

АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ФІЗИКИ

На правах рукопису

ШВАРЦ МАРІНА МИХАЙЛІВНА

ДЕФЕКТНО-ДОМІШКОВА ВЗАЄМОДІЯ В МОНОКРИСТАЛАХ
ТВЕРДИХ РОЗЧИНІВ ГЕРМАНІЙ-КРЕМНІЙ

(01.04.07 - фізика твердого тіла)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата фізико-математичних наук

КИЇВ - 1993

№ 27.37

Робота виконана в Інституті фізики АН України

Науковий керівник – кандидат фізико-математичних наук
Шаховцов В.І.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
професор Кив А.Е.
кандидат фізико-математичних наук,
доцент Солошенко В.І.

Провідна установа: Інститут напівпровідників АН України

Захист відбудеться " 18 " мая 1993 року о 15
годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 068.24.11 в
Одеському державному університеті, 270057, Одеса, Петра Вели-
кого, 2

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Одеського
державного університету.

Автореферат розіслано " 16 " агця 1993 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Затовський О.В.

ЛНБ України ім.В.Стефаника
00814257 (R)

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Загальна характеристика роботи

Актуальність теми. Успіхи сучасної напівпровідникової електроніки визначаються рівнем розуміння електронних процесів, які відбуваються в напівпровідниках, і способами їх управління. З іншого боку, розвиток твердотільної мікроелектроніки тісно пов'язаний з пошуком нових матеріалів, задовольняючих різноманітним вимогам. Si і Ge продовжують грати ведучу роль в мікроелектроніці. Розширення їх функціональних здібностей за рахунок використання твердих розчинів Ge-Si становить важливу практичну задачу. В даний час фізика твердих розчинів Ge-Si являється самостійним науковим напрямком, якому надається постійна увага. Внаслідок необхідної взаємної розчинності Ge і Si утворюють безперервний ряд твердих розчинів заміщення. Зміна складу твердого розчину дає можливість керувати фундаментальними характеристиками матеріалу, що може бути використано для створення приладів з оптимальною злужкові властивостями в різних областях техніки.

Тверді розчини Ge-Si є перспективним базовим матеріалом для створення термогенераторів, приймачів ІЧ-випромінювання, фотоопорів, датчиків фізичних величин, діодів та транзисторів. Проте перспективи практичного використання твердих розчинів обмежуються недостатньою вивченістю фізичних процесів, відбуваючихся в них в умовах зовнішніх впливів (магнітних полів, механічних напружень, радіації).

Тому метою даної роботи є проведення комплексних досліджень твердих розчинів Ge-Si з неосновною компонентою Si для виявлення впливу домішкового складу на електричні, гальваномагнітні та магнітні властивості і радіаційне дефектоутворення в цьому матеріалі, а також вивчення можливостей практичного використання Ge-Si як базового матеріалу для тензорезистора.

Наукова новизна

Встановлено, що при введенні Si в Ge ізоенергетичний еліпсоїд стає більше ізотропним.

Показано, що змінювання перерізу розсіювання носіїв в Ge-Si, яке виражається в збільшенні параметру анізотропії розсіювання, зумовлено неоднорідним розподілом Si в твердому розчині Ge-Si.

Показано, що температурна залежність холловської рухливості в $Ge_{1-x}Si_x$ з $10^{-4} \leq x \leq 10^{-1}$ в інтервалі температур 100-300 К опису-

ється в дифузійному наближенні.

Показано, що збільшення магнітної сприйнятливості при введенні Si в Ge пов'язано з виникненням додаткової парамагнітної складової, залежної від концентрації Si.

Встановлено, що для опроміненних електронами і гама-квантами твердих розчинів Ge-Si характерним являється утворення трьох типів радіаційних акцепторів. Показано, що електронні рівні акцепторів залежать від концентрації Si в розчині.

Показано, що опромінення компенсує вплив початкової неоднорідності твердого розчину Ge-Si.

Практичне значення роботи

Запропонований в роботі метод висотемпературного опромінення кристалів Ge-Si може підвищувати радіаційну стійкість Ge-Si. Показана можливість використання Ge-Si як базового матеріалу для створення ізотропного тензорезистора.

Захищені положення

1. Ізоенергетичний еліпсоїд в твердому розчині Ge-Si стає більш ізотропним в порівнянні з Ge.
2. Компенсація провідності в опроміненних при кімнатній температурі Ge-Si здійснюється радіаційними акцепторами.
3. Неоднорідний розподіл Si в твердому розчині Ge-Si грає основну роль в формуванні електрофізичних і магнітних властивостей в $Ge_{1-x}Si_x$.

Апробація роботи. Основні результати роботи були представлені на Всесоюзній конференції "Радіаційна фізика напівпровідників і родственных матеріалів" (Ташкент, 1984 р.), VI координаційній нараді по дослідженню і застосуванню сплавів кремній-германій (Тбілісі, 1986 р.), VII координаційній нараді по дослідженню і застосуванню твердих розчинів германій-кремній (Баку, 1988 р.), Всесоюзному науково-технічному семінарі "Радіаційна технологія в промисловості інтегральних схем" (Воронеж, 1988 р.), VI Всесоюзній конференції по фізико-хімічним основам легування напівпровідникових матеріалів (Москва, 1988 р.), VI Республіканській конференції "Фізические проблемы МДП-интегральной электроники" (Севастополь, 1990 р.), III Всесоюзній конференції по фізиці і технології тонких напівпровідникових плівок (Івано-Франківськ, 1990 р.), XII Всесоюзній конференції по фізиці напівпровідників (Київ, 1990 р.), Міжнародній конференції по радіаційному матеріалознавству (Алуш-

та, 1990 р.), V міжгалузевому семінарі "Проблеми створення напівпровідникових приборів. ІС і РЗА на їх основі, стійких к ВВФ" (Петрозаводськ, 1991 р.), VIII координаційний наради по дослідженню та застосуванню твердих розчинів кремній-германій (Ташкент, 1991 р.) I Національний конференції "Дефекти в напівпровідниках" (Санкт-Петербург, 1992 р.).

Структура і об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків і списку цитованої літератури, який має 164 найменувань. Повний об'єм складає **139** сторінок, в тому числі 37 малюнків і 8 таблиць.

Зміст роботи

У вступі описано коло проблем, досліджуваних в дисертації, обґрунтована актуальність роботи, сформульована її мета, викладено зміст дисертації, її наукова новизна, практична значенність та основні захищувані положення.

Перший розділ являє собою огляд літературних даних, присвячених проблемі отримання і дослідження властивостей твердих розчинів Ge-Si і впливу іонізуючого випромінювання на електрофізичні властивості Ge та Ge-Si. На основі аналізу літературних даних сформульована задача, що вирішується в роботі.

В експериментальній частині роботи представлені результати досліджень монокристалів твердих розчинів $Ge_{1-x}Si_x$ при $10^{-4} \leq x \leq 10^{-1}$, вирощуваних методом Чохральського з підняткою. Концентрація легувальної домішки Se складала від $4 \cdot 10^{14}$ до $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Густина дислокацій в зразках не перевищувала 10^5 см^{-2} . Концентрація кисню контролювалась по ІЧ-поглиненню і не перевищувала $1,1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Другий розділ присвячений дослідженню впливу флуктуації складу твердого розчину на гальваномагнітні і магнітні властивості Ge-Si. Показано, що наявність впадкового поля, обумовленого неоднорідним розподілом Si по зразку, приводить до зменшення рухливості носіїв струму та збільшення магнітоопору в $Ge_{1-x}Si_x$ з ростом x. Збільшення змісту кремнія в твердому розчині приводить до зростання додаткової парамагнітної складової магнітної сприйнятливості.

В узгодженні з літературними даними спостерігали зменшення холловської рухливості із збільшенням змісту неосновної компоненти в твердому розчині. Досліджування магнітоопору в $Ge_{1-x}Si_x$ показали, що з ростом x магнітоопір зростає.

Відомо, що Si має тенденцію утворювати кластери в решітці Ge. У теперешній час механізм розсіювання, зв'язаний з неупорядкованістю твердого розчину, залишається нев'яясненим. До початку виконання роботи відомі теорії не могли пояснити експериментально спостережану температурну залежність рухливості в Ge-Si в широкому інтервалі температур.

Результати експериментальних досліджень напівпровідників з неоднорідностями інтерпретують у рамках борновського наближення, наближення "ефективного середовища" або в дифузійному наближенні. Критерієм використання того чи іншого наближення є співвідношення між довжиною вільного пробігу носіїв струму L і характерним розміром електричного поля R , зв'язаного з неоднорідністю. При виконанні співвідношення $R > L$ рух носіїв у полі дефекта має не консервативний характер, як для випадку $L > R$ (цей випадок розглядає борновське наближення), а дифузійний, і поняття ефективного періоду розсіювання на дефекті використовувати не можна. Поле дефекта запроваджують у рівняння електропровідності та дифузії як макроскопічне нарівні з зовнішнім прикладеним полем.

В наближенні "ефективного середовища" припускається, що провідність матриці не залежить від відстані до неоднорідності і звичайно розглядаються неоднорідності з різкими границями. Така ситуація не є характерною для напівпровідників, в яких електрично активні неоднорідності оточені областю повільної зміни потенціалу та, отож, провідність є гладкою функцією координат. Обчислити далекодіючий вплив потенціалу області неоднорідності (ОН) дозволяє дифузійне наближення.

Вперше Херрінг показав, що наявність в напівпровідниках неоднорідностей, характерний розмір яких більше довжини вільного пробігу носіїв струму, спричиняє до зменшення рухливості, а також збільшення магнітоопору і відсутності його насичення у сильних магнітних полях.

Аналіз рухливості проведено виходячи з припущення, що кластери Si в матриці Ge приводять до виникнення внутрішніх електричних полів, просторова протяжність яких більше чи одного порядку з довжиною дебаєвського екранування L_D , яка описує область поширення поля дефекта. Згідно з оцінками, L_D перевищує довжину вільного пробігу, обумовлену розсіюванням на фонах. Використання такого підходу дозволяє обчислити вплив ОН і в дифузійному наближенні описати температурну залежність холловської рухливості в Ge-Si в

області температур 100-300 К.

В дифузійному наближенні, вважаючи, що частка об'єма, зайнята кластерами Si з утворюваним ними об'ємним зарядом, менше 1, справедливий такий вираз для відносного зміння рухливості, обумовленої наявністю неоднорідностей

$$\Delta\mu = \frac{\mu_n^0 - \mu_n}{\mu_n^0} \quad (1)$$

де μ_n - ефективна рухливість в зразку, μ_n^0 - холловська рухливість у відповідному однорідному зразку.

У цьому розгляді припускалось, що ОН уявляють собою сферичні включення Si з власною провідністю.

Вираз для холловської рухливості носіїв струму для напівпровідника з трьохмірними ізотропними неоднорідностями має вигляд:

$$\mu_n = \mu_n^0 \frac{3(2-\zeta)}{5-2\zeta}, \quad \zeta = \langle \exp(-2e\phi/kT) \rangle / \langle \exp(-e\phi/kT) \rangle^2 \quad (2)$$

де ϕ - потенціал, обумовлений усіма областями ОН, $\langle \dots \rangle$ визначає усереднення по всіх можливих розміщеннях ОН.

Припускаємо структуру кластера являє по суті сферичний гетероперегород. В цьому випадку потенціал, до виникнення якого приводить наявність ОН, що дорівнює різниці робіт виходу із кластеру і матричного кристалу

$$A = (\chi_{Si} + F_{Si}) - (\chi_{Ge} + F_{Ge}) \quad (3)$$

де χ_{Si} (χ_{Ge}) - електронні спорідненості кластеру (матриці), F_{Si} (F_{Ge}) - положення рівня Фермі у кластері (матриці).

$$F_{Si} = 0.5 \cdot E_g(Si) + 0.75kT \cdot \ln(m_v/m_p); \quad F_{Ge} = kT \cdot \ln(N_d/N_c) \quad (4)$$

де $E_g(Si)$ - ширина забороненої зони в Si, m_v (m_p) - ефективні маси електронів (дірок) в Si, N_d - концентрація легувальної дошки в Ge, N_c - ефективна густина станів в зоні провідності.

Для Ge-Si n-типу провідності

$$A = 0.6 - kT \cdot [0.46 + \ln(N_d/N_c)] \quad (5)$$

Кішчева Формула для визначення $\Delta\mu$ має вигляд:

$$L_n[1+3\Delta\mu/(1+2\Delta\mu)] = (N_o/N_{Si}) * y^3 * [1.5+3\phi_o/y - 1.5*(1+3\phi_o/y)^{3/2}], \quad (6)$$

де $y = L_D/r_1$; $\phi_o = A/kT$. N_{Si} - концентрація атомів в кристалі Si, N_o - концентрація атомів Si в складі OH, r_1 - геометричний розмір OH.

Із (6) випливає, що залежність $\Delta\mu(T)$ визначається зміненням з температурою величин L_D і ϕ_o .

При малих концентраціях Si експериментальні та теоретичні значення рухливості збігаються з точністю до кількох процентів. Спостережувані розбіжності між обчисленим і експериментальним значеннями $\Delta\mu$ при великих значеннях N_{Si} в області температур 100-120 K, можливо, зв'язані з модельними уявленнями про OH як включення Si з власною провідністю. Знайдені ефективні значення геометричних розмірів OH в розглядаємія області концентрацій Si, $10^{-4} \leq x \leq 4 \cdot 10^{-2}$, знаходяться у межах 50-700 Å, причому великим x відповідають великі значення r_1 . Ефект збільшення магнітопопу $Ge_{1-x}Si_x$ з ростом x в дифузійному наближенні пояснюється зростаючою роллю електричних неоднорідностей з ростом концентрації Si.

З метою виявлення впливу природи дефектів на магнітну сприйнятливність (МС) $Ge_{1-x}Si_x$ проведені дослідження при різних x і концентраціях радіаційних дефектів. Опромінення здійснювалось електронами з енергією 2.5 MeV і гама-квантами ^{60}Co . Концентрація носіїв заряду і дефектів визначалась по температурним залежностям коефіцієнту Холла.

В досліджуваному інтервалі температур 77-300 K залежності МС від температури і величини магнітного поля не спостерігали.

Ранше МС в твердих розчинах досліджували на зразках з високою концентрацією носіїв струму. Вивчення МС з концентрацією до $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ дозволяє нехтувати вкладом в МС вільних носіїв струму і домішкових атомів. Тоді вираз для МС матриці речовини x можна подати в вигляді

$$x = x_A + x_{\text{деф.}} \quad (7)$$

де x_A - МС решітки, $x_{\text{деф.}}$ - МС дефектів решітки. В випадку сферичної симетрії електронних хмар атомів магнітний момент атома дорівнює нулю і решітка буде діаманітною. Проте в напівпровідниках

з ковалентними зв'язками може не спостергатись сферична симетрія в розподілі електронної густини. У випадку кристалічної решітки типу алмаза валентні електрони утворюють по 4 гібридизовані Sp^3 ковалентні зв'язки, для яких уявлення про сферичну симетрію не застосовні. Асиметрія в розподіленні електронної густини призводить до виникнення парамагнетизму. Таким чином, МС решітки являє собою суму діамагнітної складової електронної підсистеми, яка має сферичну симетрію відносно осі, співпадаючої з напрямком магнітного поля χ_d , і парамагнітної складової МС χ_p , характеризуєючої несферичність електронного облака

$$\chi_A = \chi_d + \chi_p \quad (8)$$

Використовуючи відомі методи визначення χ_d і χ_p та одержані експериментальні значення МС, можна визначити складову МС, обумовлену вихідними дефектами решітки:

$$\chi_{\text{деф.}} = \chi_A + \chi_p - \chi_{\text{експ.}} \quad (9)$$

Виявлено, що експериментально спостерігаєме збільшення МС в твердому розчині в порівнянні з Ge відбувається за рахунок виникнення додаткової парамагнітної складової $\chi_{\text{деф.}}$, обумовленої N_{Ge} . Додатковий парамагнетизм в Ge-Si може бути пов'язаний з значним зменшенням розподілу електронної густини, виникаючим із-за сильного спотворення решітки внаслідок різниці іонних радіусів Si і Ge, а також часткової кластеризації неосновної компоненти.

Опромінення компенсує вплив вихідних дефектів решітки, про що свідчать зменшення МС в опромінених твердих розчинах.

В третьому розділі викладені результати експериментальних досліджень властивостей опромінених твердих розчинів. Вивчені гальваномагнітні властивості і вплив на них изотермічного випадку. Приведені результати досліджень радіаційних акценторів методом смислої спектроскопії. Розглянуто процес компенсації провідності при опроміненні Ge-Si. Проведено аналіз одержаних експериментальних результатів і літературних даних.

Радіаційне дефектоутворення в Ge-Si вивчено недовільно. Труднощі, зв'язані з розшифровкою спектрів ЕПР $Ge_{1-x}Si_x$, як і Ge, обумовлюють неоднозначність моделей дефектів в цих матеріалах.

Тому існує багато різних інтерпретацій експериментальних даних, одержаних при досліджуванні електричних властивостей Ge-Si. Дискусійними залишаються питання про причинну n-p конверсію провідності в Ge-Si, ролі Si в процесах радіаційного дефектоутворення. Зокрема, існують дані, згідно з якими, при співвідношеннях концентрацій Si і донорів V групи більших, ніж 10^5 , домінуючі в опроміненому Ge дефекти з рівнем $E_C - 0,2\text{eV}$ в твердих розчинах не спостерігаються.

Дослідження ефекту Холла показали, що для опромінених електронами з енергією 2,5 MeV и γ -квантами ^{60}Co твердих розчинів $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ ($10^{-4} \leq x \leq 10^{-1}$) характерно утворення трьох типів акцепторів E^I , E^{II} і E^{III} , яким відповідають три стадії ізохронного випалу. Початку випалу дефектів E^I , E^{II} та E^{III} відповідають температури 370 K, 410 K і 510 K. Акцептори E^I і E^{II} розміщені поблизу домінуючого акцепторного рівня в Ge $E_C - 0,2\text{eV}$ і спостерігаються по температурних залежностях концентрації носіїв струму в $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ при всіх співвідношеннях $N_{\text{Si}}/N_{\text{Ga}}$, які змінювались в зразках від $4,5 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^5$. Енергії активації провідності цих рівнів залежать від x в $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$. З ростом x від 10^{-4} до 10^{-1} енергія активації рівня E^I змінюється від $E_C - 0,17\text{eV}$ до $E_C - 0,12\text{eV}$, а E^{II} - від $E_C - 0,23\text{eV}$ до $E_C - 0,28\text{eV}$. Концентрація дефектів E^I і E^{II} лінійно зростає з дозою опромінення. Швидкість введення цих дефектів зменшується з ростом концентрації Si в твердому розчині. Наприклад, при збільшенні x від 10^{-4} до $4 \cdot 10^{-2}$ $dN^I/d\Phi$ зменшується від $0,26$ до $0,04 \text{ см}^{-1}$, а $dN^{II}/d\Phi$ - від $0,7$ до $0,4 \text{ см}^{-1}$. Зниження ефективності введення радіаційних акцепторів E^I і E^{II} в $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ з ростом x свідчить про вплив Si на процеси дефектоутворення. Зокрема, скупчення Si можуть служити стоками для власних дефектів.

Енергія активації випалу для дефектів E^I і E^{II} не залежить від N_{Si} і складає $0,7 - 0,8 \text{ eV}$ для E^I і $1,2 - 1,3 \text{ eV}$ для E^{II} .

В роботі вперше проведено дослідження опромінених твердих розчинів Ge-Si методом емісійної спектроскопії глибоких рівнів з метою вивчення процесів дефектоутворення на початкових стадіях опромінення і впливу випалу на термічну стабільність радіаційних дефектів.

Враховуючи, що параметри дефектів в Ge-Si методом DLTS раніше не визначали, обробка експериментальних спектрів проведена трьома способами: по температурній залежності розташування піків

при різних "вікнах емісії" (метод Ленга), по багатьох точках DLTS - криві, зняті при одному температурному скануванні (метод Васильєва та інш.) і методом моделювання, спробуваним в цій роботі. Перші два методи достатньо добре відомі. Похибки при визначенні параметрів цими методами в значній мірі пов'язані з обмеженими можливостями обробки перекриваючихся піків, необхідністю багатократного температурного сканування для методу Ленга та труднощами точного визначення амплітудного значення і розташування по температурі максимуму піку в методі Васильєва. Метод моделювання позбавлений перелчених недоліків і, крім того, дозволяє розширити можливості методу DLTS.

Для обчислення величини релаксуючої частини ємності рівня, яка пов'язана з концентрацією відповідного глибокого центру, та енергії іонізації, методом послідовних наближень проводили покрокове порівняння масивів експериментальних і теоретичних даних. В загальному вигляді

$$\frac{1}{N} \sum |P(j) - Y(j)|^2 = S_k \quad (10)$$

де $Y(j), P(j)$ - значення DLTS-сигналу при j -ій температурі експериментальное і теоретичне відповідно, N - кількість експериментальних точок (температур), S_k - похибка спадання в кожному кроку, k - номер поточного кроку.

Послідовно варіюючи визначасними і наближно заданими параметрами мінімуємо S_k . Обчислювання циклічно повторюються зі зменшенням кроку до визначеної границі, обмеженої точністю вимірюваних величин та іншими похибками.

При дослідженні спектрів DLTS виявлено два типи центрів. Енергія іонізації, час та температура відпаду цих центрів добре погоджуються з енергетичним станом і режимом відпаду акценторів E^I і E^{II} , знайденими із холловських вимірів.

Опромінювання приводить до зменшення рухливості носіїв струму і магнітоопору в Ge-Si. Відсутність однозначної кореляції в поведінці рухливості і магнітоопору до і після опромінювання свідчить про різний вклад радіаційних дефектів і вихідних неоднорідностей в змінення магнітоопору. Таким чином, розглядаючи на радіаційних дефектах компенсує вплив вихідних неоднорідностей на магнітоопір.

Дослідження впливу одноосного тиску на енергетичне становище

рівні акцепторів E^I і E^{II} в Ge та Ge-Si показало, що в напрямку [110] рівні зміщуються в протилежні сторони: рівень E^I стає більш мелким, рівень E^{II} здвигається углиб забороненої зони. Застосування тиску в [111] викликає рух рівней E^I і E^{II} вверх. Швидкість зміщення рівней E^I значно вище, ніж E^{II} . Така поведінка радіаційних дефектів обумовлена особливостями їх структури і зміненням зонної структури при введенні Si в Ge.

Сукупність експериментальних даних про властивості акцепторів E^I і E^{II} в Ge та Ge-Si дозволяє зробити висновок, що дефекти E^I і E^{II} в Ge і Ge-Si мають одну природу. Проведення аналіз літературних даних і порівняння їх з одержаними результатами дозволяє припустити, що рівень E^I - комплекс VD, рівень E^{II} має вакансійну природу чи комплекс VO.

Для пояснення причини конверсії провідності в твердих розчинах Ge-Si проведено порівняння змінення концентрації донорів та акцепторів при опроміненні із температурних залежностей концентрації носіїв струму з використанням рівняння електронейтральності для частково компенсованого напівпровідника n-типу.

Для всіх досліджуваних зразків $\Delta N_D < \Delta N_A$. Згідно моделі компенсації провідності за рахунок виходу донорів в електрично неактивні стани термічна стійкість таких дефектів, як і акцепторних станів E^{II} , обмежується температурним інтервалом 370-430 K. По моделі рівням E^{II} відповідає міжвузловий стан атомів D_{C} . Відпал таких дефектів повинен приводити до відновлення N_D на величину, вдвоє перевищуючу змінення концентрації акцепторних станів E^{II} . Проте при відпалі рівней E^I і E^{II} змінення N_D менше, ніж збільшення N_A . При цьому ΔN_A дорівнює сумі концентрації відпалених акцепторних станів E^I і E^{II} , а N_D відновлюється лише частково. Про домінуючу роль радіаційних акцепторів свідчить зменшення рухливості електронів в опроміненому Ge-Si в області довшкового розсіювання, в якій змінення рухливості дає інформацію про концентрацію центрів $N_D + N_A$.

У четвертому розділі приведені результати досліджень куткових залежностей пізоопору (ПО) в одноосно і пружно деформованому Ge-Si, представлені дані по впливу високотемпературного опромінення на електричні властивості Ge-Si.

Одноосна пружна деформація (ОПД) викликає змінення кінетичних коефіцієнтів напівпровідників типу n-Ge і n-Si. Наприклад, при відсутності ОПД рухливість є скаляр в силу кубичної симетрії

цих напівпровідників та високої симетрії в розташуванні ізоенергетичних еліпсоїдів відносно головних осей кристалу. В умовах ОПД рухливість стає тензором. Цей ефект обумовлений кутовою залежністю ПО. Вивчення кутових залежностей ПО дає можливість визначити форму і розташування ізоенергетичних еліпсоїдів відносно кристалографічних осей.

Досліджено кутові залежності подовжнього ПО в Ge і $Ge_{1-x}Si_x$ з $x=0,05$ n-типу провідності при температурі 78 К. Максимально використані механічні напруги $X = 11 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$. Зразки вирізали в площині (110) під означеним кутом α до напрямку [110]. Виявлено наступні особливості.

1. Виникнення ПО при $X \parallel [100]$ свідчить про відсутність міжзонного розсіювання в Ge-Si при $X > 10^3 \text{ кг/см}^2$.

2. Відносне збільшення ПО в Ge-Si при $X \parallel [110]$ в порівнянні з Ge складає 33%. Такий ефект може бути зв'язаний з збільшенням ролі міжмінімумного розсіювання та ростом постійних деформаційного потенціалу в Ge-Si.

3. Біжид на насичення ПО в Ge-Si для $X \parallel [111]$ і $X \parallel [110]$ зміщується в сторону менших тисків. Для $X \parallel [111]$ насичення досягається при $X \approx 7,5 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$ в Ge та $X \approx 6,5 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$ в Ge-Si, для $X \parallel [110]$ - $X \approx 6 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$ та $X \approx 5 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$ для Ge та Ge-Si відповідно.

4. В Ge-Si форма ізоенергетичного еліпсоїда змінюється. Максимальний ПО, спостережаний з кутових залежностей ПО, в Ge-Si зміщується в сторону більших кутів α . Якщо в Ge максимум ПО досягається при $\alpha = 35^\circ$, то для Ge-Si аналогічний кут $\alpha = 70^\circ$. Еліпсоїд стає менш витягнутим і більш ізотропним в Ge-Si. Порівняння кутових залежностей ПО для Ge та Ge-Si показало, що при зміні кута α від 0° до 90° відношення максимального до мінімального значень ПО в Ge дорівнює 8, а в Ge-Si - 2,6.

5. Анізотропію рухливості електронів, які належать до однієї долини, характеризує параметр анізотропії

$$K = K_m / K_T, \quad (11)$$

де K_m - параметр анізотропії ефективної маси, K_T - параметр анізотропії розсіювання.

Згідно даним досліджень циклотронного резонансу в Ge-Si з збільшенням концентрації Si поперечна ефективна маса збільшується

ся, а половинка зменшувється. Зменшення K_m означає, що контур ізоенергетичної поверхні еліпсоїда стає більш сферичним.

Параметр анізотропії для $X \parallel [111]$ визначається за формулою

$$K = 1,5\rho_x/\rho_o - 0,5 \quad (12)$$

де ρ_o - питомий опір недеформованого зразку, ρ_x - питомий опір в умовах насичення від X .

Розрахунок показав, що при $N_{sb} = 1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ в Ge $K = 11,5$, а в Ge-Si $K = 3,2$. Значне зменшення K в Ge-Si в порівнянні з Ge не може бути пов'язано тільки зі зменшенням K_m . Використовуючи літературні дані для K_m , отримано в Ge $K_x = 1,7$, в Ge-Si $K_x = 4,7$. Таким чином, неоднорідний розподіл Si по зразку оказує суттєвий вплив на процеси розсіювання. Зменшення загального параметру анізотропії свідчать про зниження анізотропії гальваномагнітних ефектів при введенні Si в Ge.

Можливість успішного використання ізотропного тензорезистора на основі Ge-Si, стабільного до впливу радіації, стимулює розробку способів підвищення радіаційної стійкості електричних характеристик матеріалу.

Суть запропонованого способу полягає у тому, що одночасно з опроміненням електронами чи γ -квантами $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ нагрівають до температур 600-650 K. Виконання вказаного режиму приводить до відпаду основних радіаційних дефектів акцепторного типу E^{I} , E^{II} та E^{III} . В результаті високотемпературного опромінення конверсія провідності не спостерігається, що різко відрізняється від опромінення при кімнатній температурі. Змінення вихідних характеристик $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ (питомого опору, рухливості і концентрації носіїв струму) при температурі опромінення 600-650 K не перевищує 5%, що відповідає технічним вимогам, які ставляться до стабільності електричних параметрів тензорезисторів.

Основні результати роботи.

1. Введення Si в Ge проводить до зниження анизотропії електричних та гальваномагнітних властивостей. Ізоенергетичний еліпсоїд стає більше ізотропним.

2. Встановлено, що основну роль в формуванні електрофізичних та магнітних властивостей $Ge_{1-x}Si_x$ грає неоднорідний розподіл Si в твердому розчині, який приводить до зменшення рухливості носіїв струму, збільшення магнітобару, виникненню додаткової парамагнітної складової магнітної сприйнятливості, збільшенню параметру анизотропії розсіявання.

3. Показано, що температурна залежність холловської рухливості в температурному інтервалі 100-300 К описується в дифузійному наближенні. Геометричний розмір неоднорідності збільшується з ростом концентрації Si в Ge-Si.

4. Встановлено, що для опроміненних твердих розчинів Ge-Si характерно утворення трьох типів радіаційних акцепторів. Показано, що енергетичне становище радіаційних акцепторів залежить від складу $Ge_{1-x}Si_x$. Обговорюються можливі моделі радіаційних акцепторів.

5. Встановлено, що процес компенсації провідності здійснюється радіаційними акцепторами.

6. Показано, що опромінення компенсує вплив вихідних неоднорідностей твердого розчину Ge-Si.

7. Показана можливість використання Ge-Si як ізотропного тензорезистора, стабільно працюючого в умовах впливу іонізуючого випромінювання та високих температур.

Основний зміст дисертації опубліковано в роботах:

1. Шаховцова С. Н., Шварц М. М., Белокурова И. И., Хавжу Д. М. Особливості компенсації провідності облучених твердих розчинів Ge-Si // УФЖ - 1985. - 30, в. 4. - С. 582-585.
2. Шаховцов В. И., Шаховцова С. И., Шварц М. М., Шпнар Л. И., Яковец Н. И. Подвижность носителей тока в твердых растворах $Ge_{1-x}Si_x$ // ФТП - 1989. - 23, в. 1. - С. 48-51.
3. Шендеровский В. А., Белокурова И. И., Романовский Б. Р., Пчель В. М.,

- Шаховцова С. И., Шварц М. М. Магнитная восприимчивость твердых растворов $Ge_{1-x}Si_x$. // Известия АН СССР, сер. "Неорганические материалы" - 1989. - 25, в. 11. - С. 1771-1774.
4. Белокурова И. Н., Третьяк О. В., Шаховцова С. И., Шварц М. М., Шматов А. А. Емкостная спектроскопия глубоких уровней облученных твердых растворов германия-кремния. // ФТП - 1989. - 23, в. 10. - С. 1869-1873.
 5. Шаховцова С. И., Шварц М. М., Белокурова И. Н. Выбор параметров материала для создания тензорезистора на основе сплава германия-кремния. // Электронная техника-1992. - в. 2(149)-3(150). - С. 57-61.
 6. Шаховцова С. И., Шварц М. М., Белокурова И. Н., Хавжу Д. М. Некоторые свойства облученных твердых растворов Ge-Si. // Препринт №5. ИФ АН УССР. К. - 1984. - 47с.
 7. Деябук В. Г., Курек И. Г., Мельничук С. В., Шаховцова С. И., Шендеровский В. А., Цмоць В. М., Белокурова И. Н., Романовский Б. Р., Шварц М. М. Закон дисперсии и магнитная восприимчивость твердых растворов $Ge_{1-x}Si_x$. // Препринт №3. ИФ АН УССР. К. - 1988. - 17с.
 8. Шаховцов В. И., Шаховцова С. И., Шварц М. М., Белокурова И. Н. Способ обработки тензорезисторов на основе твердых растворов германия-кремния. // Авторское свидетельство №4115313. Зарегистрировано в Госреестре изобретения СССР 15.09.1988.
 9. Шаховцова С. И., Шварц М. М., Белокурова И. Н. Дефектообразование в сплавах германия-кремния при различных режимах облучения. // Научно-технический сборник "Радиационные процессы в микроэлектронике". ЦНТИ "Поиск". - М. - 1993.
 10. Шаховцова С. И., Шварц М. М., Белокурова И. Н., Хавжу Д. М. Влияние одноосной деформации на положение уровней радиационных акцепторов в твердых растворах Ge-Si. // Тезисы докладов VI координационного совещания по исследованию и применению сплавов кремния-германия. - Тбилиси - 1986. - С. 101.
 11. Третьяк О. В., Шаховцова С. И., Шварц М. М., Шматов А. А. Процессы дефектообразования в барьерах Шоттки на твердых растворах $Ge_{1-x}Si_x$. // Тезисы докладов XII Всесоюзной конференции по физике полупроводников. - Киев - 1990. - ч. 2 - С. 224.
 12. Шаховцова С. И., Шварц М. М., Белокурова И. Н. Материал для создания радиационно-стойкого тензорезистора. // Тезисы докладов Международной конференции по радиационному материаловедению. - Алушта - 1990. - ч. 3 - С. 48.
 13. Белокурова И. Н., Шаховцова С. И., Шварц М. М. Радиационные и тер-

мозакалочные дефекты в твердых растворах германия-кремния.
// Тезисы докладов VIII координационного совещания по исследованию и применению твердых растворов кремния-германия. - Ташкент- 1991. - С. 56.

14. Шаховцова С. И., Шварц М. М. Дефекты в твердых растворах германия-кремния. // Тезисы докладов I Национальной конференции по физике полупроводников. - Санкт-Петербург - 1992. - С. 138.
15. Shahovtsova S. I., Shvarts M. M. The defects in Ge-Si alloys. // Сборник трудов I Национальной конференции по физике полупроводников. - Санкт-Петербург - 1993.

ШВАРЦ МАГІНА МИХАЙЛІВНА

ДЕФЕКТНО-ДОМІШКОВА ВЗАЄМОДІЯ В МОНОКРИСТАЛАХ

ТВЕРДИХ РОЗЧИНІВ ГЕРМАНІЙ-КРЕМНІЙ

Підписано до друку 14.04.93 р. Формат паперу 60x84/16. Нанір
офсетний 70 гр/м². Офсетний друк. Ум.-друк.арк.І,3. Вид арк.І,0.
Тираж 100. Зам.47. Безкоштовно.

Інститут фізики АН України, ВІПІ.

252650 Київ-22, проспект Науки, 46.

В. С. Стефанів
ІНСТИТУТ ФІЗИКИ
АН УКРАЇНИ

46.5244

АВ 27.319

БЕЗКОШТОВНО