

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.315.592

**ВАБИЩЕВИЧ СЕРГЕЙ АНАНЬЕВИЧ**

**ПРОЦЕССЫ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ  
В КРЕМНИИ И ФОСФИДЕ ГАЛЛИЯ,  
ЛЕГИРОВАННЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ  
И ИЗОВАЛЕНТНЫМИ ПРИМЕСЯМИ**

01.04.10 — физика полупроводников и диэлектриков

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Минск 1997

Работа выполнена на кафедре физики полупроводников  
Белорусского государственного университета

Научный руководитель: кандидат физико-математических  
наук, старший научный сотрудник  
БРИНКЕВИЧ Д.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
старший научный сотрудник  
ДУТОВ А.Г.

кандидат физико-математических  
наук, доцент  
ЛИТВИНКО А.Г.

Оппонирующая организация: Минский научно-исследовательский  
институт радиоматериалов

Защита состоится 11 апреля 1997 г. в 14 часов на заседании Совета  
по защите диссертаций Д 02.01.16 в Белорусском государственном  
университете (220050, г. Минск, пр. Ф.Скорины 4, Белгосуниверситет,  
главный корпус, к. 206).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белгосуниверситета

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1997 г.

Ученый секретарь Совета,  
доцент



В.Ф.Стельмах

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В последние годы значительно возрос интерес к легированию полупроводников нетрадиционными примесями: редкоземельными элементами (РЗЭ) и изоэлектронными примесями (ИВП), которые непосредственно после выращивания монокристаллов не проявляют электрической активности, однако могут существенно влиять на процессы дефектообразования и на состояние примесно-дефектного состава кристалла в целом. Интерес к кремнию и фосфиду галлия определяется тем, что эти материалы могут быть использованы как для изготовления приемников, так и источников видимого и ИК-излучения. Для создания ИК-приемников с максимумом чувствительности в области 1,5 мкм перспективно применение выращенного по методу Чохральского кремния, компенсированного примесями (в частности, Au), создающими глубокие уровни в запрещенной зоне. Излучающие элементы ИК-диапазона разрабатываются на основе соединений  $A^{III}B^V$ , легированных редкоземельными примесями.

Несмотря на достаточно интенсивные исследования полупроводников, содержащих редкоземельные элементы и изоэлектронные примеси, ряд важных вопросов к моменту постановки данной работы оставался открытым. Так, например, было недостаточно изучено поведение основных легирующих примесей (B, P) в Si:ИВП. Учитывая, что для изготовления приемников ИК-излучения используется кремний, выращенный методом Чохральского и легированный золотом, важным представляется выяснение влияния изоэлектронных примесей (Ge, C) на состояние и поведение примеси золота в кремнии. Особо следует отметить, что практически отсутствуют в литературе данные, касающиеся влияния лантаноидов и ИВП на механические свойства монокристаллического кремния. Научная и практическая значимость этих исследований заключается в том, что с контактным воздействием и контактной деформацией связаны многие операции в технологическом процессе изготовления полупроводниковых приборов (резание, шлифовка, термокомпрессия, локальная диффузия,

ноидов и исовалентных примесей в кремнии и фосфиде галлия, могут быть использованы при совершенствовании технологии получения полупроводниковых материалов (в частности, монокристаллов Si и эпитаксиальных слоев GaP) без кардинального изменения самого процесса выращивания.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальное подтверждение и физическое обоснование закономерностей изменения редкоземельными и исовалентными примесями дефектно-примесного состава монокристаллического кремния;

2. Доказательство участия лантанонидов в формировании акцепторных дефектов в эпитаксиальных слоях фосфида галлия;

3. Наличие микровключений фосфида галлия в эпитаксиальных слоях AlGaP, полученных кристаллизацией из растворов-расплавов на основе индия.

Личный вклад соискателя. Все приведенные в диссертационной работе результаты получены лично соискателем и были проанализированы с научным руководителем. Соавторы опубликованных работ принимали участие в подготовке исследований, проведении отдельных экспериментов и обсуждении результатов. Обработка и интерпретация данных, а также выводы сделаны автором лично.

Апробация и опубликованность результатов. Основные результаты диссертационной работы докладывались на III и IV международных семинарах "Нелинейные явления в сложных системах" (Полоцк, 1994 г.; Минск, 1995 г.), первой Всероссийской конференции по материаловедению и физико-химическим основам технологий получения легированных кристаллов кремния ("Кремний-96" Москва, 19-22 ноября, 1996 г.), на семинарах кафедры физики Полоцкого государственного университета и кафедры физики полупроводников Белгос-университета. Содержание диссертационной работы отражено в 12 печатных работах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, основных выводов и списка использованных источников. Объем диссертации составля-

ет 118 страниц, в том числе 25 иллюстраций и 7 таблиц. Список использованных источников включает в себя 160 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во введении проведена оценка современного состояния решаемой проблемы, определены основания и исходные данные для разработки темы, дано обоснование проведения работы.

В общей характеристике работы обоснована актуальность темы, сформулированы цель работы, научная новизна, практическая и экономическая значимость полученных результатов и основные положения, выносимые на защиту. Приводится структура диссертации и список опубликованных работ.

В первой главе представлен обзор литературных данных о поведении изоэлектронных и редкоземельных примесей в кремнии и в соединениях  $A^{III}B^V$ . Большое внимание уделяется поведению примесей германия и углерода в кремнии. Рассмотрены вопросы термического дефектообразования в монокристаллическом кремнии, легированном РЗЭ и ИВП. Особое место занимает анализ особенностей образования дефектов, их взаимодействия друг с другом и с примесями в Si и GaP. На его основании сформулированы задачи, решаемые в диссертации.

Во второй главе описаны особенности и условия подготовки образцов к измерениям, а также кратко проанализированы экспериментальные методики, использовавшиеся в настоящей работе.

Измерения эффекта Холла и проводимости осуществлялись в температурном интервале 78-300 К по стандартной методике в режиме постоянного электрического и магнитного полей. Спектры ИК-поглощения регистрировались дифференциальным методом в области длин волн 1-25 мкм с помощью спектрофотометра "Specord-75 IR". Спектры фотolumинесценции регистрировались в диапазоне 500-1000 нм при температурах 4,2-300 К с освещаемой стороны образ-

цов. Примесный состав определялся методом нейтронно-активационного (НАА) анализа с использованием спектрометрической установки ЛП-48-40. Микротвердость образцов измерялась на приборе ПМТ-3. В работе использовались также методы оптической микроскопии в сочетании с селективным травлением.

Исследовались монокристаллы кремния *n*- и *p*-типа проводимости, выращенные по методу Чохральского (Cz-Si) и бестигельной зонной плавки (Fz-Si). Легирование примесями Ge, Gd, Dy, Er осуществлялось добавлением навесок соответствующих элементов в расплав. Концентрация редкоземельных и изовалентных примесей измерялась методом нейтронно-активационного анализа. Монокристаллы имели исходное удельное сопротивление 10-2000 Ом·см. Параллельно исследовались нелегированные образцы Si с идентичными параметрами.

Эпитаксиальные слои (ЭС)  $Al_xGa_{1-x}P$  ( $0,06 < x < 0,47$ ) толщиной 3-19 мкм выращивались на подложках GaP кристаллизацией из растворов-расплавов на основе In в температурном интервале 650-980°C. Параллельно исследовались ЭС GaP (толщиной до 15 мкм), полученные в идентичных условиях. Концентрация лантаноидов (Gd, Dy, Er) по данным НАА в слоях была  $< 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Полученные эпитаксиальные слои имели *n*-тип проводимости. Содержание изовалентной примеси In в слоях было ~3-4 масс.%. В качестве контрольных исследовались эпитаксиальные слои фосфида галлия, выращенные методом газофазной эпитаксии.

Третья глава содержит результаты исследования микротвердости и примесного состава монокристаллического кремния, содержащего ИВП и РЗЭ.

Исследования микротвердости *p*-Si, выращенного методами Чохральского и бестигельной зонной плавки, показали, что лантаноиды (Dy, Er) и изовалентные примеси (Ge) оказывают существенное влияние на механические свойства монокристаллов. Максимальные значения микротвердости наблюдались в нелегированных образцах кремния. Введение германия в концентрации  $1,7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  как в Cz-Si, так и в "зонный" кремний снижало микротвердость на 2-5 %.

Наиболее отчетливо этот эффект был выражен для Fz-Si, в котором концентрация остаточных технологических примесей (например, кислород) была ниже. Легирование редкоземельными элементами (Dy, Er) приводило к еще более существенному (на 10-12 %) снижению микротвердости кремния. Таким образом, уменьшение микротвердости Si:PЗЭ по сравнению с нелегированным кремнием обусловлено геттерированием лантаноидами технологических примесей кислорода и углерода в расплаве.

Установлено, что в процессе термообработки при 800°C наиболее существенные изменения микротвердости наблюдались на начальных этапах отжига. После прогрева длительностью свыше 100 минут микротвердость практически не изменялась. Особенности в поведении микротвердости при термообработке обусловлены различиями в процессах дефектообразования в кремнии, выращенном разными методами. Следует отметить, что легирование лантаноидами приводило к уменьшению термической стабильности микротвердости Fz-Si. Для этого материала характерно максимальное возрастание микротвердости ( $\Delta H/H \sim 8-9\%$ ) из всех исследовавшихся образцов. Однако, даже после длительного прогрева абсолютные значения микротвердости в этих материалах оставались ниже, чем в контрольном Fz-Si. Обнаружено, что присутствие германия приводило к возрастанию термической стабильности микротвердости.

Исходя из анализа параметров n-Si до и после проведения диффузии золота показано, что присутствие изовалентной примеси углерода снижает, а германия увеличивает концентрацию примеси золота в электрически активном состоянии. Установлено, что наблюдаемый эффект наиболее выражен для технологической примеси углерода. Согласно экспериментальным результатам отсутствие компенсации удельного сопротивления в диффузионно-легированном золотом n-Si обусловлено захватом атомов Au углеродом, что приводит к потере им электрической активности. Германий же является центром аннигиляции точечных дефектов – вакансий и собственных междоузельных атомов, что способствует переходу золота в электрически активное положение замещения.

При увеличении концентрации германия в  $p$ -Si наблюдалось воорастание содержания бора в электрически активном состоянии. Фосфор ведет себя иначе: в верхней части кристалла его концентрация была меньше, а в нижней – больше, чем в контрольном материале. Обнаруженные особенности могут быть обусловлены следующими причинами: 1) изменением коэффициента сегрегации примеси (фосфор); 2) переходом примеси из электрически неактивного междоузельного в электрически активное узловое положение (бор). Переход части атомов из междоузлий в положение замещения наблюдался также для технологической примеси углерода.

Вытеснение атомов бора и углерода из междоузлий в положение замещения может быть обусловлено тем, что атомы германия создают в кристаллах кремния деформации сжатия. Так как атомные радиусы углерода ( $0,77 \text{ \AA}$ ) и бора ( $0,83 \text{ \AA}$ ) меньше ковалентного радиуса кремния ( $1,17 \text{ \AA}$ ), то при переходе атомов примесей из междоузельного в положение замещения имеет место релаксация упругих полей, создаваемых атомами германия.

Обнаружено, что в кремнии, выращенном в атмосфере азота (N-Si), концентрация кислорода ниже (в среднем на 20 %), чем в кремнии, полученном в атмосфере аргона (Ar-Si). Атмосфера выращивания, однако, не оказывала существенного влияния на концентрацию германия в монокристаллах Si.

При анализе температурных (60-400 K) зависимостей эффекта Холла глубоких центров с энергетическими уровнями  $E_c-0,19$ ,  $E_c-0,28$  и  $E_c-0,58$  эВ, обычно приписываемых одиночным атомам азота либо мелким комплексам с их участием в N-Si, не обнаружено. С другой стороны в образцах N-Si воорастала концентрация дефектов, выявляемых селективным травлением. Эти данные свидетельствуют о том, что практически весь азот находится в составе крупных дефектно-примесных скоплений, представляющих собой кислородно-азотные преципитаты, т.к. азот легко взаимодействует с кислородом.

Результаты исследования термических свойств кремния, легированного германием, показали, что эффективность генерации обоих видов термодоноров как обычных, так и высокотемпературных в



кремнии, выращенном в атмосфере азота, выше, чем в традиционном "аргонном" кремнии. Ускорение генерации термодоноров обусловлено увеличением радиуса захвата подвижных частиц центрами зарождения вследствие воздействия внутренних деформационных полей, создаваемых указанными выше дефектами.

Установлено, что легирование кремния германием приводило к подавлению процесса генерации термодоноров, вводимых при  $450^{\circ}\text{C}$ , причем с ростом содержания Ge снижались как максимально достижимые концентрации, так и начальные скорости введения термодоноров. Идентичное поведение указанной изовалентной примеси наблюдалось ранее и в кремнии, выращенном в атмосфере аргона. Т.е. атмосфера выращивания не оказывала существенного влияния на процессы подавления термодоноров германием. Как и для традиционного Ar-Si, имела место немонотонная зависимость максимально достижимой концентрации высокотемпературных термодоноров от содержания германия.

В четвертой главе приводятся исследования электрофизических и оптических свойств эпитаксиальных слоев фосфида галлия, легированных редкоземельными (Gd, Er) и изовалентными (Al, In) примесями.

Легирование слоев изовалентной примесью Al вызвало уширение полос фотолюминесценции во всем исследуемом диапазоне длин волн, что обусловлено упругими напряжениями, возникающими при этом в эпитаксиальных слоях. В спектрах фотолюминесценции эпитаксиальных слоев AlGaP на фоне полосы донорно-акцепторных пар C-S (ДАП) обнаружены линии поглощения, энергетическое положение которых соответствовало свободному ( $2,327$  эВ) и связанным на примесях серы ( $2,310$  эВ) и азота ( $2,318$  эВ) экситонам в GaP. Данные линии обусловлены поглощением на микровключениях GaP в пленках AlGaP. Локальный зондовый микроанализ показал, что Al распределен однородно, поэтому размер микровключений должен быть меньше диаметра электронного пучка ( $4$  мкм). Оценки говорят о том, что радиус этих микровключений превышает  $30$  Å. Показана возможность легирования эпитаксиальных слоев азотом из навески  $\text{P}_3\text{N}_5$

в процессе жидкофазной эпитаксии из раствора-расплава на основе индия.

Интенсивность свечения эпитаксиальных слоев GaP, полученных из раствор-расплава на основе индия, более чем на порядок выше, чем в образцах, полученных методом газофазной эпитаксии, что обусловлено более совершенной внутренней кристаллической структурой несмотря на высокую концентрацию ионовалентной примеси.

Введение редкоземельных примесей (Dy, Gd) в расплав фосфида галлия приводило к появлению в спектрах фотолюминесценции материала узкой X-полосы при 541 нм. Интенсивность полосы возрастала при увеличении концентрации примесей в расплаве. Установлено, что в особо чистых образцах, полученных из отожженного в вакууме расплава GaP (без введения РЗЭ), X-полоса также наблюдалась. Кроме того, легирование эпитаксиальных слоев лантаноидами приводило к резкому уменьшению концентрации свободных носителей заряда, вплоть до конверсии типа проводимости на дырочный. Следует отметить, что введение в раствор-расплавы редкоземельных элементов способствовало очистке слоев от фоновых технологических примесей (C,S), с чем связано общее возрастание интенсивности фотолюминесценции и уменьшение интенсивности полос, обусловленных данными примесями.

Таким образом, согласно экспериментальным данным установлено, что введение редкоземельных элементов в расплав GaP приводит к образованию дополнительных дефектно-примесных центров акцепторной природы, обусловленных структурными дефектами, в состав которых лантаноиды не входят.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Выводы по результатам проведенной работы:

1. Впервые установлено, что легирование кремния редкоземельными элементами приводит к снижению микротвердости монокристаллов, что обусловлено геттерированием технологических примесей (кисло-

род, углерод и т.д.) лантаноидами, причем наиболее эффективно указанный процесс протекает при использовании вѣрбия. При высокотемпературной обработке микротвердость Si:PЗЭ возрастает значительно сильнее, чем в нелегированных кристаллах, что обусловлено более интенсивным образованием структурных нарушений в процессе термообработки.

2. Обнаружено, что термическая стабильность микротвердости в Si:Ge выше, чем в нелегированных образцах, что связано с подавлением германием процессов термического дефектообразования в кремнии.

3. Установлено, что присутствие изовалентной примеси углерода снижает, а германия увеличивает концентрацию золота в электрически активном состоянии в кремнии. Эффективность взаимодействия золота с углеродом на три порядка выше эффективности указанного процесса для германия.

4. Обнаружено, что изовалентная примесь германия изменяет соотношение между условной и междоузельной компонентами примесей с меньшим, чем у кремния, атомным радиусом (бор, углерод). Наблюдаемый эффект обусловлен тем, что под воздействием полей упругих напряжений, создаваемых атомами германия, энергетически более выгодным является переход атомов указанных примесей из междоузлий в положение замещения.

5. Установлено, что термостабильность электрофизических параметров кремния, легированного германием в процессе выращивания в среде азота, ниже, чем кремния, полученного с использованием инертной атмосферы. Наблюдаемый эффект обусловлен введением в указанных монокристаллах дефектов междоузельного типа, являющихся центром зарождения ТД.

6. В эпитаксиальных слоях AlGaP, выращенных из растворов-расплавов на основе индия, обнаружены микровключения фосфида галлия с размерами, превышающими 30 Å, о чем свидетельствует наличие в спектрах фотolumинесценции полос самопоглощения, обусловленных свободным и связанным на примесях серы и азота оксидными. Об-

наруженный эффект позволил доказать возможность легирования пленок AlGaP примесью азота из навески  $P_3N_5$  и наличие автолегирования примесями серы и азота из подложки в процессе выращивания.

7. Показано, что введение в раствор-расплав редкоземельных элементов приводит не только к снижению содержания фоновых технологических примесей, но и образованию дополнительных дефектно-примесных центров акцепторной природы в эпитаксиальных слоях фосфида галлия, обуславливающих линию 541 нм в спектрах фотолюминесценции. Установлено, что в состав этого дефекта лантаноиды не входят.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Содержание работы отражено в следующих публикациях:

1. Алешин В.Д., Бринкевич Д.И., Вабищевич С.А., Соболев Н.А. Влияние лантаноидов на дефектно-примесный состав эпитаксиальных слоев GaP// Физика и техника полупроводников.1996. Т.30. N 5. С.906-909.
2. Бринкевич Д.И., Вабищевич С.А. Микротвердость кремния, легированного изовалентными и редкоземельными примесями// Неорганические материалы. 1994. Т.30. N5. С.599-602.
3. Бринкевич Д.И., Петров В.В., Вабищевич С.А., Крюков В.Л., Фурманов Г.П. Влияние изовалентных примесей на диффузию золота// Высокочистые вещества. 1994. N 5. С.26-29.
4. Бринкевич Д.И., Вабищевич С.А., Соболев Н.А. Фотолюминесценция эпитаксиальных слоев фосфида галлия, легированного редкоземельными элементами// Журнал прикладной спектроскопии. 1996. Т.63. N 2. С.341-344.
5. Brinkevich D.I., Vabishchevich S.A. Enhanced generation of thermal donors in silicon single crystals grown in a nitrogen atmosphere// Inorganic materials. 1996. V. 32. N 10. P. 1013-1015.

6. Brinkevich D.I., Petrov V.V., Sobolev N.A., Vabishchevich S.A. Structure and the doping of epitaxially grown AlGaP//Proc. Third Seminar "Nonlinear Phenomena in Complex System" Polatsk, February 14-16, 1994. P.272-277.

7. Brinkevich D.I., Vabishchevich S.A., Petrov V.V., Sobolev N.A. Epitaxial layers GaP doped by rare-earth elements// Proc. Fourth Seminar "Nonlinear Phenomena in Complex System" Minsk, February 6-9, 1995. P.388-390.

8. Brinkevich D.I., Prosolovich V.S., Vabishchevich S.A.; Petlitskiy A.V. Gettering of background impurities by oxygen precipitation// Proc. Fourth Seminar "Nonlinear Phenomena in Complex System" Minsk, February 6-9, 1995. P.391-395.

9. Вабищевич С.А., Бринкевич Д.И., Петров В.В. Микротвердость кремния, легированного редкоземельными и изовалентными примесями// Тез. докл. первой Всероссийской конференции по материаловедению и физико-химическим основам технологий получения легированных кристаллов кремния ("Кремний-96"). - Москва, 19-22 ноября, 1996. - С.45.

10. Петров В.В., Бринкевич Д.И., Вабищевич С.А. Si:Ge, выращенный в атмосфере азота// Тез. докл. первой Всероссийской конференции по материаловедению и физико-химическим основам технологий получения легированных кристаллов кремния ("Кремний-96"). - Москва, 19-22 ноября, 1996. - С.61.

11. Бринкевич Д.И., Вабищевич С.А., Петров В.В. Примеси в кремнии, легированном германием// Тез. докл. первой Всероссийской конференции по материаловедению и физико-химическим основам технологий получения легированных кристаллов кремния ("Кремний-96"). - Москва, 19-22 ноября, 1996. - С.40.

12. Бринкевич Д.И., Вабищевич С.А., Петров В.В. Механическая прочность кремния, легированного лантаноидами и германием// Деп.в ин-те "Белинформпрогноз" 6.02.96, Минск,-16 с. N деп. 19963.

## РЕЗЮМЕ

Вабищевич Сергей Ананьевич

ПРОЦЕССЫ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В КРЕМНИИ И  
ФОСФИДЕ ГАЛЛИЯ, ЛЕГИРОВАННЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ  
ЭЛЕМЕНТАМИ И ИЗОВАЛЕНТНЫМИ ПРИМЕСЯМИ

Ключевые слова: дефектообразование, примеси, термический отжиг, микротвердость, электропроводность, фотолюминесценция, эпитаксиальный слой.

Методами эффекта Холла и проводимости, микротвердости, ИК-спектроскопии и фотолюминесценции исследовались электрофизические и оптические свойства кремния и фосфида галлия, легированных редкоземельными элементами и изовалентными примесями.

В работе установлено, что лантаноиды уменьшают микротвердость Si, что связано с геттерированием технологических примесей (C,O) в расплаве. Стабильность микротвердости при высокотемпературном отжиге ( $T=800^{\circ}\text{C}$ ) выше для кремния, содержащего изовалентную примесь Ge, что связано с подавлением процессов термического дефектообразования при термообработке. Присутствие ИВП углерода в Si:Au приводило к уменьшению, а Ge к увеличению концентрации золота в электрически активном состоянии. Кроме того, при легировании Si германием наблюдалось увеличение содержания легирующей примеси бора в электрически активном состоянии. Аналогичный эффект наблюдался для технологической примеси углерода.

В эпитаксиальных слоях AlGaP обнаружены микровключения GaP с размерами  $>30 \text{ \AA}$ . Введение редкоземельных элементов в расплав GaP приводило к очистке эпитаксиальных слоев от фоновых технологических примесей (C,S) и образованию дополнительных дефектно-примесных центров акценторной природы, с которыми в спектрах фотолюминесценции коррелирует полоса при 541 нм.

## Р Э З Ю М Э

Вабішчэвіч Сяргей Ананьевіч

ПРАЦЭСЫ ДЭФЕКТАЎТВАРЭННЯ У КРЭМНІ І  
ФАСФІДЗЕ ГАЛІЯ, ЛЕГІРАВАННЫХ РЭДКАЗЯМЕЛЬНЫМІ  
ЭЛЕМЕНТАМІ І ІЗАВАЛЕНТНЫМІ ПРЫМЕСЯМІ

Ключавыя словы: дэфектаўтварэнне, прымесі, термічны отжыг, мікрацвердасць, электраправоднасць, фоталюмінесцэнцыя, эпітаксіальны слой.

Метадамі ефекта Хола і праводнасці, мікрацвердасці, інфрачырвонай спектраскапіі і фоталюмінесцэнцыі даследаваліся электрафізічныя і аптычныя ўласцівасці крэмнія і фасфіда галія, легіраваных рэдказямельнымі элементамі і ізавалентнымі прымесямі.

У рабоце ўстаноўлена, што лантанаіды памяншаюць мікрацвердасць крэмнія, што звязана з гетэрыраваннем тэхналагічных прымесей (C,O) у расплаве. Стабільнасць мікрацвердасці пры высокатемпературным адпале ( $T=800^{\circ}\text{C}$ ) вышэй для крэмнія, омяшчаючым ізавалентную прымесь Ge, што звязана з падаўленнем працэсаў термічнага дэфектаўтварэння пры термаапрацоўцы. Прысутнасць ізавалентнай прымесі углерода ў Si:Au прывадоіла да омяньшэння, а Ge да павелічэння канцэнтрацыі волатата у электрычна актыўным стане. Акрамя таго, пры легіраванні Si германіем назіралася павелічэнне канцэнтрацыі легіруючай прымесі бора у электрычна актыўным вуглавым становішчы. Аналагічны эффект назіраўся для прымесі углерода.

У эпітаксіальных сляях AlGaP внойдзены мікраўключэнні GaP з памерамі  $>30 \text{ \AA}$ . Увядзенне рэдказямельных элементаў у расплаў GaP прывадоіла да ачысткі эпітаксіальных слаеў ад фонавых тэхналагічных прымесей (C,S) і ўтварэння дадатковых дофектна-прымесных цэнтраў акцептарнай прыроды, з якімі ў спектрах фоталюмінесцэнцыі карэліруе паласа пры 541 нм.

## SUMMARY

Vabishchevich Sergei Ananievich

THE DEFECTS FORMATION PROCESSES IN SILICON  
AND GALLIUM PHOSPHIDE DOPED WITH THE  
RARE-EARTH ELEMENTS AND ISOVALENT IMPURITIES

Key words: formation defects, impurities, thermal treatment, microhardness, conductivity, photoluminescence, epitaxial layer.

Electro-physical and optical properties of the silicon and the gallium phosphide doped with the rare-earth elements and isovalent impurities were investigated using the methods of Hall-effect and electric conductivity, microhardness, IR-spectroscopy and photoluminescence.

It was established that the lanthanides doping lead to the decrease of the Si microhardness, that is connected with the gettering of the technological impurities (C,O) in the melt. The microhardness stability at the heat annealing ( $T=800^{\circ}\text{C}$ ) was larger for the silicon containing the isovalent Ge impurity. It is connected with the suppression of the defects formation processes at the heat treatment. Concentration of the gold in the electrically active state increased at the Ge presence and it decreased in the case of the carbon presence in Si: Au. Besides the increase of the boron impurity concentration in the electrically active lattice site was observed at the doping of the silicon with germanium. Similar effect was observed for the technological carbon impurity.

The GaP microparticles with the size  $>30 \text{ \AA}$  were detected in the AlGaP epitaxial layers. The introduction of the rare-earth elements in the GaP melt led to the cleaning of the epitaxial layers from the background technological impurities (C,S) and to the formation of the additional defect-impurity acceptor nature centres. The band at the 541 nm in the photoluminescence spectra correlate with these centres.



Вабищевич Сергей Ананьевич

**Процессы дефектообразования в кремнии и  
фосфиде галлия, легированных редкоземельными  
элементами и изовалентными примесями**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Подписано к печати 19.02.97. Формат 60x84 1/16  
Бумага N 1. Объем 1 п.л. Заказ N 168 Тираж 100 экз.  
Отпечатано на ротапринтере Полоцкого госуниверситета  
211440, г.Новополоцк, ул.Блохина, 29