003.– 206.– P. 644-647.

2. Герасименко Н.Н. Радиационные методы в технологии нанoeлектроники //Сб. тр. Международной конф. Кремний-2007.– Москва, 2007.– С. 43

3. Сыркин В. Г. CVD метод–Химическое парофазное осаждение, М.: Наука, 2000.– 470 с.

4. СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Бахадырханов М.К., Мавлонов Г.Х., Аюпов К.С., Исамов С.Б. Отрицательное магнитосопротивление в кремнии с комплексами атомов марганца $[Mn]_4$ // Физика Техника Полупроводников. – Санкт–Петербург, 2010.– Т. 44.– В. 9.– С. 1181-1184.

2. Бахадырханов М.К., Аюпов К.С., Илиев Х.М., Мавлонов Г.Х., Саттаров О.Э. Влияние электрического поля, освещенности и температуры на отрицательное магнетосопротивление в кремнии легированного по методу «низкотемпературной диффузии» // Письма в ЖТФ. – Санкт–Петербург, 2010.– Т. 36– В. 16.– С.11-

18.

3. Аюпов К.С., Бахадирханов М.К., Мавлянов Г.Х., Зикриллаев Н.Ф., Нигманхуджаев С. Активация Нанокластеров атомов марганца в кремнии // Доклады АН РУз. – Ташкент, 2009. – № 3-4. – С. 56-58.
4. Бахадырханов М.К., Мавлянов Г.Х., Сатторов О.Э., Валиев С.А. Неравновесные явления в кремнии с наноразмерными структурами // ТАТУ хабарлари. – Ташкент, 2008. – В. 1 – С. 79-81.
5. M.K.Bakhadirkhanov, G.Kh.Mavlonov, S.B.Isamov, K.S.Ayupov, Kh.M.Iliev, O.E Sattorov and S.A.Tachilin «Photoconductivity of Silicon with Multicharged Clusters of Manganese Atoms [Mn]₄» USA, Surface Engineering and Applied Electrochemistry, USA, 2010, Vol. 46. No.3, pp.276-280.
6. Мавлонов Г.Х. Аномальной подвижность носителей заряда в кремния с нанокластерами атомов марганца // Тизислар туплами, Ўзбекистоннинг инновацион тараққиёти- ёшлар нигоҳида «Физика фанининг бугунги ривожига истедодли ёшларнинг ўрни». – Тошкент, 8-9 апрель 2010 г. – С. 149-153.
7. Аюпов К.С., Норкулов Н., Зикриллаев Н.Ф., Бобонов Д.Т. Мавлонов Г.Х. Новый технологический способ формирования нанокластеров примесных атомов в решетке кремния // Республика конференция тезислари «Физик ва физик таълимнинг замонавий муаммолари». – Самарканд, 11-12 декабрь 2009 г. – С. 7-8.
8. Бахадырханов М.К., Идиев Х.М., Мавлонов Г.Х., Зикриллаев Н.Ф., Отахонов А.С., Миджитов М.Х. Фотогашение отрицательного магнитосопротивления в кремнии с нанокластерами атомов // материалы 2- международной конференции «Неравновесные процессы в полупроводниках и в полупроводниковых структурах». – Ташкент, 12-14 ноября 2009 г. – С. 102-104.
9. Аюпов К.С., Бахадырханов М.К., Мавлонов Г.Х., Зикриллаев Н.Ф., Исамов С.Б., Ковешников С.В. Исследование зависимости отрицательного магнитосопротивления в кремнии от концентрации нанокластеров атомов марганца // тезисы докладов VI Международная конференция и V Школа молодых ученых и специалистов «Кремний -2009». – Новосибирск, 7-10 июля 2009 г. – С. 194.
10. Бахадырханов М.К., Зикриллаев Н.Ф., Мавлонов Г.Х., Исамов С.Б., Мамаджанов Х.М., Тачилин С.А. Фотоэлектрические свойства кремния с многозарядными нанокластерами атомов марганца // Материалы пятой республиканской научной конференции «Рост, свойства и применение кристаллов». – Андижан, 11-12 апреля 2008г. – С. 60-61.

РЕЗЮМЕ

диссертации Мавлонова Гиёсидина Хайдаровича на тему: «Исследование фотоэлектрических и магнитных свойств кремния с нанокластерами атомов марганца» представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников

Ключевые слова: нанокластер, примесный атом, фотоэлектрические свойства, магнитосопротивления, диффузия, энергетическая зона, магнитодатчик, фотоприемник.

Объекты исследования: монокристаллические образцы кремния марки КДБ–2, 5, 10, 100 которые были легированы примесными атомами марганца.

Цель работы: разработка технологии формирования нанокластеров атомов марганца в решетке кремния с управляемым магнитным моментом и зарядовым состоянием, исследование влияния таких нанокластеров на электрические, магнитные и фотоэлектрические свойства кремния и определение их функциональных возможностей для использования в электронике.

Методы исследования: использовались электрические, фотоэлектрические методы, установка электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), силовым атомным и инфракрасным микроскопам.

Полученные результаты и их новизна: Впервые обнаружены эффекты: anomalно большое высокотемпературное отрицательного магнитосопротивления, гигантская примесная фотопроводимость в области $\lambda=1,5\div 8$ мкм, anomalно глубокие инфракрасного гашения фотопроводимости. Установлены закономерности изменения обнаруженных эффектов от величина электрического и магнитного полей, температур ыи интенсивности освещения.

Практическая значимость: разработана технология получения кремния с нанокластерами атомов марганца с управляемыми зарядовыми состояниями и концентрацией. Показана возможность создания на основе кремния с магнитными нанокластерами нового типа чувствительных магнитодатчиков, на основе ОМС и ИК фотоприемников работающих при наличие достаточно высоких уровней фонового освещения.

Степень внедрения и экономическая эффективность: полученные в работе результаты могут быть использованы в ОАО «ФОТОН» и на кафедре " Электроника и микроэлектроника" ТашГТУ в учебном процессе.

Область применения: микроэлектронная промышленность, в области использование возобновляемые источники энергии.

Физика-математика фанлари номзоди илмий даражасига талабгор Мавлонов Гиёсидин Хайдаровичнинг 01.04.10 - «Ярим ўтказгичлар физикаси ихтисослиги бўйича «Кремнийдаги марганец атомлари нанокластерларининг фотоэлектрик ва магнит хусусиятларини ўрганиш» мавзусидаги диссертациясининг

РЕЗЮМЕСИ

Таянч сўзлар: нанокластер, киришма атоми, фотоэлектрик хусусият, магнит қаршилик, диффузия, энергиявий сатх, магнит датчик, фотоприемник.

Тадқиқот объектлари: марганец атомлари билан легирланган саноатида ишлатиладиган КДБ-2, 5, 10, 100 маркали монокристалл кремний намуналари.

Ишнинг мақсади: кремнийда марганец киришма атомлари нанокластерларининг заряд ҳолати ва магнит моменти бошқариш имкониятини берувчи технологияни яратиш, уларнинг хусусиятларини ўрганиш ва замонавий электроникада материалларнинг функционал хоссаларидан фойдаланиш имкониятларини очиб бериш.

Тадқиқот методлари: усули: электрик ва фотоэлектрик ўлчаш усулларидаан электромагнит резонатор қурилмасидан, атом кучли ва инфрақизил микроскоплардан фойдаланилди.

Олинган натижалар ва уларнинг янгилиги: ғайри оддий катта юқори ҳароратли манфий магнит қаршилик, $\lambda=1,5\div 8$ мкм оралиғида ўта катта қийматдаги қолдиқ фотоўтказувчанлик, фотоўтказувчанлик қийматини инфрақизил нурлар таъсирида ғайри оддий чуқур сўниш эффектлари очилди. Эффектларнинг ташқи электр ва магнит майдон, ҳарорат ва ёритилганлик даражасига боғлиқ ўзгариш қонуниятлари аниқланди.

Амалий аҳамияти: кремнийда марганец атомлари нанокластерларининг заряд ҳолатини ва концентрациясини бошқариш имконини берувчи технология яратилди. Магнит хусусиятли нанокластерлар мавжуд бўлган кремнийдаги манфий магнит қаршилик асосида янги турдаги сезгир магнит датчикларни ва фон ёруғлик етарлича кучли бўлганда ҳам инфрақизил нурларга ўта сезгир фотоприёмникларни яратиш имкониятлари очиб берилди.

Татбиқ этиш даражаси ва иқтисодий самарадорлиги: Диссертацияни бажаришда олинган натижаларни «Фотон» очик турдаги акционерлик жамиятида ва ТошДТУ нинг “Электроника ва микроэлектроника” кафедрасида ўқув жараёнида ишлатилиши мумкин.

Қўлланилиш соҳаси: микроэлектроника саноатида, қайта тикланувчи энергия манбаларидан фойдаланиш соҳаларида.

RESUME

Dissertation of Mavlonov Giyosiddin Haydarovich on a theme: «Research of photo-electric and magnetic properties of silicon with nanoclusters atom of manganese» the scientific degree of the candidate of physical and mathematical sciences presented on competition on a speciality 01.04.10 – “Semiconductors physics”

Key words: nanoclusters, impurity atom, photo-electric properties, magnetoresistance, diffusion, band gap, magnetic sensor, photodetector.

Subject of research: monocrystal samples of silicon of mark КДБ – 2, 5, 10, 100 which have been doped impurity atoms of manganese.

Purpose of work: working out of technology of reception of silicon with nanoclusters impurity atoms of manganese with steer able charging condition status and the magnetic moment, and also research of their properties and definition functional possibility for usage of such materials in modern electronics.

Method of research: electric, photo-electric methods, device of an electron spin resonance (ESR), atomic force and infra-red microscopes were used.

The results obtained and their novelty: for the first time effects are found out: it is anomalous high-temperature negative magnetoresistance, giant impurity photoconductivity in the field of $\lambda=1,5\div 8$ microns, it is anomalous infra-red quenching of photoconduction. Laws of change obtained effects from size electric are established and magnetic field, temperatures intensity of lighting.

Practical value: the technology of reception of silicon with nanoclusters atom of manganese steer able charging condition status and concentration is developed. Possibility of creation on the basis of silicon with magnetic nanoclusters new type sensitive magnetic sensors, on the basis of NMR and IR photodetectors working is shown at presence enough high levels of background light.

Degree of embed and economic effectivity: the results received in work can be introduced on Open Society "PHOTON" and on chair «Electronics and microelectronics» TSTU in educational process.

Field of application: the microelectronic industry, in area use renewed energy sources.