

**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; 539.2*

**ХАЖИЕВ МАРДОНБЕК УЛУГБЕКОВИЧ**

**«ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ГЕРМАНИЯ И ПОВЕРХНОСТНЫХ  
СОСТОЯНИЙ НА СВОЙСТВА ПЕРЕХОДОВ МЕТАЛЛ -  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ,  
НА ОСНОВЕ Al, Au, Ni и Ti»**

01.04.10 - физика полупроводников

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Ташкент 2010

Работа выполнена в Физико-техническом институте имени С.В.Стародубцева  
Академии наук Республики Узбекистан

**Научный руководитель:** кандидат физико-математических наук,  
**Матчанов Нураддин Азадович**

**Официальные оппоненты:** Доктор физико-математических наук, профессор  
**Лейдерман Ада Юльевна**  
Доктор физико-математических наук, профессор  
**Зикриллаев Нурулло Фатхуллаевич**

**Ведущая организация:** Национальный университет Узбекистана

Защита состоится «\_\_\_»\_\_\_\_\_2010 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании Объединенного специального совета Д 015.08.01 при Физико-техническом институте имени С.В.Стародубцева АН РУз по адресу: Ташкент, ул. Бодомзор йули 2 Б.

Тел.: (+998 71) 233-12-71

Факс: (+998 71) 235-42-91. e-mail: [Karimov@uzsci.net](mailto:Karimov@uzsci.net)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ АН РУз и Фундаментальной библиотеке АН РУз.

Автореферат разослан «\_\_\_»\_\_\_\_\_2010 г.

Учёный секретарь  
специализированного совета,  
д.ф.-м.н. профессор **Каримов А.В.**

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

**Актуальность работы.** Как известно, на основе переходов металл - полупроводник (МП) и металл–диэлектрик–полупроводник (МДП) создаются современные микросхемы и электронные компоненты. В таких МП и МДП структурах, состояние поверхности полупроводника, его однородность и фазовый состав играют определяющую роль в формировании контактов.

В настоящее время, в исследовательских работах проявляется большой интерес к объёмным кристаллам  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , вызванный возможностью изготовления более совершенных приборов на их основе. Такие преимущества как быстродействие, низкий уровень шумов, радиационная стабильность и т.п., сплава  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  по сравнению с кремниевыми аналогами дали толчок исследованию возможностей изготовления приборов в ядерной спектроскопии как в качестве детекторов ядерного излучения [1], так и в качестве датчиков тепловых нейтронов [2], и в рентгеновской дифрактометрии [3]. Очень эффективны, по мнению авторов [4],  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  высокотемпературные термоэлементы. Кроме этого, многие электрофизические характеристики материала, важные для изготовления плёночных полупроводниковых структур, определяются экспериментально в объёмных кристаллах сплава  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ . Объёмные поли- и моно - кристаллы твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  дают возможность проводить фундаментальные исследования во всем интервале составов, так как объёмные монокристаллы твердых растворов хорошего качества получены только для системы  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ . В связи с этим, задача - получение и исследование свойств объёмных кристаллов сплава  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  и приборных структур на их основе является актуальной.

Известно что,  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  полупроводниковые напряженные слои, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), в настоящее время стали получать весьма широкое распространение в качестве материалов для изготовления СВЧ-приборов и интегральных микросхем. В литературе имеются многочисленные работы, посвященные изучению свойств полупроводниковых напряженных слоёв, выращенных методом МЛЭ и барьеров Шоттки (БШ) на основе  $\text{M}-(\text{МЛЭ})\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  [5,6]. Авторы работы [5] исследовали влияние содержания германия на высоту этого барьера и пришли к выводу, что в  $\text{M}-(\text{МЛЭ})\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  структурах высота энергетического барьера БШ  $\text{Ir-Si}_{1-x}\text{Ge}$ ,  $\text{Pt-Si}_{1-x}\text{Ge}$ ,  $\text{Pd-Si}_{1-x}\text{Ge}$  и  $\text{Fe-Si}_{1-x}\text{Ge}$  уменьшается с ростом содержания германия в сплаве в интервале составов  $0 < x < 0,25$ , и изменяется от 0.69 эВ до 0.54 эВ. Однако, в литературе отсутствует информация по исследованиям БШ на основе объёмных твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ .

Ранее [1] была показана возможность изготовления детекторов ядерного излучения с

БШ  $\text{Au-i-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  на основе объёмных твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}$  ( $0 < x < 0,1$ ), которые имеют скорость счета бета частиц в 3 раза большую, чем их кремниевые аналоги. При этом компенсированный литием полупроводниковый материал должен обладать высокой степенью компенсации и достаточно большим временем жизни носителей, чтобы на основе этого материала можно было изготовить p-i-n детекторы. Высота энергетического барьера в этих структурах была  $\sim 1$  эВ. Предполагалось, что такая высота может быть связана с пассивацией поверхностных состояний. Следует отметить, что наивысшая высота барьера  $\sim 0,8 \div 0,97$  эВ на n и p Si, получены авторами работы [7] на поверхностно-барьерных детекторах. Анализ

### 3

литературы показал, что информация по БШ  $\text{Au-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  на основе объемных кристаллов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , выращенных другими способами, отсутствует.

Известно, что различные химические или физические обработки применяются, для сглаживания микрорельефа поверхности, уменьшения или увеличения концентрации поверхностных состояний  $N_{ss}$ , изменения спектра состояний  $N_{ss}$  в запрещенной зоне и управления другими свойствами поверхности. В связи с этим работа, посвященная исследованию влияния содержания германия и поверхностных состояний, формируемых химической обработкой, на свойства металл- $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  переходов является **актуальной**.

**Степень изученности проблемы.** В последние годы были опубликованы многочисленные статьи, посвященные исследованию БШ  $\text{M-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  на пленках твердых растворов кремний-германий выращенных МЛЭ. Свойства этих БШ сильно отличаются от свойств БШ, изготовленных на основе массивных кристаллов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ . Например, величина высоты барьера  $\text{Au-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $\sim 0.9 \div 1$  эВ), даже при близких к кремнию составах сильно отличается от  $\text{Au-Si}$  ( $\sim 0.7 \div 0.85$  эВ, [8]).

Ранее, при исследовании контактов металл Au - полупроводник на основе твердых растворов кремний-германий, было установлено, что обогащение поверхности твердого раствора германием приводит к уменьшению концентрации поверхностных состояний (разумеется, при прочих равных условиях, так как это также сильно зависело от обработки поверхности). Очевидно, что наблюдаемый эффект уменьшения концентрации поверхностных состояний в твердых растворах не может наблюдаться для любых металлов. В частности, взаимодействие металлов с поверхностью полупроводника при температуре формирования контактов (при вакуумном термическом напылении контактов температура подложки достигает  $300 \div 400^\circ\text{C}$ ) может существенно изменить свойства поверхности.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния различных химических обработок поверхности и содержания германия на свойства и характеристики контактов  $\text{M-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ . Причем для уточнения факторов, влияющих на высоту барьера, здесь будут использованы различные металлы (золото, алюминий, титан и никель) для изготовления переходов  $\text{M-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ .

Несмотря на перспективность твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , подробные исследования влияния содержания Ge на свойства контактов на основе объемных твердых

растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  не проводились.

**Связь диссертационной работы с тематическими планами НИР.** Работа выполнена в рамках фундаментальных исследований ФТИ АН РУЗ по проектам: ФПФИ №30-06 "Исследование влияния содержания германия на свойства барьеров Шоттки на основе твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ", № Ф.2-1-75 "Исследование физических основ технологии получения радиационно-стойких полупроводниковых материалов на основе сплава  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  и карбида кремния для изготовления полупроводниковых приборов" и ФА-Ф2-(Ф030+Ф096) «Выращивание твердых растворов на основе  $\text{ZnS}$ ,  $\text{ZnSe}$ ,  $\text{ZnTe}$ ,  $\text{GaSb}$ ,  $\text{SiGe}$ ,  $\text{SiC}$  и их фотоэлектрические и люминесцентные свойства».

#### 4

**Цель исследования.** Основной целью настоящей работы является исследование свойств контактов металл- $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  в зависимости от типа металлов, с учетом содержания германия и поверхностных состояний в объемных твердых растворах  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ .

**Задачи исследования.**

1. Выращивание методом зонной плавки и исследование электрофизических параметров монокристаллов твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ;
2. Исследование контактов  $\text{Au-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , полученных на высокоомных кристаллах компенсированных золотом;
3. Разработка технологии и изготовление контактов  $\text{M-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  на основе  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , используя благородные ( $\text{Au}$ ) и неблагородные ( $\text{Al}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Ti}$ ) металлы;
4. Измерение вольтамперных, вольтемкостных, спектральных и других характеристик контактов металл- $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  на основе  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ;
5. Изучение влияния содержания германия и различных технологических режимов обработки поверхности на свойства контактов металл- $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  на основе  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ .

**Объект и предмет исследования:** объектом исследования являются  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  монокристаллы и контакты  $\text{M-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , на основе  $\text{Al}$ ,  $\text{Au}$ ,  $\text{Ni}$  и  $\text{Ti}$ . Предметом исследования является изучение механизмов формирования барьера с учетом содержания  $\text{Ge}$  и поверхностных состояний в контактах  $\text{M-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ .

**Методы исследований.** В диссертационной работе использованы следующие методы исследования: для выращивания кристаллов была использована установка электронно-лучевой бестигельной зонной плавки, рентгеновский микроанализ, метод модуляции проводимости, методы измерения вольтамперных, вольтемкостных и спектральных характеристик, стандартные электрофизические и фотоэлектрические методы, такие как: однозондовый и четырехзондовый методы, метод Ван-Дер Пау, Холл эффект и др.

**Гипотеза исследования.** Высота барьера, определяется работой выхода, сродством к электрону и другими характеристиками материалов, а также поверх

ностными состояниями. Поверхностные состояния, в свою очередь, зависят не только от характера химической обработки поверхности, но и от взаимодействия атомов металла с полупроводником, которое существенно зависит от содержания германия в сплаве. Таким образом, сочетая химическую обработку и управление составом  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  монокристалла, можно в широких пределах управлять высотой потенциального барьера контакта металл-полупроводник.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Особенности технологии получения монокристаллов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  с диаметром  $\sim 10$  мм и содержанием германия до 35 ат.%, достаточно повышенным временем жизни не основных носителей и низкой плотностью дислокаций. Показано, что атомы Ge в кристаллах  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  распределены равномерно и нет включений второй фазы.
2. Зависимости высоты БШ на основе Au и Al от состава твёрдого раствора. Она резко меняется при малых составах ( $x < 0.02$ ), а затем практически остается неизменной.

5

3. Особенности электрофизических свойств контактов  $\text{Ni-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , которые не описываются известными выражениями для ВАХ и ВЕХ барьеров Шоттки, из-за промежуточного слоя (германида никеля).
4. Корреляция высоты барьера Металл(Au, Al и Ti)- $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  (изготовленных на поверхности твердого раствора с различной плотностью поверхностных состояний) с плотностью поверхностных состояний и содержанием германия.

### **Научная новизна:**

1. Выращены однородные монокристаллы сплава  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  методом электронно-лучевой бестигельной зонной плавкой (БЗП) с низкой плотностью дислокаций ( $\sim 10^2 \div 10^4 \text{ см}^{-2}$ ) и с высоким временем жизни ( $\sim 600$  мкс) неосновных носителей.
  2. Впервые получены данные по контактам металл- $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  на основе золота, алюминия, титана и никеля изготовленных на поверхности объемных монокристаллов твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  с различной плотностью поверхностных состояний.
  3. Впервые исследовано влияние различных химических обработок поверхности твердого раствора на свойства контактов металл- $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , полученных термическим напылением в вакууме при температуре подложки  $300 \div 400^\circ \text{C}$ .
- Научная и практическая значимость результатов исследования.** Полученные в работе экспериментальные результаты по получению БШ M- $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  на основе объемных твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , по влиянию содержания германия на пассивацию поверхностных состояний представляют интерес для физики полупроводниковых твердых растворов. Полученные данные по влиянию содержания германия на высоту БШ M- $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  и др. могут быть использованы при изготовлении полупроводниковых приборов, в частности детекторов ИК и ядерного излучения на основе сплава кремний-германий.

**Реализация результатов.** Часть полученных результатов использована при выполнении исследований радиационной стойкости и электрофизических свойств приборов на основе сплава  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  облученных нейтронами, электронами и рентгеновскими квантами.

**Апробация работы.** Результаты работы были апробированы на республиканских и международных конференциях: “International Conference on Magnetic and Superconducting Materials-MSM07”, 25<sup>th</sup>-30<sup>th</sup> September, (Khiva, Uzbekistan, 2007), “Фундаментальные и прикладные вопросы физики» (Ташкент, 2003), «Материалы конференции молодых учёных посвященной 60-летию Академии наук республики Узбекистан» декабрь (Ташкент, 2003), «Наука Каракалпакстана: вчера, сегодня, завтра», 19-20 ноябрь (Нукус, 2009) и объединенном семинаре Специализированного совета при ФТИ АН РУз.

### **Опубликованность результатов**

По материалам диссертации опубликовано 12 научных работ, из них 6 статей и 6 тезисов. Опубликованные материалы полностью отражают основное содержание работы.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка опубликованных работ и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации 120 страниц машинописного текста, 39 рисунков, 2 таблицы, список литературы из 119 наименований.

## **6**

## **2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** обоснована актуальность работы и научная новизна проведенных исследований, сформулированы её цель и задача, приведены основные положения, выдвигаемые на защиту.

**В первой главе, литературном обзоре,** рассмотрены особенности получения твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  различными методами, описана технология выращивания монокристаллов методом электронно-лучевой БЗП. Приведены основные электрофизические свойства, описаны приборные структуры и БШ на основе  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ . Показано, что существует значительный пробел в экспериментальных данных по контактам металл-  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ . Сформулированы задачи диссертации.

**Во второй главе** описана технология выращивания монокристаллов методом электронной -лучевой БЗП. Монокристаллические слитки чистого Si и  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  выращивались от затравок из монокристаллического кремния с ориентацией  $\langle 111 \rangle$  со скоростью роста  $\sim 0.5 \cdot 10^{-4} \div 0.8 \cdot 10^{-4}$  см/сек. При этом скорость вращения нижнего штока составляла  $\sim 3.5 \cdot 10^{-2}$  об/сек.

Как известно, для получения бесдислокационных кристаллов необходимо применять повышенные скорости роста. Увеличивая скорость роста, мы снижали плотность дислокаций в монокристалле. Однако, в случае выращивания монокристалла твердого раствора скорость роста лимитируется согласно выражению [9]:  $D \propto \frac{f}{T}$

$f$

$T$

$$\leq \frac{D}{fT}, \quad (1)$$

$$\frac{C_{crit} - C_l}{C_l} \frac{dC}{dT}$$

здесь  $f$  - скорость роста,  $D_l$  - коэффициент диффузии Ge в жидкой фазе,  $C_{l,s}$  - содержание Ge в жидкой и твердой фазах,  $G_T = dT/dx$  градиент температуры у фронта кристаллизации.

Таким образом, из-за ограничения скорости роста, получение бездислокационных монокристаллов  $Si_{1-x}Ge_x$  с большим содержанием германия практически не возможно. Исследовано распределение удельного сопротивления и времени жизни не основных носителей тока в твердых растворах  $Si_{1-x}Ge_x$ . Для выращивания были использованы материалы: Ge марки ГДГ с  $\rho \sim 0,1 \div 40$  Ом·см (собственное  $\rho$  Ge  $\sim 46$  Ом·см при  $20^\circ\text{C}$ ), Si марки КДБ (КЭФ) с различными  $\rho \sim 0,1 \div 1$  кОм (собственное  $\rho \sim 260$  кОм·см при  $20^\circ\text{C}$ ), а также, заготовки и затравочные монокристаллы (Si и Ge) высокого качества, предоставленные Институтом роста кристаллов (IKZ, Берлин, Германия). Показано, что в исследованных кристаллах снижение сопротивления связано с фоновыми примесями в германии, а не в кремнии. Время жизни неосновных носителей тока в твердом растворе растет с увеличением содержания Ge из-за снижения температуры жидкой фазы, в результате чего падает растворимость фоновых глубоких примесей, которые определяют время жизни носителей тока.

В данной главе, также приведены параметры выращенных кристаллов. На основе данных рентгеновских лауэграмм и рентгеновского микроанализа сделан вывод о достаточно высоком структурном совершенстве монокристаллов и об отсутствии включений второй фазы.

## 7

**В главе 3** исследованы ВАХ, ВЕХ контактов  $M-Si_{1-x}Ge_x$  ( $M-Au, Al, Ti, Ni$ ). Описана технология изготовления структур: после стандартной механической и химической обработки монокристаллические шайбы  $Si_{1-x}Ge_x$  подвергались специальной химической обработке. Для получения поверхности с относительно малой концентрацией поверхностных состояний, кристаллы травились в смеси  $HF:HNO_3:CH_3COOH$  (1:3:1) при температуре  $\sim 30^\circ\text{C}$ , в течении 5 минут при активном перемешивании (1 тип химической обработки) [10].

Для получения поверхности с увеличенной концентрацией поверхностных состояний кристаллы травились в смеси  $HF:HNO_3:CH_3COOH$  (1:3:1) при температуре  $\sim 70^\circ\text{C}$  в течении 5 минут (2 тип химической обработки). Металлические пленки на поверхность  $Si_{1-x}Ge_x$  образцов наносились способом термического напыления в вакууме  $10^{-5} \div 10^{-7}$  Торр., на стандартной установке ВУП-4. Температура подложки при напылении контактов была около  $300 \div 400^\circ\text{C}$ . Для оценки влияния высокого удельного сопротивления на высоту БШ были исследованы БШ  $Au-Si_{1-x}Ge_x$ , изготовленные на основе высокоомного твердого раствора, полученного путем компенсации глубокой примесью золота. Компенсация

исходных р-образцов производилась путем диффузии в течении 1 часа при температурах 850°C, 900°C, 950°C, 1000°C, 1050°C и 1100°C с последующей закалкой путем сброса в масло (~10<sup>3</sup>град/сек) и на свободную поверхность (~10<sup>2</sup>град/сек). Показано, что оптимальной температурой процесса для достижения высокой компенсации образцов сплава золотом является интервал 1000÷1050°C.

Высота барьера на образцах Au-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> <Au>, составила около 0,75 эВ, что значительно ниже, чем в БШ на основе высокоомного Au-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> <Li>. Таким образом, можно предположить, что величина удельного сопротивления материала незначительно влияет на высоту БШ.

Исследованы обратные вольтамперные характеристики M-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> структур на основе сильно компенсированных твердых растворов Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>. Известно, что обратный ток для структур с большим размером обедненной области W:

$$I_{n,p} = q n_p L_p \left[ 1 - \exp\left(-\frac{eU}{kT}\right) \right] + q p_i L_i \left[ 1 - \exp\left(-\frac{eU}{kT}\right) \right] \quad (2)$$

Здесь n<sub>p</sub>-концентрация электронов в р области, p<sub>n</sub>-концентрация дырок в n области, n<sub>i</sub>-собственная концентрация носителей, L<sub>n</sub>, L<sub>p</sub>, L<sub>i</sub> – диффузионная длина носителей в n, p и i областях, соответственно (L = Dτ, D- коэффициент диффузии носителей). T<sub>n</sub>, T<sub>p</sub>, и T<sub>i</sub> время жизни основных носителей. U - величина напряжения обратного смещения. Используя известное соотношение Эйнштейна  $n_p/p = \exp(-e\phi/kT)$ , μ-подвижность носителей тока) и полагая, что поверхностно - ге

(D kT e n<sub>p</sub> n<sub>p</sub>/

нерационный ток имеет пороговый характер и не зависит от напряжения, получено выражение для обратного тока:

$$I_{total} = q N_A k T V \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{L_p}{L_i} + \frac{L_i}{L_p} \right) \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right) + \dots \right]$$

$$s b n R = + - - 2 1 \exp_{a d}$$

$$\tau_T, (3)D$$

iii

8

где,  $\epsilon$ -диэлектрическая проницаемость,  $\phi$  величина барьера,  $N$  концентрации доноров и акцепторов,  $V_R$ - приложенное обратное напряжение. По результатам компьютерной обработки экспериментальных данных согласно выражению (3) оценено время жизни и степень компенсации (величина  $N_d - N_a$ ) для сильнокомпенсированных твердых растворов  $Si_{1-x}Ge_x < Li >$ .

Исследованы ВАХ контактов  $Au-Si_{1-x}Ge_x$  и  $Al-Si_{1-x}Ge_x$  на основе низкоомного твердого раствора. Результаты показывают хорошие параметры Шоттки перехода, с достаточно малыми токами утечки. Фактор неидеальности изменяется от 1 до 2, высота барьера по данным прямой ВАХ меняется от 0,55 до 0,80 эВ.

Зависимость высоты барьера исследованных структур от содержания Ge оцененные по данным ВАХ и ВЕХ представлены на рисунках 1 и 2. По данным ВАХ высота БШ на основе  $Au$ ,  $Al$  резко растет при малых составах, а затем практически остается неизменной (рис.1).

Измерения ВЕХ показали, что высота барьера коррелирует не только с содержанием германия, но и с концентрацией поверхностных состояний (управляемой химической обработкой поверхности). Например, для контактов  $Al-p-Si_{1-x}Ge_x$ , по поверхность которых была подвергнута обработке 2, ВЕХ давала величину барьера  $E_b \sim 0,90 \div 0,95$  эВ. А для образцов, поверхность которых была подвергнута обработке 1, давала величину  $E_b \sim 0,25 \div 0,50$  эВ. Образцы  $Au-n-Si_{1-x}Ge_x$  (обработка 1), по данным обратной ВЕХ имели высоту барьера  $0,7 \div 0,85$  эВ. А образцы, подвергнутые обработке 2, имели практически линейную ВАХ и барьер почти отсутствовал. Хорошо известно, что поверхностные состояния, внося вклад в емкость структур, искажают вид зависимости  $1/C^2(V_{обр})$  и могут дать завышенные или заниженные значения высоты барьера.

0,9 0,8 0,7 0,6 0,5

0,4 0,3 0,2 0,1

**$E_b, \text{эВ}$**

-1-Ti(обработка 1)  
 -2-Al(обработка 2)  
 -3-Au(обработка 1)  
 -4-Al(обработка 1)

**x, ат.% Ge**

0,0  
 0 1 2 3 4 5 6 7

(обработка 1)  
 2-Al (обработка 2) 4-Al  
 (обработка 1)

1-Ti (обработка 1) 3-Au

**Рис. 1. Высота барьера Ti-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> от содержания Ge в сплаве по данным прямой ВАХ.**

9  
 1,1 1,0 0,9 0,8 0,7 0,6 0,5  
 0,4 0,3 0,2 0,1 0,0

**E<sub>б</sub>, эВ**

3-Au(Обработка 1)  
 4-Ti(Обработка 1)

**ат.%Ge**

0 2 4 6 8 10 12 14

1- Al (обработка 2) 3- Au  
 (обработка 1) 2- Al (обработка  
 1) 4- Ti (обработка 1)

1-Al(Обработка 2)  
 2-Al(Обработка 1)

**Рис. 2. Высота БШ Au-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> и Al-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> от содержания Ge в сплаве по данным ВЕХ.**

Измерения спектральной зависимости фототока при комнатной температуре показали, что образцы Al-p-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> (обработка 2) из-за большой концентрации по верхностных состояний проявляют чувствительность при  $h\nu > 1,0 \text{ эВ}$ .

Полученные данные согласуются с данными, полученными ранее в диссертации Матчанова Н.А. по барьерам Au-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub><Li>, и подтверждают вывод о пассивации поверхности твердого раствора за счет обогащения поверхности кристалла атомами германия. Вместе с тем, практически малое изменение высоты барьера от состава сплава в интервале свыше 2 ат.% Ge и резкое изменение при малых содер

жаниях германия говорит о том, что механизм формирования барьера намного сложнее, чем простая модель с пассивированными поверхностными состояниями. В случае контактов  $\text{Ti-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  по данным ВАХ наблюдается монотонный рост величины барьера с ростом содержания германия, тогда как для  $\text{Ni-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  величину барьера по данным прямой ВАХ и ВЕХ определить не удастся.

**В главе 4** исследовано влияние поверхностных состояний на свойства контактов  $\text{M-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ .

В параграфах 4.1. и 4.2 рассмотрены контакты  $\text{Au-n-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{-Ni}$  и  $\text{Al-p-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{-Ni}$ . Известно, что высота барьера  $\phi_{bn}$  для структуры металл-полупроводник в двух предельных случаях [10]:

когда  $D_{ss} \rightarrow \infty$  ( $D_{ss}$ -плотность поверхностных состояний):

$$q\phi_{bn} = (E_g - q\phi_0) - q\Delta\phi \quad (4)$$

и, когда  $D_{ss} \rightarrow 0$ :

$$q\phi_{bn} = q(\phi_m - \chi) - q\Delta\phi, \quad (5)$$

10

где  $q\phi_0$ -уровень Ферми на свободной поверхности полупроводника (около  $E_g/3$ ),  $q$  заряд электрона,  $\Delta\phi$ -изгиб барьера из за сил изображения (0.035 эВ),  $\phi_m$ -работа выхода (5.2 эВ для Au),  $\chi$ -сродство к электрону (4.0375 эВ для  $\text{Si}_{0.75}\text{Ge}_{0.25}$ ). В промежуточном случае:

$$q\phi_{bn} = cq(\phi_m - \chi) + (1 - c)(E_g - q\phi_0) - q\Delta\phi, \quad (6) \quad \left( \frac{qD_{ss}}{c\epsilon\epsilon_0\delta} \right)$$

где  $\delta$ ,  $\epsilon_1$ -толщина и диэлектрическая постоянная промежуточного слоя. Расчет показал, что для структуры  $\text{Au-n-SiGe-Ni}$  в двух предельных случаях: когда  $D_{ss} \rightarrow \infty$   $E_B \sim 0,1$  эВ и когда  $D_{ss} \rightarrow 0$   $E_B \sim 1,1$  эВ:

Для структуры  $\text{Al-p-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{-Ni}$  когда  $D_{ss} \rightarrow \infty$   $E_B \sim 1,0$  эВ и когда  $D_{ss} \rightarrow 0$   $E_B \sim 0,2$  эВ. Как видно, высокое значение барьера для контактов на основе золота и алюминия может достигаться при взаимно противоположных условиях: высокий  $\text{Al-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  барьер-при больших  $D_{ss}$ , а высокий  $\text{Au-n-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  барьер - при малых  $D_{ss}$ . Высота

барьера оценивалась по прямой ветви ВАХ. Как известно [10]:

$$\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) = \frac{I}{I_0} - 1$$

с, (7)

$$\frac{qV}{nkT} = \ln\left(\frac{I}{I_0} + 1\right) \quad (8)$$

$$I_0 = I_{s,exp} = \frac{A^* 2}{kT}$$

где  $I$ -плотность тока;  $V_x$  напряжение на барьере, равное  $V_x = V_{appl} - IR_{b,c}$  ( $V_{appl}$

напряжение приложенное к образцу,  $R_{b,c}$ -последовательное сопротивление базы и контактов);  $n$ -коэффициент неидеальности;  $V_b$ -высота барьера;  $T$ -температура,  $S$ —площадь контакта.  $A^*$ -эффективная постоянная Ричардсона (так как наш материал близок к кремнию, для оценок использовались значения для кремния  $A^*=110 \text{ А см}^2 \text{ К}^{-2}$  для  $n$ -типа,  $A^*=30 \text{ А см}^2 \text{ К}^{-2}$  для  $p$ -типа).

Для проведения компьютерной подгонки, выражение (7) записывалось в виде:

$$I = I_0 \exp\left(\frac{q(V - I R_{b,c})}{n k T}\right) \quad (9)$$

Напряжение, приложенное к образцу, равно падению напряжения на сопротивлении базы и контактов и напряжению приложенному к барьеру.  $V = V_{b,c} + I R_{b,c}$

$$I = I_0 \exp\left(\frac{q(V - I R_{b,c})}{n k T}\right) \quad (10)$$

Выражение (10) легко подгоняется к экспериментальным данным в программе Origin, в качестве подгоночных параметров берутся  $n$ ,  $I_{s0}$  и  $R_{b,c}$ . Концентрация поверхностных состояний оценивалась по данным измерения импеданса при частоте 1000, 5000, 15000 Гц. В [8] показано, что поверхностные состояния могут учитываться в эквивалентной схеме путем введения емкости и проводимости, связанных с ними. Наличие поверхностных состояний приводит к дополнительной емкости и проводимости структуры, описываемой выражениями

$$C_{ss} = \frac{C_{ss}}{1 + \omega^2 \tau_{ss}^2}$$

$$G_{ss} = \frac{G_{ss}}{1 + \omega^2 \tau_{ss}^2}$$

барьера;  $C_{ss}$ ,  $G_{ss}$

Здесь  $C_{ss}$ ,  $G_{ss}$ -емкость и проводимость

$$C_{ss} = \frac{q N_{ss}}{2} \quad G_{ss} = \frac{q^2 N_{ss}}{2} \tau_{ss}$$

емкость и проводимость, связанные с поверхностными состояниями;  $\tau_{ss} = C_{ss} R_{ss}$ ,  $\omega = 2\pi \nu$ .

Концентрация поверхностных состояний оценивается по выражению  $D_{ss} = C_{ss} / eS$  ( $S$ —площадь контакта,  $e$ -заряд электрона).

Концентрация  $D_{ss}$  оценивалась также по коэффициенту неидеальности прямой ветви ВАХ. Согласно [11] коэффициент неидеальности:

$$[ ( ) ]^1$$

$$1^-$$

$$= +_{scd} +_{ssc} n d \epsilon W \epsilon e N, (11)$$

где  $N_{ss}$  – плотность поверхностных состояний,  $\epsilon_d$  – диэлектрическая проницаемость и толщина естественного слоя окиси кремния на поверхности образцов,  $\epsilon_s$  – диэлектрическая проницаемость полупроводника. Толщина слоя естественного окисла кремния полагалась  $\sim 10$  nm. В таблице 1 приведены экспериментальные результаты по влиянию обработки на характеристики барьеров на основе Au и Al.

Таблица 1.

Характеристики некоторых образцов

|                                                           | Au-n- Si <sub>1-x</sub> Ge <sub>x</sub> |         | Al-p- Si <sub>1-x</sub> Ge <sub>x</sub>          |             |         |             |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------|---------|--------------------------------------------------|-------------|---------|-------------|
|                                                           | обработка 1                             |         | Обработка 2                                      | обработка 1 |         | обработка 2 |
| Номер образца                                             | 32Au                                    | 12Au    | нтак<br>т<br>ский<br>к <sup>0</sup><br>Оми<br>че | 31Al        | 21Al    | 22Al 32Al   |
| Содержание Ge %                                           | 2,5                                     | 1       |                                                  | 5,1         | 0,8     | 0,8 6,4     |
| Величина барьера (по обр. ВЕХ) эВ                         | 0.71                                    | 0.39    |                                                  | 0.49        | 0.25    | 0.85 0.95   |
| Величина барьера (по прямой ВАХ) эВ                       | 0.73                                    | 0,69    |                                                  | 0,70        | 0.66    | 0,78 0,77   |
| $D_{ss}, 10^{12} \text{cm}^{-2}$ , оценка по прямой ВЕХ   | (1.4÷3)                                 | (0.3÷5) |                                                  | (0,2÷)      | (1÷0,6) | (1÷2) (1÷3) |
| Коэф.неидеал. n                                           | 1.40                                    | 2.13    |                                                  | 4.41        | 5.49    | 1.70 1.40   |
| $D_{ss}, 10^{12} \text{cm}^{-2}$ (из ко эф.неид. по ВАХ). | 8,25                                    | 2,9     |                                                  | 1,0         | 0,73    | 4,7 8,25    |

Как видно из таблицы 1, обработка 1 действительно создает пониженные значения концентрации поверхностных состояний по сравнению с обработкой 2. Причем в случае обработки 1, контакты с алюминием имеют более низкую  $D_{ss}$ , чем контакты с золотом. Видимо, это связано с тем, что алюминий более активно взаимодействует с поверхностью, нежели благородный элемент золото. Высота барьеров Au-n-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> и Al-p-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> согласно выражениям (4-5) коррелирует с концентрацией поверхностных состояний.

Так как, взаимодействие атомов золота и алюминия с полупроводником не приводит к образованию второй фазы, то имеется определенный интерес исследовать контакты металлов, взаимодействие которых может привести к образованию второй фазы, например, германидов на границе раздела. С этой целью исследованы контакты  $\text{Ti-p-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  и  $\text{Ni-p-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ .

Оценка для никеля и титана, проведенная по выражению (11), показывает, что при концентрации поверхностных состояний  $D_{ss} \rightarrow \infty$  должен наблюдаться определенный барьер, а при  $D_{ss} \rightarrow 0$  величина барьера близка к нулю. т.е. в данном случае, нелинейность ВАХ должна наблюдаться для образцов подвергнутых 2 типу химической обработки. Однако, у всех структур (как с Ni, так и с Ti контактами), подвергнутых 2 типу химической обработки, наблюдалась линейная ВАХ -контакты были

12

омическими. И наоборот, нелинейность ВАХ наблюдалась для структур подвергнутых 1 типу химической обработки. Результаты экспериментов представлены в таблице 2. Прямая ветвь ВАХ контактов  $\text{Ni-p-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  не имеет экспоненциального характера и не описывается известным выражением для барьеров Шоттки (7). А прямая ветвь ВАХ структур  $\text{Ti-p-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  удовлетворительно описывалась выражением (4.11) с коэффициентом неидеальности  $n=1,2 \div 5,0$ . В связи с этим для  $\text{Ti-p-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  структур проведены оценки высоты барьера и концентрации поверхностных состояний по данным ВАХ.

Обратная ветвь ВАХ контактов  $\text{Ni-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  при малых обратных напряжениях до -1В подчиняется зависимости  $V^{-0,5}$ . Для контактов с титаном, и золотом такой зависимости нет.

Таблица 2

Характеристики структур  $\text{Ni, Ti-p-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  подвергнутых обработке 1.

| Номер образца                         | 8Ti                                           | 14Ti   | 24Ti  | 34Ti   | 10Ni           | 17Ni   | 28Ni           | 38Ni   |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------|--------|-------|--------|----------------|--------|----------------|--------|
| Состав, ат % Ge                       | 0.8%                                          | 0.8%   | 3.5%  | 5.1%   | 2.7%           | 1.2%   | 2.2%           | 6%     |
| Коеф.неидеал n                        | 2.71                                          | 5,37   | 2,4   | 1.18   | Нет экспоненты |        | Нет экспоненты |        |
| R                                     | 13                                            | ~0     | 85    | 148    | 230            | 250    | 209            | 130    |
| $I_0$                                 | 4E-5                                          | 1,5E-4 | 2E-5  | 5.7E-6 |                |        |                |        |
| $S, \text{см}^2$                      | 0.101                                         | 0.101  | 0.096 | 0,096  | 0.096          | 0.096  | 0.101          | 0.096  |
| $E_b$ по ВАХ, эВ                      | 0.64                                          | 0.61   | 0.66  | 0.70   |                |        |                |        |
| $E_b$ по $C^{-2}$ обр. низкочастотный | Не определяется по пересечению с осью ординат |        |       |        |                |        |                |        |
| $D_{ss}(0.1V)\text{см}^{-2}$          | 2E13                                          | 1.9E13 | 1E13  | 1,0E13 | 16E13          | 4,7E13 | 4.2E13         | 6,5E13 |

|                                                |      |        |        |        |  |  |  |  |
|------------------------------------------------|------|--------|--------|--------|--|--|--|--|
| <b><math>V^{-1}</math> по прямой ВЕХ</b>       |      |        |        |        |  |  |  |  |
| <b><math>N_{ss}</math> (из коэф. енд. ВАХ)</b> | 2E12 | 0.8E12 | 2.3E12 | 1.8E13 |  |  |  |  |

Зависимость  $C^{-2}(U)$ , измеренная при низких частотах имела нелинейный характер и экстраполяция ее до пересечения с осью абсцисс не давала возможность определить высоту барьера. Обычно это связано с влиянием поверхностных состояний на границе металл-полупроводник.

Приведенные выше экспериментальные оценки концентрации поверхностных состояний и характера ВАХ и ВЕХ структур убедительно свидетельствуют, что титан и никель довольно активно взаимодействуют с поверхностью твердого раствора кремний-германий при температурах подложки  $300 \div 400^\circ\text{C}$ . Титан и никель резко увеличивают концентрацию поверхностных состояний поверхности, подвергнутой 1 типу обработки. Это находится в соответствии с известными данными по контактам Ni-Si, Ti-Si.

Однако, в отличие от контактов с кремнием на границе контакта  $\text{Ni-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , непосредственно во время вакуумного напыления контакта, образуется вторая фаза, слой (германид никеля), об этом свидетельствуют также данные прямой и обратной ВАХ при небольших приложенных напряжениях ( $\pm 1\text{В}$ ). А на границе титан твердый раствор, по видимому, вторая фаза не образуется, или из-за высокой температуры синтеза германидов титана или необходимостью длительного отжига для образования второй фазы. Это согласуется с данными по исследованию образования германидов титана на поверхности кремния при быстрых термических процессах [12].

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Методом электронно – лучевой бестигельной зонной плавки выращены монокристаллы  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  с диаметром  $\sim 10$  мм и содержанием германия до 35 ат.%, достаточно повышенным временем жизни неосновных носителей и низкой плотностью дислокаций. Показано, что атомы Ge в кристаллах  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  распределены равномерно и нет включений второй фазы. 2. На основе анализа полученных данных по зависимости высоты барьеров Шоттти  $M(\text{Au,Al})\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  от состава твердого раствора установлено, что она резко меняется при малых содержаниях германия ( $x < 0.02$ ), а затем практически остается неизменной. Полученные данные подтверждают вывод о пассивации поверхности твердого раствора за счет обогащения поверхности кристалла атомами германия. 3. Для контактов  $\text{Ti-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  выявлен монотонный рост величины барьера с ростом содержания германия, тогда как в случае  $\text{Ni-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , из-за промежуточного слоя (германид никеля), электрофизические свойства контактов не описываются известными выражениями для ВАХ и ВЕХ барьеров Шоттки.

5. Показано, что высота барьера Шоттки  $M(\text{Au}, \text{Al} \text{ и } \text{Ti})\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  (изготовленных на поверхности с различной плотностью поверхностных состояний) коррелирует с плотностью поверхностных состояний и содержанием германия. 6. Исследовано влияние различных химических обработок поверхности объемного твердого раствора на свойства контактов металл- $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , полученных термическим напылением в вакууме при температуре подложки  $300\div 400^\circ\text{C}$ . Показано, что титан и никель довольно активно взаимодействуют с поверхностью твердого раствора кремний-германий при температурах подложки  $300\div 400^\circ\text{C}$ .

### Список использованной литературы

1. Саидов М.С., Муминов Р.А., Атабаев И.Г., Джураев У.Б., Матчанов Н.А. . Атомная Энергия.Т.81.,вып.4(1996),стр.270-273.
2. Кожух М.Л., Белокурова И.Н.//Письма в ЖТФ, Т5. №11, 686(1979).
3. Erko A.,Abrosimov N.,Alex S.V.//Crystal Reserch Technology 37(2002),7.685-704.
4. Саркисов А.А.,Якимов В.А., Каплар Е.П.,. Энергоатомиздат,Москва, 1987.
5. Nur O., Willander M., Turan R.//Appl. Phys. Lett., 68, pp.1084-1086 (1996).
6. Jiang R., Liu J.L., Li J., Shi Y.// Appl. Phys. Lett.(1996), 68(8), pp.1123-1125.
7. Rahab H, Keffous A., Menari H., Chergui W., Boussaa N., Siad M.//Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 459 (2001), 200-205.
8. С.Зи. Физика полупроводниковых приборов//Мир, Москва, т1 (1984)
9. Атабаев И.Г. Кандидатская диссертация. Ташкент, 1987.
- 10.В.Т.Малаева. Кандидатская диссертация, Ташкент, 1985.
- 11.Hall H.N. Electron–hole Recombination in Germanium. Phys Rev.87, pp.387-394. (1952)
12. Ashburn, S.P.; Öztürk,M.C.;Wortman, J.J.; Harris, G.; Honeycutt, J.; Maher, D. M. //Journal of Electronic Materials, Volume 21, Issue 1, pp.81-86, (1992).

### 4. СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. И.Г.Атабаев, Н.А.Матчанов, Э.Н.Бахранов М.У.Хажиев Электрофизические свойства p-i-n структур и Барьер Шоттки на основе p- $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x(\text{Au})$  //Неорганические материалы, Москва, 2008 том.44, Выпуск 9, стр.775-781.
2. И.Г.Атабаев, Н.А.Матчанов, Э.Н.Бахранов М.У.Хажиев. Однородность высокоомных кристаллов p- $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x(\text{Au})$  //Неорганические материалы, Москва, 2008 том.44, Выпуск 5, стр.528-531
3. И.Г. Атабаев, М.У. Хажиев, Влияние плотности поверхностных состояний на высоту барьеров Al-p-SiGe, Au-n-SiGe//ДАН РУз, Ташкент 2009, №5, ст.29-32
4. И.Г. Атабаев, Н.А. Матчанов, М.У. Хажиев, Ш.А. Юсупова. Выращивание монокристаллов твердого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x(0<x<0,35)$  и исследование их свойств//Письма в ЖТФ, Санкт-Петербург, 2010, том 36, вып. 3 ст.45-52
5. И.Г.Атабаев, Н.А.Матчанов,

- М.У.Хажиев, В.Пак, Т.М.Салиев Влияние различных химических обработок поверхности на высоту барьеров Al-p-SiGe, Au-n SiGe//Физика и техника полупроводников, Санкт-Петербург, 2010, том 44, вып. 5. ст.631-635
6. Атабаев И.Г., Хажиев М.У., Бобожонов К.А. «Влияние плотности поверхностных состояний на свойства контактов Ti-p-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>, Ni-p-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>»//ДАН РУз, Ташкент, 2010, №3. ст.50-53. 7. Atabaev I.G., Matchanov N.A., Bahranov E.N., Hajiev. M.U. Effect of Ge Fraction on Schottky Barrier Height in Metal-bulk SiGe Structures// International Conference on Magnetic and Superconducting Materials- MSM07, 25<sup>th</sup>-30<sup>th</sup> September 2007, Khiva, Uzbekistan, pp.40.
8. Матчанов Н.А., Бахранов Э.Н., Усманов Ш.Н., Хажиев М.У. Фоточувствительность Ni-p-Si<Sn> структур.//Труды I- международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» Ташкент, 2003, 27-28 ноябрь.ст.266-268.
9. Хажиев М.У. Влияние олова на фоточувствительность p-Si выращенный бестигельной зонной плавкой.//Узбекистон Фанлар академиясининг 60 йиллигига бағишланган республика ёш олимлар конференцияси материаллари. Ташкент, 2003, декабрь, стр.20-23.
10. Матчанов Н.А. , Хажиев М.У. Влияния содержания германия на свойства Барьеров Шоттки на основе твердых растворов SiGe. Иктидорли талабалар республика илмий-амалий анжумани, Тошкент шаҳри, 1-3 март, 2007 йил, бет.142.
11. Атабаев И.Г., Хажиев М.У., Матчанов Н.А., Саидов Д.Ш., Жураев Х.Н.-Оценка высоты барьера обратных вольт-емкостных характеристик Al-p-Ge// Материалы IV Республиканской конференции «Наука Каракалпакстан: вчера, сегодня, завтра», Нукус, 2009. (19-20 ноября).стр.14-15.
12. Хажиев М.У., Атабаев И.Г., Матчанов Н.А. Влияние плотности поверхностных состояний на высоту барьеров Al-p-SiGe, Au-n-SiGe// Материалы IV Республиканской конференции «Наука Каракалпакстан: вчера, сегодня, завтра», Нукус, 2009. (19-20 ноября).стр.79.

## РЕЗЮМЕ

диссертации Хажиева Мардонбека Улугбековича на тему «Влияние содержания германия и поверхностных состояний на свойства переходов металл - Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>, на основе Al, Au, Ni и Ti» на соискание научной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников.

**Ключевые слова:** твёрдый раствор, кремний-германий, химическая обработка, контакты, барьер Шоттки (БШ), поверхностные состояния.

**Объекты исследования:** монокристаллы Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>, контакты Металл-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>, диоды Шоттки.

**Цель работы:** исследование свойств контактов металл-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> в зависимости

от типа металлов, с учетом содержания германия и поверхностных состояний в объемных твердых растворах  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ .

**Методы исследования:** электронно-лучевая бестигельная зонная плавка, рентгеновский микроанализ, метод модуляции проводимости, стандартные электрофизические и фотоэлектрические методы.

**Полученные результаты и их новизна:**

- улучшена технология выращивания монокристаллов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  и выращены однородные монокристаллы сплава  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , методом электронно-лучевой БЗП с низкой плотностью дислокаций ( $\sim 10^2 \div 10^4 \text{ см}^{-2}$ ) и с высоким временем жизни ( $\sim 600 \text{ мкс}$ ) не основных носителей заряда;

- впервые получены данные по высоте барьеров Шоттки на основе Au, Al. Она резко меняется при малых составах, а затем практически остается неизменной. Полученные данные подтверждают вывод, сделанный ранее для  $\text{Au-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  о пассивации поверхности сплава за счет обогащения поверхности  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  атомами Ge;

- для контактов  $\text{Ti-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  наблюдается монотонный рост величины барьера с ростом содержания германия, тогда как для  $\text{Ni-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , из-за промежуточного слоя германида никеля, электрофизические свойства контактов не описываются известными выражениями для ВАХ и ВЕХ барьеров Шоттки;

- впервые исследованы БШ  $\text{M-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  на основе золота и алюминия, изготовленных на поверхности с различной плотностью поверхностных состояний. Показано, что высота их барьера коррелирует с плотностью поверхностных состояний и содержанием германия.

**Практическая значимость:** результаты работы по получению БШ  $\text{M-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , по влиянию содержания Ge на пассивацию поверхностных состояний представляют интерес для физики полупроводниковых твердых растворов и могут быть использованы при изготовлении полупроводниковых приборов, в частности детекторов ИК и ядерного излучения на основе твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ .

**Степень внедрения и экономическая эффективность:** часть полученных результатов использована при выполнении исследований радиационной стойкости и электрофизических свойств приборов на основе сплава  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  облученных нейтронами, электронами и рентгеновскими квантами.

**Область применения:** физика твердого тела, физика полупроводников, приборостроение.

Физика - математика фанлари номзоди илмий даражасига талабгор Ха  
жиев Мардонбек Улуғбекович 01.04.10-яримўтказгичлар физикаси ихти  
сослиги бўйича “Al, Au, Ni ва Ti асосидаги металл- $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  структуралар  
хусусиятларига сиртий ҳолатлар ва германий микдорининг таъсири”  
мавзусидаги диссертациясининг

**ҚИСҚАЧА МАЗМУНИ**

**Таянч сўзлар:** қаттиқ қотишма, кремний-германий, кимёвий ишлов,

контактлар, Шоттки Барьеры (ШБ), сиртий ҳолатлар.

**Тадқиқот объектлари:**  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  монокристаллари, Металл- $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x^{\text{кон}}$  тактлар, Шоттки диодлари. **Ишнинг мақсади:**  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ҳажмий кристаллари асосидаги Металл- $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  контактлар хусусиятларини металл турига, германий миқдори ва юзадаги сиртий ҳолатларга боғлиқ равишда ўрганиш.

**Тадқиқот методлари:** электрон-нурли тигелсиз зонали эритиш, рентген микроанализи, ўтказувчанлик модуляцияси усули, стандарт фотоэлектрик ва электрофизикавий усуллар.

**Олинган натижалар ва уларнинг янгилиги:**

- ҳажмий  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  монокристалларини ўстириш технологияси яхшиланган ва электрон нурли тигелсиз зонавий эритиш усулида кам дислокацияли ( $\sim 10^2\text{-}10^4\text{ см}^{-2}$ ), заряд ташувчиларнинг яшаш вақти юқори бўлган ( $\sim 600$  мкс), бир жинсли монокристаллар ўстирилган;

- биринчи маротаба ҳажмий  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  монокристалларида Au ва Al асосида олинган ШБлар баландлиги ҳақида маълумот олинган. Қотишмада Ge миқдори кичик бўлганда у бирдан ўзгаради, сўнг тахминан ўзгармай қолади. Натижалар, кристалл юзаси Ge атомлари билан бойиган ҳолда сиртий ҳолатлар пассивация бўлиши тўғрисида,  $\text{Au-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:Li}$  контактларни ўрганишдаги хулосани тасдиқлайди;

- $\text{Ti-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  контактлар учун қотишмадаги Ge миқдори ошиши билан энергетик барьернинг монотон ўсиши кузатилади. Ваҳоланки  $\text{Ni-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  контактлар учун, ҳосил бўлган германид қатлами туфайли электрофизик хусусиятлари ШБ учун маълум бўлган ВАХ ва ВФХ қонуниятларига бўйсинмайди;

- биринчи маротаба, турли сиртий ҳолатлар зичлигига эга бўлган  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  кристаллари юзасида Au ва Al асосида ШБлари тайёрланган. Барьерларнинг баландлиги сиртий ҳолатлар зичлиги ва Ge миқдорида боғлиқлиги кўрсатилган.

**Амалий аҳамияти:**  $\text{M-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ШБ олиш ва қотишмадаги Ge нинг юзадаги сиртий ҳолатларга таъсири бўйича олинган экспериментал натижалар яримўтказгич қаттиқ қотишмалар физикаси учун аҳамиятга эга. Бу натижалар яримўтказгич асбоблар яратишда, хусусан ҳажмий  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  кристаллари асосидаги инфрақизил ва ядровий нурланиш детекторлари тайёрлашда қўлланилиши мумкин.

**Татбиқ этиш даражаси ва иктисодий самарадорлиги:** олинган натижалар нейтрон, электрон ва рентген квантлари билан нурлантирилган  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  асосида асбоблар радиацион чидамлиги ва электрофизик хусусиятларини ўрганишда қўлланилган.

**Қўлланиш соҳаси:** қаттиқ жисм физикаси, яримўтказгичлар физикаси, асбобсозлик.

tions based on Al, Au, Ni and Ti»

**Key words:** alloy, silicon-germanium, chemical treatment, contacts, Schottky barrier (SchB), surface states.

**Subjects of research:**  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  single crystals, metal- $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  contacts, Schottky diodes.

**Purpose of work:** the purpose of this work is to study the properties of a metal- $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  depending on the type of metals, taking into account the germanium content and surface

states in the  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  bulk alloys. **Method of research:** electron beam floating zone technique, method of conductivity modulation, X-ray microanalysis, photoelectrical and electrophysical methods of characterization,

**The results obtained and their novelty:** in this work, the growth technology of  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  single-crystal has been improved. Homogeneous  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  single crystals with a low dislocation density ( $\sim 10^2\text{-}10^4\text{cm}^{-2}$ ) and high-lifetime ( $\sim 600\text{ ms}$ ) of minority current carriers has been grown by electron-beam floating zone technique;

- for the first time the data on the height of Schottky barriers based on Au, Al has been obtained. It sharply changes at small content of Ge, and then remains practically unchanged. The data confirm the conclusion on passivation of the alloy surface from the enrichment of the crystal surface by Ge atoms, proposed before on the basis of studies  $\text{Au-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  <Li>;

- for the  $\text{Ti-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  contact has been observed monotonic increase of the barrier with increasing of Ge content, whereas for  $\text{Ni-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  due to formation of a nickel germanide layer the electrophysical properties is not described by well known expressions for IV and VF characteristics for Schottky barrier;

- the  $\text{M-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  Schottky diodes based on gold and aluminum fabricated on the surface with different surface states densities has been investigated for the first time. It has been shown that the height of the barrier correlates with the surface state density and the germanium content.

**Practical value:** the experimental results on fabricating the  $\text{M-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  Schottky barriers on the base of bulk  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  solid solutions, and on effect of Ge content to the passivation of surface states is of interest to the physics of semiconductor solid solutions and can be used for manufacturing semiconductor devices, particularly for infrared and nuclear radiation detectors based on  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  solid solutions.

**Degree of embed and economic effectivity:** part of obtained scientific results was used for research of radiation hardness and electrophysical properties of  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  devices under irradiation by neutrons, electrons and X-ray.

**Field of application:** physics of solid state, semiconductor physics, instrumentation.