

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

**САИДОВ ДИЛМУРОД ШАМУРАТОВИЧ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В МОНОКРИСТАЛЛАХ ТВЁРДЫХ РАСТВОРАХ  $Si_{1-x}Ge_x$  ( $0,001 < x < 0,20$ ) ПРИ ОБЛУЧЕНИИ НЕЙТРОНАМИ, ЭЛЕКТРОНАМИ И РЕНТГЕНОВСКИМИ КВАНТАМИ**

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 - 2009

Работа выполнена в Физико-техническом институте имени  
С.В. Стародуф ..... Республики Узбекистан

Научный руковод

Официальные ог

Ведущая орган

Защита состо  
нии Специал

A/2503

~~А~~  
~~С-149 Саидов, Д.Ш.~~

~~Исследование ра-  
диационного дефекто-  
образования в монокри-  
сталлах твёрдых рас-  
творах Si -x Ge  
x(0,001x0,20) при облу-  
чении нейтронами, элек-  
тронами и рентгенов-  
скими квантами : авто-  
реферат диссертации на  
соискание~~

да-  
че-  
есу:

**ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ  
обозначенного здесь срока**


дах,  
ого

имов А.В.

# 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

**Актуальность работы.** В настоящее время  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  твёрдые растворы стали получать весьма широкое распространение в качестве материалов для изготовления радиационно-стойких, малошумящих, быстродействующих СВЧ - приборов и интегральных схем.

Объемные монокристаллы  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  с переменным составом, выращенные зоной плавкой и методом Чохральского, используются в качестве монохроматоров тепловых нейтронов. На основе твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  также изготавливается ряд приборов: так называемые низкотемпературные датчики давления и терморезисторы, фотоприемники инфракрасного диапазона и т.д. Так как детекторы ядерного излучения на основе твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  обладают в 3 раза большей скоростью счета, чем кремниевые, этот материал особенно перспективен для изготовления детекторов ядерных излучений. При изготовлении высокотемпературных термоэлектрических генераторов (900-1200 К) для космических аппаратов эта система является незаменимой.

Особый интерес к твердым растворам  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  связан не только с их электрофизическими свойствами, но и их повышенной стойкостью к ионизирующему излучению.

**Степень изученности проблемы.** Многочисленными исследованиями твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  с малым содержанием германия (до 1-2 ат % Ge) показано, что при гамма и электронном облучении радиационная стойкость материала увеличивается с ростом концентрации германия. В литературе существуют различные объяснения этого эффекта: а) атомы Ge способствуют уменьшению концентрации и размеров мелких преципитатов междоузельного типа, которые служат центрами аннигиляции радиационных дефектов (с одной стороны) и центрами зарождения термодоноров (с другой); б) В.И. Шаховцовым и др. разработана и экспериментально подтверждена модель радиационного дефектообразования в  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $0 < x < 0,001$ ). В ней полагается, что атомы германия в решетке твёрдого раствора являются центрами аннигиляции первичных радиационных дефектов (ПРД). В этой модели скорость введения ПРД при облучении полагалась независимой от содержания германия в твёрдом растворе, так как концентрация атомов германия в решетке была намного меньше концентрации атомов кремния. Однако, в

концентрированных твердых растворах с достаточно большим содержанием германия ( $0,001 < x < 0,20$ ) скорость введения ПРД зависит от содержания германия в твердом растворе.

**Связь диссертационной работы с тематическими планами НИР.** Работа выполнена в рамках фундаментальных исследований ФТИ АН РУз по проекту № Ф.2-1-75 «Исследование физических основ технологии получения радиационно-стойких полупроводниковых материалов на основе твердого раствора  $Si_{1-x}Ge_x$  и карбида кремния для изготовления полупроводниковых приборов»

**Цель исследования:** исследование влияния изовалентной примеси на радиационное дефектообразование  $Si_{1-x}Ge_x$  монокристаллов и некоторых свойств приборных структур, облученных различными видами излучения, на легированных кристаллах с большим содержанием германия и высоких дозах облучения.

**Задачи исследования:**

- получить высокоомные ( $\sim 400$  Ом·см и больше) кристаллы  $Si_{1-x}Ge_x$  с низкой концентрацией глубоких фоновых примесей;
- исследовать однородность монокристаллов  $Si_{1-x}Ge_x$  выращенных методами безтигельной зонной плавки Чохральского;
- модернизировать установку для измерения спектров ИК поглощения  $Si_{1-x}Ge_x$  образцов, содержащих радиационные дефекты;
- исследовать влияние содержания германия на процесс дефектообразования в твердых растворах, облученных различными видами излучения (электроны, нейтроны и рентгеновские (кванты) лучи);
- исследовать некоторые характеристики p-n переходов, облученных различными видами излучения.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования являются  $Si_{1-x}Ge_x$  монокристаллы и p-n переходы на их основе, облученные нейтронами, электронами и гамма квантами. Предметом исследования являются особенности радиационного дефектообразования в твердых растворах  $Si_{1-x}Ge_x$ .

**Методы исследований:** ИК поглощение, измерение электрофизических характеристик ВАХ, ВЕХ, рентгеновский микроанализ.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Технология получения монокристаллов твердых растворов SiGe с относительно высоким удельным сопротивлением (400 Ом·см). Показано что нестабильность формы жидкой зоны и вари-

ции угла роста приводит к неоднородности распределения германия, удельного сопротивления и времени жизни носителей тока.

2. Экспериментальные данные о зависимости концентрации дивакансий от содержания германия в образцах твёрдого раствора, облученных электронами и рентгеновскими квантами. Показано, что при низких скоростях введения первичных радиационных дефектов радиационная стойкость твёрдого раствора повышается с увеличением Ge, в соответствии с моделью Шаховцова и др.

3. Экспериментальные зависимости концентрации дивакансий в нейтронно-облученных образцах твёрдого раствора кремний-германий в зависимости от содержания германия в интервале составов  $0.005 < x < 0.25$ . Показано, что при облучении быстрыми и медленными нейтронами роль аннигиляции ПРД на атомах германия снижается, что приводит к расхождению с моделью Шаховцова;

4. Теоретическое выражение, описывающее зависимости концентрации дивакансий в твёрдом растворе  $Si_{1-x}Ge_x$  при различных скоростях введения первичных радиационных дефектов (ПРД), которое можно применить и для других твердых растворов. Показано, что вид экспериментальных зависимостей концентрации дивакансий от состава твёрдого раствора при нейтронном, электронном и рентгеновском облучении находится в качественном согласии с предложенным выражением;

#### **Научная новизна:**

1. Впервые выращены и исследованы относительно высокоомные ( $\sim 400$  Ом·см и больше) монокристаллы  $Si_{1-x}Ge_x$  с низкой концентрацией глубоких фоновых примесей;

2. Впервые проведено комплексное исследование влияния содержания германия на концентрацию РД в твердых растворах  $Si_{1-x}Ge_x$  ( $0,001 < x < 0,20$ ), облученных различными (электронами, нейтронами и рентгеновскими квантами) лучами) видами излучения;

3. Развита модель РД для концентрированных твердых растворов  $Si_{1-x}Ge_x$ . Получено выражение, описывающее ход зависимостей концентрации дивакансий на образцах  $Si_{1-x}Ge_x$ , облученных электронами, быстрыми нейтронами, тепловыми нейтронами, гамма лучами и др., которое можно использовать и для других твердых растворов.

4. Впервые показано, что при указанных составах твёрдого раствора при облучении быстрыми и медленными нейтронами (при

большой скорости введения первичных радиационных дефектов) роль аннигиляции ПРД на атомах германия снижается.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Полученные в работе теоретические и экспериментальные результаты по радиационному дефектообразованию в твердых растворах  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  и влиянию облучения на свойства приборов на их основе представляют интерес для физики полупроводников. Полученные данные по выращиванию монокристаллов с низкими фоновыми примесями и другие могут быть использованы при изготовлении полупроводниковых приборов на основе твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ .

**Реализация результатов.** Полученные результаты являются основой для разработки радиационно-стойких полупроводниковых приборов на основе твердых растворов  $\text{SiGe}$ , а также высоко чувствительных детекторов ядерного излучения с рабочей температурой 300 К.

**Апробация работы.** Основные результаты работы доложены: на национальной конференции «Фотоэлектрические явления в полупроводниках 2004» Ташкент, 2004, (20-21 апрель); на конференции «Физика в Узбекистане» Ташкент, 2005 (27-28 сентября); «Рост, свойства и применение кристаллов (РСПК 2005)», Нукус, 2005 (27-29 октября); международной конференции: "Фундаментальные и прикладные вопросы физики" (Ташкент, 2003, 2004, 2006 гг.); International Conference on Quantum Complexities in Condensed Matter, Bukhara, Uzbekistan, August 21-28(2003); International Conference on Large Scale Applications and Radiation Hardness of Semiconductor Detectors, Firenze, Italy, (2005) 5-7 October; E-MRS IUMRS ICM 2006 Spring Meeting, SYMPOSIUM T, Nice, France - May 29 - June 2, 2006; SIMS Europe 2006, Munster, September 24-26, 2006.

**Опубликованность результатов.** По результатам выполненных исследований опубликовано 18 работ, в том числе 4 статьи, 14 тезисов докладов на конференциях.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объём диссертации 120 страниц, содержит 50 рисунков, 2 таблицы, список литературы из 113 наименований

## 2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

В первой главе приведён критический обзор литературных данных по выращиванию монокристаллов твердых растворов  $Si_{1-x}Ge_x$  методом электронно-лучевой бестигельной зонной плавки, об основных электрофизических свойствах твердых растворов  $Si_{1-x}Ge_x$ , о радиационном дефектообразовании в твердых растворах кремний-германий при облучении различными видами излучения.

В литературном обзоре показано, что существуют различные объяснения эффекта повышения радиационной стойкости твёрдого раствора с увеличением содержания германия. Имеются также некоторые противоречия в интерпретации результатов экспериментов по отжигу дефектов, связанных с проведением экспериментов на кристаллах с малым содержанием германия с различными примесями. При существенном увеличении интенсивности введения первичных радиационных дефектов характер реакций дефектов в твёрдом растворе может существенно измениться. Однако, сравнительные экспериментальные данные по дефектообразованию при различных скоростях введения ПРД в литературе отсутствуют.

В связи с этим, для уточнения механизмов повышения радиационной стойкости в твёрдых растворах, возникает необходимость проведения экспериментов на нелегированных кристаллах  $Si_{1-x}Ge_x$  с большим содержанием германия и высоких дозах облучения.

Во второй главе описана технология получения объемных монокристаллов  $Si_{1-x}Ge_x$ , выращенных методом бестигельной зонной плавки, проведен сравнительный анализ условий роста монокристаллов при различных методах выращивания.

Приведены экспериментальные данные по влиянию условий роста (таких как: диаметр кристалла, форма фронта кристаллизации, условия теплоотвода) на качество монокристаллов твёрдого раствора. Причем, основное внимание уделено однородности кристаллов: представлены сравнительные исследования однородности распределения германия и удельного сопротивления монокристаллов  $Si_{1-x}Ge_x$ , выращенных бестигельной зонной плавкой (ФТИ АН РУз, Узбекистан) и методом Чохральского (Институт Роста Кри-

сталлов, Германия).

Однородность кристалла (однородность по содержанию германия и распределению фоновой примеси) также в значительной степени зависит от стабильности движения границы раздела между жидкой и растущей фазой. При бестигельной зонной плавке жидкая зона удерживается поверхностным натяжением и ее форма зависит от распределения температуры в ней, скорости движения фронта кристаллизации, и конвективных потоков. И, в особенности, от скорости поступления германия в жидкую зону: при выращивании монокристаллов кремния температура плавления практически не меняется, тогда как в твёрдом растворе – температура плавления может меняться на сотни градусов. Следовательно, коэффициент поверхностного натяжения также значительно меняется. Нами показано, что нестабильность формы жидкой зоны, вариации угла роста в ходе процесса выращивания приводят к тому, что нарушение монокристалличности (образование центров кристаллизации с другой кристаллографической ориентацией) происходит по периметру растущего кристалла.

Единственным способом предотвращения или уменьшения этих явлений в настоящее время является резкое (на порядки) уменьшение скорости роста.

В третьей главе приведены результаты исследования радиационного дефектообразования в твердых растворах  $Si_{1-x}Ge_x$  при различных видах облучения, описана методика измерений, предложена модель дефектообразования в твёрдом растворе.

В данной главе развита модель радиационного дефектообразования Шаховцова В.И. и др. В модели Шаховцова и др. полагается, что изовалентная примесь Ge с большим радиусом может создавать комплексы с вакансиями. В нашей модели учтена зависимость скорости введения первичных радиационных дефектов (междоузельных атомов I, вакансий V и дивакансий V2) от состава. Скорости введения первичных радиационных дефектов полагались линейно зависимыми от  $x$  (атомная доля германия в твёрдом растворе).

$$\alpha = \alpha_0 - m \cdot x, \quad \beta = \beta_0 - l \cdot x \quad \text{и} \quad \alpha_1 = m_1 \cdot x, \quad \beta_1 = n_1 \cdot x. \quad (1)$$

При этом  $\alpha_0$ ,  $\beta_0$  – соответствовали чистому кремнию, а  $\alpha_1 = m_1$  и  $\beta_1 = n_1$  – соответствовали чистому германию.



Составлена система уравнений описывающих реакции дефектов при облучении твердого раствора:

$$\begin{cases} \dot{I} = (\alpha + 2\beta + \alpha_1 + 2\beta_1) \cdot i - \omega_{I,V} I \cdot V - \omega_{I,V_2} I \cdot V_2 - \omega_{I,GeV} I \cdot GeV - \omega_{I,GeV_2} I \cdot GeV_2 \\ \dot{V} = \alpha \cdot i + \omega_{I,V_2} I \cdot V_2 - \omega_{I,V} I \cdot V - \omega_{V,V} V^2 - \omega_{V,GeV} V \cdot GeV - \omega_{V,Ge} V \cdot Ge \\ \dot{V}_2 = \beta \cdot i + \omega_{V,V} V^2 - \omega_{I,V_2} I \cdot V_2 \\ \dot{GeV} = \alpha_1 \cdot i + \omega_{I,GeV_2} I \cdot GeV_2 + \omega_{V,Ge} V \cdot Ge - \omega_{I,GeV} I \cdot GeV - \omega_{V,GeV} V \cdot GeV \\ \dot{GeV}_2 = \beta_1 \cdot i + \omega_{V,GeV} V \cdot GeV - \omega_{I,GeV_2} I \cdot GeV_2 \\ \dot{Ge} = \omega_{I,GeV} I \cdot GeV - \omega_{V,Ge} V \cdot Ge - (\alpha_1 + \beta_1) \cdot i \end{cases} \quad (2)$$

Здесь  $I, V, V_2, Ge, GeV, GeV_2$  – концентрации соответствующих дефектов и комплексов; величины  $\omega_{i,j}$  – сечения соответствующих реакций между дефектами;  $i$  – интенсивность облучения;  $\alpha = \alpha_{Si}(1-x)$   $\beta = \beta_{Si}(1-x)$   $\alpha_1 = \alpha_{Ge} x$   $\beta_1 = \beta_{Ge} x$ ,  $x$  – содержание германия в атомной доле.  $N_s$  – плотность узлов решетки кристалла.

Применяя квазистационарные условия ( $\dot{I} = 0, \dot{V} = 0, \dot{GeV} = 0$ ), а также учитывая, что концентрация германия в твердом растворе на несколько порядков выше концентрации радиационных дефектов для величины  $v_2 = V_2 + GeV_2$  получено решение следующего вида:

$$v_2 \approx \frac{1}{2} \frac{\omega_{V,V} (\alpha_{Si} + \beta_{Si} + x(\beta_{Ge} - \alpha_{Si} - \beta_{Si})) i t}{\omega_{V,V} + \frac{\omega_{V,Ge}^2 x^2 N_s^2}{(\alpha_{Si} + \beta_{Si} + x(\beta_{Ge} - \alpha_{Si} - \beta_{Si})) i}} \quad (3)$$

Важной особенностью полученных решений является то, что в основе положено только одно предположение, что изовалентная примесь с большим радиусом может создавать ассоциации с вакансиями. Таким образом, полученное выражение может использоваться и для других твердых растворов.

Так как в знаменателе выражения (1) входит интенсивность облучения, то при одних и тех же дозах облучения  $\Phi=it$ , в зависимости от интенсивности могут наблюдаться различные зависимости  $N_{V2}(x)$  (см.рис 1).

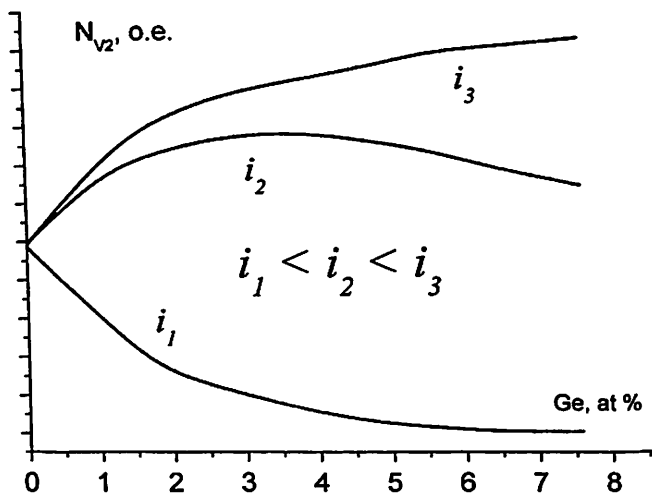


Рис. 1. Возможные виды зависимостей концентрации дивакансий при облучении с различной интенсивностью.

Проведено экспериментальное исследование радиационное дефектообразование в твёрдом растворе при разных скоростях введения первичных радиационных дефектов. Чтобы скорости введения первичных радиационных дефектов различалось на порядки облучение проводилось нейтронами, электронами и рентгеновскими квантами.

Для исследования дефектообразования при высоких и очень высоких скоростях введения первичных радиационных дефектов облучение проводилось медленными и быстрыми нейтронами (при дозе  $10^{18}$  и  $10^{20}$  см<sup>-2</sup>).

Для оценки концентрации радиационных дефектов (дивакансий) нами была применено значение коэффициента ИК поглощения в области поглощения дивакансий (коэффициент поглощения прямо пропорционален концентрации радиационных дефектов). На рис. 2 и 3 приведены зависимости коэффициента поглощения в зависимо-

сти от состава образцов после облучения быстрыми и медленными нейтронами.

Как видно, при облучении нейтронами не наблюдается увеличения радиационной стойкости материала. При облучении быстрыми нейтронами скорость введения первичных радиационных дефектов настолько высока, что процессы их аннигиляции не проявляются. Однако, при облучении медленными нейтронами при содержании германия свыше 8 атомных процентов, концентрация дивакансий начинает снижаться. Таким образом, при указанных составах начинает проявляться аннигиляция первичных радиационных дефектов на изовалентных примесях германия.

Как видно, характер зависимостей концентрации дивакансий от состава твёрдого раствора при нейтронном облучении находится в качественном согласии с выражением (3).

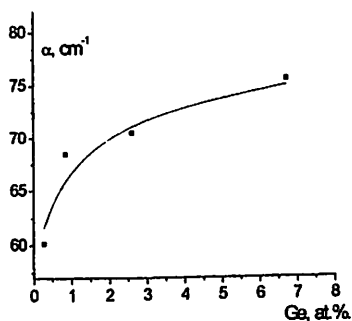


Рис. 2. Зависимость концентрации дивакансий (в отн.ед.) от состава при облучении быстрыми нейтронами.

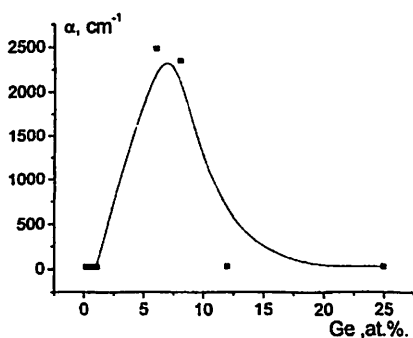


Рис. 3. Зависимость концентрации дивакансий (в отн.ед.) от состава при облучении медленными нейтронами.

Для исследования дефектообразования при относительно средних скоростях введения первичных радиационных дефектов облучение проводилось электронами с энергией 5 мэВ, при трех дозах облучения  $10^{17}$  см<sup>-2</sup>,  $5 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>,  $10^{16}$  см<sup>-2</sup>.

Концентрацию дивакансий в относительных единицах определяли по данным ИК поглощения в полосе поглощения дивакансий.

В качестве оценки концентрации дивакансий обычно используют высоту пика поглощения дивакансий. Однако, как показано в ряде исследований, пики оптического поглощения уширяются в сплавах и твердых растворах из-за нарушения трансляционной симметрии решетки и флуктуаций состава. Это уширение сильно проявляется при большом содержании германия в твердом растворе. В таких случаях, для оценки обычно используется не высота пика, а ее площадь.

Следует отметить, что уширение пиков поглощения приводит к перекрытию соседних пиков. В связи с этим, нами проводилась компьютерная подгонка данных ИК поглощения. Компьютерная обработка осуществлялась с учетом двух ближайших соседних пиков поглощения от других дефектов кристалла (см. рис. 4). Более дальние пики при подгонке не учитывались - полагалось, что перекрытие дальних пиков несущественно.

На рис. 5 приведена зависимость концентрации дивакансий в твердом растворе в зависимости от состава для различных доз облучения электронами. Как видно, с ростом содержания германия при всех дозах облучения концентрация дивакансий падает.

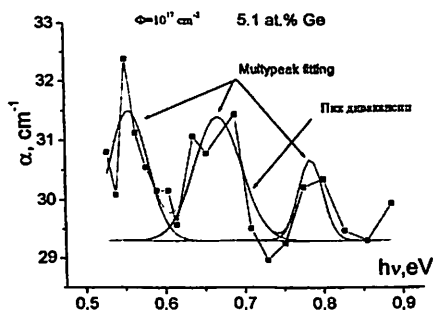


Рис. 4. ИК спектр образца с содержанием германия 5,1 ат %.

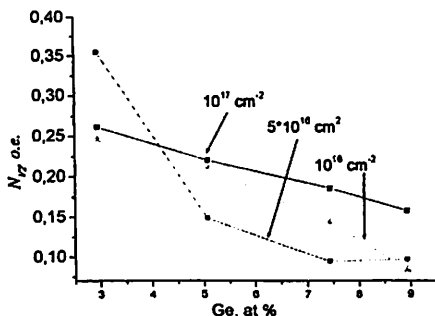


Рис. 5. Зависимость концентрации дивакансий в твердом растворе в зависимости от состава для различных доз облучения, облучённых электронами.

Для исследования дефектообразования, при относительно низких скоростях введения первичных радиационных дефектов, об-

лучение проводилось рентгеновскими квантами на установке УРС-55 при трех дозах облучения ( $U=50$  кВ,  $I=15$  мА, время облучения 30, 60 и 120 минут).

На ИК спектрах образцов, слева от пика поглощения дивакансии, наблюдалось плато, в связи с этим, компьютерная подгонка данных ИК поглощения осуществлялась с учетом двух пиков. Рисунки 6 и 7 иллюстрирует подгонку для контрольного образца кремния и твёрдого раствора с 6 ат % Ge (доза 1).

Следует отметить, что в случае рентгеновского облучения характер процессов существенно меняется. Если при нейтронном и электронном облучении дивакансии входят в состав первичных радиационных дефектов, то при гамма и рентгеновском облучении дивакансии не являются первичными радиационными дефектами. В этом случае, в выражении для концентрации дивакансий (3) следует принять соответствующие коэффициенты ( $\beta$ ) равными нулю и оно приобретает вид:

$$v_2 \approx \frac{1}{2} \frac{\omega_{V,V}(\alpha_{Si} - x\alpha_{Si})it}{\omega_{V,V} + \frac{\omega_{V,Ge}^2 x^2 N_s^2}{(\alpha_{Si} - x\alpha_{Si})i}} \quad (4)$$

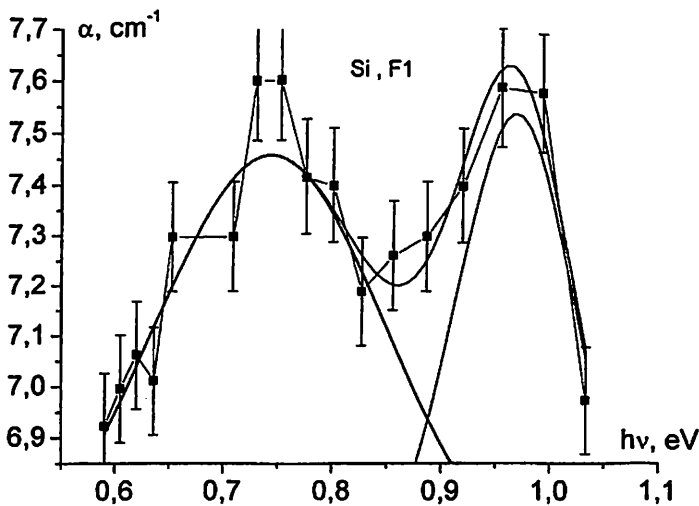


Рис. 6. ИК спектр поглощения кремния.

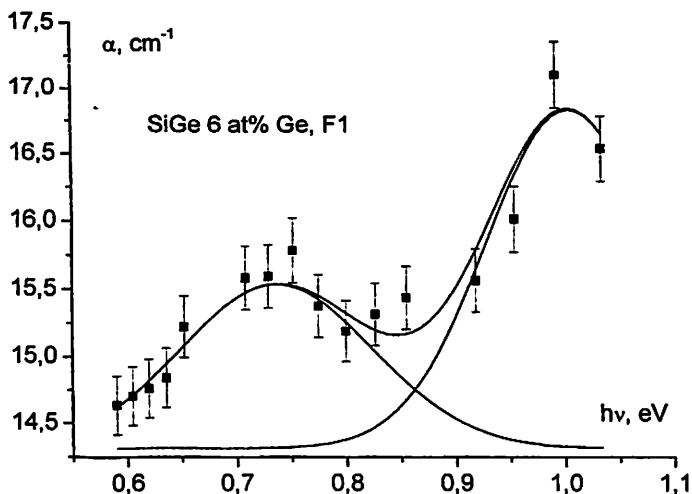


Рис. 7. ИК спектр поглощения образца с содержанием германия 6 %.

В таблице 1 приведены результаты оценок концентрации дивакансий по площади их пиков, полученных компьютерной подгонкой для образцов облученных рентгеновскими квантами.

Таблица 1

**Концентрации дивакансий  
после облученных рентгеновскими квантами**

№ образца	Содержание германия, ат %	Доза облучения	Концентрация дивакансий (площадь пика, отн. ед)
Si1	0	1	0,109
Si2	0	2	0,202
Si3	0	3	0,425
SiGe № 1-51	2,2	1	0,270
SiGe №1-31	4,7	1	0,129
SiGe №1-21	6	1	0,187
SiGe №1-52	2	2	0,346
SiGe №1-37	3,9	2	0,243
SiGe №1-24	5,7	2	0,109
SiGe №1-53	1,9	3	0,163
SiGe №1-39	3,6	3	0,140
SiGe №1-23	5,8	3	0,119

Таким образом, впервые исследовано радиационное дефектообразование в твёрдых растворах кремний-германий в интервале составов до 6 ат % германия при рентгеновском облучении. Показано, что с ростом содержания германия при высоких дозах облучения концентрация дивакансий снижается.

В четвёртой главе исследовано влияние радиационного облучения на некоторые характеристики р-п  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  переходов при больших дозах облучения. р-п переходы были изготовлены термической диффузией фосфора при  $T=1150\text{ C}^0$  в течении 15 мин.

Образцы, облученные нейтронами при повышенных дозах (до  $10^{18}\text{ н/см}^2$ ), были сильно перекомпенсированы радиационными дефектами и их ВАХ были линейными.

Исследование р-п  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  переходов облученных электронами при дозах  $5 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-2}$  показало, что обратный ток возрастает (на полтора - два порядка) в облученных образцах. Это связано с генерацией носителей тока через уровни радиационных дефектов (РД) в обедненной зоне перехода, которая должна быть пропорциональна корню квадратному от приложенного напряжения (ширина обедненной зоны  $\sim V^{1/2}$ ). Измеренная величина обратного тока подчиняется закону  $\sim V^{1/2}$ , что подтверждает наше предположение.

Прямой ток облученных образцов также возрастает, что связано со снижением высоты барьера р-п перехода из-за того, что в облученном полупроводнике уровень Ферми смещается к середине запрещенной зоны.

При  $h\nu < E_g$  спектр представляет собой бесструктурную полосу из-за наличия нескольких различных глубоких уровней, связанных с радиационными дефектами, имеющих широкие, перекрывающиеся друг с другом полосы поглощения. Именно, в связи с этим, для облученных (но не подвергнутых избирательному термическому отжигу) образцов, данные фототока не могут быть использованы для оценки концентрации и характеристик РД и для их оценки часто используется ИК поглощение образцов. При  $h\nu > E_g$  в спектре фототока по сравнению с необлученными образцами появляются пики и «ступени», связанные с рекомбинацией неравновесных носителей заряда на уровнях РД модулированных светом.

Исследована ВАХ и емкость структур (при 5 МГц) при комнатной температуре р-п  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  переходов облученных рентгенов-

скими квантами при различных дозах облучения. Показано, что емкость переходов после облучения изменялась незначительно. Так как при облучении в обедненной области появляются заряженные дефекты, малое изменение емкости свидетельствует о расширении обедненной области и уменьшении высоты барьера.

В зависимости от качества исходных структур в некоторых образцах наблюдалось улучшение прямой ветви ВАХ из-за улучшения свойств металлических контактов ( $\text{Si}$ ,  $\text{Si}_{0,992}\text{Ge}_{0,008}$  и др). В образцах с хорошими металлическими контактами наблюдается уменьшение наклона прямой ветви ВАХ из-за повышения сопротивления базы. Характер обратной ветви ВАХ определялся изменением величины барьера p-n переходов. С возрастанием дозы облучения обратный ток структур растет из-за уменьшения высоты барьера переходов.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Изучены особенности выращивания монокристаллов твердого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , освоена технология выращивания методом бестигельной зонной плавки. Выращены монокристаллы твердого раствора с удельным сопротивлением  $\sim 400$  Ом см. Показано что нестабильность формы жидкой зоны и вариации угла роста приводит к неоднородности распределения германия, удельного сопротивления и времени жизни носителей тока.

2. Модифицирована модель, предложенная Шаховцовым и др., в которой учтена зависимость скорости введения первичных радиационных дефектов от состава твердого раствора. Предложено выражение для зависимости концентрации дивакансий в твердом растворе  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  при различных скоростях введения первичных радиационных дефектов, которое можно применить также для других твердых растворов.

3. Для оценки концентрации дивакансий по данным оптического ИК поглощения предлагается вместо величины пика использовать площадь пика полосы поглощения в спектре. Показано, что вид зависимостей концентрации дивакансий от состава твердого раствора, при различных скоростях введения первичных радиационных дефектов, находится в качественном согласии, с полученным выражением для концентрации дивакансий.



4. Освоена методика измерения емкостных характеристик образцов, учитывающая особенности свойств структур, компенсированных радиационными дефектами. Впервые исследовано влияние электронного облучения на вольтамперные и спектральные характеристики кремний германиевых р-п переходов, при больших дозах облучения до  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ . Впервые исследованы кремний германиевые р-п-переходы, облученные рентгеновским излучением. Измерения высоты барьера переходов по ВАХ и по СВ-характеристикам до и после облучения показали, что в пределах экспериментальной ошибки величина барьера не меняется.

#### 4. СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

- ✓ 1. Саидов М.С., Лутпуллаев С.Л., Юсупов А., Атабаев И.Г., Матчанов Н.А., Саидов Д., Хажиев М.У. Зависимость концентрации дивакансий от содержания германия в сплаве  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  при облучении быстрыми и медленными нейтронами // Физика твердого тела. – Санкт-Петербург, 2007. – № 9(49). – С. 1044-1050.
2. Атабаев И.Г., Матчанов Н.А., Бахранов Э.Н., Хажиев М.У., Саидов Д. Исследование корреляции времени жизни и удельного сопротивления кристаллов сплава  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  выращенных бестигельной зонной плавкой // ДАН РУз. – Ташкент, 2007. – №4. – С. 30-32
3. Атабаев И.Г., Саидов Д. Решение системы уравнений, описывающих образование дивакансий в твердых растворах  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  // УзФЖ. – Ташкент, 2008. – № 1(10). – С. 54-57
- ✓ 4. Atabaev I.G., Matchanov N.A., Yusupov A., Saidov D.Sh., Saidov M.S. Influence of Ge content on formation of radiation defects in  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  solid solutions // Computational Materials Science. – 2008. – №6 (44). – P. 832-834
5. Рузин А., Ярославский И., Саидов М.С., Атабаев И.Г., Матчанов Н.А., Бахранов Э.Н., Хажиев М.У., Саидов Д. Исследование вольфарадных и вольтамперных характеристик  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  структур с охранными кольцами // Труды I- международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» 27-28 ноября 2003. – Ташкент, 2003. – С. 269-270.

6. Атабаев И.Г., Матчанов Н.А., Хажиев М.У., Саидов Д. Спектральная зависимость фототока р-п  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  облученных электронами // Материалы конференции «Фотоэлектрические явления в полупроводниках 2004». - Ташкент, 2004, - С.102-103.
7. I.G. Atabaev, N.A. Matchanov, E.N. Bakhranov, M. Hajiev, D.S. Saidov. On radiation stability of devices on the base of Si-rich SiGe alloys // Book of abstracts of the 20th General Conference of the Condensed Matter Division of the European Physical Society. - Prague, Czech Republic, 2004, - P.118.
8. Матчанов Н.А., Саидов М.С., Атабаев И.Г., Хажиев М.У., Саидов Д., Бахранов Э.Н., Abrosimov N.V., Shroeder W., Reeman H. Исследование однородности монокристаллов сплава  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  выращенных методом электроннолучевой бестигельной зонной плавки и методом Чохральского // Труды II- международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики». – Ташкент, 2004. - С. 288-289.
9. Атабаев И.Г., Матчанов Н.А., Саидов Д.С., Хажиев М., Салиев Т.М. Радиационное дефектообразование в концентрированных полупроводниковых твердых растворах  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  // Материалы конференции посвященной Году физики-2005 «Физика в Узбекистане». – Ташкент, 2005. – С. 48-50.
10. Атабаев И.Г., Саидов М.С., Лутпуллаев С.Л., Матчанов Н.А., Салиев Т.М., Бахранов Э.Н., Саидов Д., Хажиев М.У. Особенности измерения емкости р-п переходов и барьеров Шоттки на основе  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  содержащих радиационные дефекты // Материалы IV Республиканской конференции «Рост, свойства и применение кристаллов (РСПК 2005)». - Нукус, 2005. - С. 14-18.
11. Юсупов А., Атабаев И.Г., Лутпуллаев С.Л., Матчанов Н.А., Саидов Д., Хажиев М.У. Исследование радиационного дефектообразования в сплаве  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  при облучении быстрыми и медленными нейтронами // Материалы IV Республиканской конференции «Рост, свойства и применение кристаллов (РСПК 2005)». - Нукус, 2005. – С. 46-48.
12. Atabaev I.G., Matchanov N.A., Saidov D.Sh., Khajiev M., Abrosimov N.V., Shroeder W., Irmischer K., Riemann H. About large Schottky barrier height in nuclear detectors on the base of  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  alloy // 7th International Conference on Large Scale Applications and Radiation Hardness of Semiconductor Detectors. - Firenze, Italy, 2005. - P. 38.

13. Atabaev B.G., Atabaev I.G., Nevzorov V.A., Matchanov N.A., Saidov D., Yuzikaeva F.R. The application of microwave 5 mev electron accelerator for radiation effects and hardness investigation of silicon, silicon-germanium and silicon carbide detectors // 7th International Conference on Large Scale Applications and Radiation Hardness of Semiconductor Detectors. - Firenze, Italy, 2005. – P.14.

14. Атабаев И.Г., Матчанов Н.А., Саидов Д.Ш., Хажиев М.У. О влиянии содержания германия на радиационное дефектообразование в твердых растворах  $Si_{1-x}Ge_x$  // Труды научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы физики полупроводников». – Андижан, 2005. – С.19.

15. Атабаев И.Г., Матчанов Н.А., Саидов Д., Хажиев М.У., Хапизов У.Ж. Исследование корреляции формы жидкой зоны и однородности кристаллов при бестигельной зонной плавке // Труды III-международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики». - Ташкент, 2006. - С. 169-170.

16. Атабаев И.Г., Матчанов Н.А., Бахранов Э.Н., Хажиев М.У., Саидов Д., Исследование корреляции времени жизни и удельного сопротивления кристаллов сплава  $Si_{1-x}Ge_x$  выращенных бестигельной зонной плавкой // Труды III-международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики». - Ташкент, 2006. - С. 169-170.

17. Atabaev I.G., Matchanov N.A., Saidov D., Ni Germanosilicide Fabricated on Basis of Bulk  $Si_{1-x}Ge_x$  Alloy // Magnetik and Superconducting Materials (MSM 07). 25-30<sup>th</sup> September 2007. – Khiva, 2007. – P. 61.

18. Saidov D., Researchh of the dependencies of the divacancies concetration on Ge content in  $Si_{1-x}Ge_x$  ( $0 < x < 0,10$ ) alloy for electron irradiation. Magnetik and Superconducting Materials (MSM 07). 25-30<sup>th</sup> September 2007, – Khiva, 2007. – P.62.

## РЕЗЮМЕ

диссертации Саидова Д.Ш. на тему: «Исследование радиационного дефектообразования в монокристаллах твёрдых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $0,001 < x < 0,20$ ) при облучении нейтронами, электронами и рентгеновскими квантами» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников

**Ключевые слова:** твёрдый раствор, первичные радиационные дефекты, дивакансии, скорость введения первичных радиационных дефектов.

**Объекты исследования:** облученные монокристаллы  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$

**Цель работы:** исследование влияния изовалентной примеси на параметры  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  материала и приборных структур, облученных различными видами излучения на легированных кристаллах с большим содержанием германия и высоких дозах облучения

**Методы исследования:** ИК поглощение, измерение электрофизических характеристик, ВАХ, ВЕХ, рентгеновский микроанализ.

**Полученные результаты и их новизна:** изучены особенности роста монокристаллов твёрдого раствора и освоена технология выращивания методом бестигельной зонной плавки. Показано что нестабильность формы жидкой зоны и вариации угла роста приводит к неоднородности распределения германия, удельного сопротивления. Выращены монокристаллы с удельным сопротивлением  $\sim 400$  Ом см. Развита модель радиационного дефектообразования Шаховцова и др. Предложено выражение, качественно предсказывающее зависимости концентрации дивакансий в твёрдом растворе  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  при различных скоростях введения первичных радиационных дефектов. Показано, что вид зависимостей концентрации дивакансий от состава сплава при нейтронном, электронном и рентгеновском облучении находится в качественном согласии, с полученным выражением. Исследовано влияние электронного и рентгеновского облучения на вольт-амперные и спектральные характеристики p-n  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  переходов, при больших дозах облучения и больших содержаниях германия.

**Практическая значимость:** полученные результаты по радиационному дефектообразованию в  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  и влиянию облучения на свойства приборов на их основе представляют интерес для физики полупроводников. Полученные данные по выращиванию монокристаллов могут быть использованы при изготовлении полупроводниковых приборов на основе  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ .

**Степень внедрения и экономическая эффективность:** полученные результаты являются основой для разработки радиационно-стойких полупроводниковых приборов, а также высоко чувствительных детекторов ядерного излучения с рабочей температурой 300 К в научных учреждениях АН РУз и других приборостроительных организациях.

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

Физика – математика фанлари номзоди илмий даражасига талабгор Саидов Дилмурод Шамуратовичнинг 01.04.10 – яримўтказгичлар физикаси ихтисослиги бўйича “Нейтрон, электрон ва рентген квантлари билан нурлантирилган  $Si_{1-x}Ge_x$  ( $0,001 < x < 0,20$ ) каттик қотишмаларида радиацион нуқсонларнинг ҳосил бўлишини ўрганиш” мавзусидаги диссертациясининг

## РЕЗЮМЕСИ

**Таянч сўзлар:** каттик қотишма, бирламчи радиацион нуқсонлар, дивансия, бирламчи радиацион нуқсонларни киритиш тезлиги.

**Тадқиқот объектлари:** нурлантирилган  $Si_{1-x}Ge_x$  монокристаллари

**Ишнинг мақсади:** ката дозалар билан нурлантирилган, таркибда Ge микдорой юқори бўлган  $Si_{1-x}Ge_x$  материал ва асбобларнинг хоссаларига Ge изовалент киритманинг таъсирини ўрганиш.

**Тадқиқот методлари:** инфра қизил ютилиш, электрофизик хусусиятларини ўлчаш, ВАХ, ВСХ, рентген микроанализ.

**Олинган натижалар ва уларнинг янгилиги:** SiGe монокристал ўстириш хусусиятлари ўрганилди ва тигелсиз зонали ўстириш усули ўзлаштирилди. Ўстириш жараёнида суяқ соҳа турғунсизлиги ва ўсиш бурчагининг вариацияси германий тақсимотининг, солиштирма қаршилиқнинг ва ток ташувчиларнинг яшаш вакнини биржинсиз тақсимотига олиб келиши кўрсатилган. Солиштирма қаршилиги ~400 Ом см бўлган SiGe монокристаллари ўстирилди. Шаховцовнинг радиацион нуқсонлар ҳосил бўлиш модели ривожлантирилди. SiGe каттик қотишмаларда бирламчи радиацион нуқсонлар киритиш тезлигини ҳисобга оладиган радиацион нуқсонларнинг концентрацияси учун янги ифода таклиф қилинган. Уш бу ифодани нейтрон, электрон, ва рентген квантлари билан нурлантирилган наъмуналарда олинган экспериментал натижаларига мос келиши кўрсатилган. Электрон ва рентген нурларини катта дозада ва  $0,01 < x < 0,2$  бўлган  $Si_{1-x}Ge_x$  p-n ўтишларнинг электрофизик ва спектрал хоссаларига таъсири урганилган.

**Амалий аҳамияти:**  $Si_{1-x}Ge_x$  материали ва асбобларда нуқсонлар ҳосил бўлиши, хоссаларининг ўзгариши бўйича олинган назарий ва экспериментал натижалари яримўтказгич физикаси ва асбобсозлик учун аҳамиятга эга. Юқори солиштирма қаршиликли монокристаллар ўстириш бўйича олинган маълумотлар  $Si_{1-x}Ge_x$  асосида яримўтказгич асбобларни ясашда қўлланилиши мумкин.

**Татбиқ этиш даражаси ва иқтисодий самарадорлиги:** олинган натижалар ЎзРФА илмий муассасаларида ва бошқа асбобсозлик ташкилотларида радиацияга чидамли яримўтказгич асбоблар яратиш учун ҳамда ядровий детекторлари яшаш учун асос бўла олади, қўлланилади.

**Қўлланилиш соҳаси:** каттик жисм физикаси, яримўтказгичлар физикаси, асбобсозлик.

## RESUME

Thesis of D.S. Saidov on the scientific degree competition of the doctor of philosophy in physics-mathematics on speciality 01.04.10 - semiconductor physics subject "Research of radiation defect formation in  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  solid solutions ( $0,001 < x < 0,20$ ) under irradiation by neutrons, electrons and X-ray quantum"

**Key words:** solid solution, primary radiation defects, divacancy, rate of introduction of primary radiation defects.

**Subjects of research:** irradiated  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  single crystals.

**Purpose of work:** research of influence of Ge isovalent impurity on properties of  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  material and devices, irradiated by neutron, electron and X-ray quantum on nondoped crystals with the large contents of Ge and high doses of an irradiation

**Method of research:** an Infra Red absorption, measurement of the electro-physical characteristics as IV, VF etc, x-ray microanalysis.

**The results obtained and their novelty:** the features of growth of  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  single crystals are investigated and crystals of an alloy with specific resistance  $\sim 400$  Ohm cm are grown. The correlation of the shape of front of crystallization with distribution of Ge, specific resistance and lifetime of current carriers is established.

The model of radiation defect formation of Shakhovcov is developed. A new expression was obtained which describes the dependence of divacancy concentration in  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  alloy at various introduction rates of primary radiation defects under electron, thermal and fast neutron irradiation. This expression can be applied also to other solid solutions.

It is shown, that the experimental dependences of divacancy concentration in alloy after a neutron, electronic and x-ray irradiation is in the qualitative consent, with the obtained expression.

For the first time research of influence of an electronic and x-ray radiation irradiation on IV and spectral characteristics of p-n  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  junctions for large doses of an irradiation and large contents of Ge are carried out.

**Practical value:** theoretical and experimental results on radiation defect formation in  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  and influence of an irradiation on properties of devices on their basis are interest for physics of semiconductors. The obtained data on growth of single crystals etc can be used for manufacturing semiconductor devices on the basis of solid solutions  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ .

**Degree of embed and economic effectivity:** the obtained results are a basis for development of radiation-proof SiGe semiconductor devices and high sensitive nuclear detectors with working temperature  $\sim 300$  K in research organizations of Uzbekistan Science Academy and other institutions.

**Field of application:** solid state physics, physics of semiconductors, semiconductor device and material science.

**Формат А5. Объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз.**

**Отпечатано в минитипографии Управления делами АН РУз:  
700047, Ташкент, ул. акад. Я. Гулямова, 70.**