

ВОЛИНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ім. ЛЕСІ УКРАЇНКИ

Хвищун Микола Вячеславович

УДК 537.311.322.(043.3)

**ОСОБЛИВОСТІ П'ЄЗОПОРУ В НЕОПРОМІНЕНИХ
І γ -ОПРОМІНЕНИХ МОНОКРИСТАЛАХ ГЕРМАНІЮ
ТА КРЕМНІЮ**

01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Луцьк 2002

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Луцькому державному технічному університеті,

Міністерство освіти та науки України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Федосов Анатолій Васильович,
Луцький державний технічний університет,
завідувач кафедри фізики.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Беляєв Олександр Євгенович, провідний науковий співробітник
Інституту фізики напівпровідників НАН України (м. Київ);

кандидат фізико-математичних наук,
Хіврич Володимир Ількович, старший науковий співробітник відділу
радіаційної фізики Інституту ядерних досліджень НАН України (м. Київ).

Провідна установа: Чернівецький національний університет ім. Ю.Федьковича,
м. Чернівці.

Захист відбудеться “23” жовтня 2002р. о 14 годині на засіданні
спеціалізованої вченої ради К.32.051.01 при Волинському державному
університеті ім. Лесі Українки за адресою: м. Луцьк, вул. Потапова, 9.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Волинського державного університету ім. Лесі Українки за адресою: м. Луцьк, вул. Винниченка, 30.

Автореферат розісланий “ 21 ” вересня 2002р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради _____ Божко В.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Уже більше половини століття кремній та германій набули широкого застосування у напівпровідниковій електроніці. Прилади, виготовлені на основі цих матеріалів, використовуються як у наукових дослідженнях, так і в промисловій індустрії. До них відносяться сонячні батареї, силові та високочастотні діоди, тензодатчики, фотодіоди і фотоелементи, транзистори та мікросхеми різноманітного призначення. Підвищеною зацікавленістю дослідників є досконале вивчення електрофізичних властивостей кремнію в комплексі з більш вивченим модельним напівпровідником – германієм. Їх всебічне використання у таких експериментальних умовах, як великі навантаження, швидкозмінні температурні режими, значні електричні, магнітні та радіаційні поля, вимагає всестороннього вивчення впливу вищезгаданих факторів на властивості як кремнію, так і германію. Дуже високі вимоги в області техніки щодо надійності у роботі напівпровідникових приладів і їх стійкості спонукало дослідників до застосування методів, які дають найбільш точні і однозначні результати при визначенні основних параметрів цих матеріалів у широких інтервалах зміни зовнішніх умов. Одним з найбільш перспективних методів, який широко використовують для вивчення фізичних властивостей матеріалів, є дослідження тензоефектів, бо їх висока наукова інформативність зумовлена тим, що при одновісній пружній деформації (ОПД) змінюються як міжатомні відстані у кристалічній ґратці, так і її симетрія. Цей метод дає значну інформацію про зонну структуру (про мінімуми енергії в зоні провідності), механізми п'єзоопору, про формування хвостів густини станів у забороненій зоні, а також особливості розсіяння носіїв заряду в таких багатодолинних напівпровідниках, як кремній і германій.

Чільне місце у фізиці напівпровідників займають локалізовані стани (глибокі рівні) у забороненій зоні, які знаходяться на значній енергетичній відстані від країв дозволених зон. Незважаючи на наявність потужних і постійно вдосконалюваних методів досліджень, проблема глибоких рівнів актуальна і у теперішній час, оскільки роль глибоких рівнів необхідно враховувати при аналізі оптичних, флукуаційних, електричних, резонансних та інших фізичних явищ у напівпровідниках. З практичної точки зору, домішкові центри з глибокими рівнями визначають спектри випромінювання світлодіодів, є центрами швидкої рекомбінації, створюють великий вплив на чутливість однорідних напівпровідників до механічних тисків. Внаслідок ОПД зниження симетрії ґратки напівпровідника призводить, при наявності несиметрично розташованих у ґратці дефектів, до анізотропної зміни їх параметрів, тобто до розщеплення багаторазово вироджених енергетичних рівнів. Аналізуючи результати вимірів зсуву енергетичного положення глибокого рівня з прикладанням механічних напружень в основних кристалографічних напрямках кристалів *Ge* та *Si*, можна ідентифікувати атомарний стан радіаційного дефекту.

Ізовалентні домішки в ковалентних кристалах не є електрично активними центрами, тому їх вплив на електричні властивості кремнію визначається полями внутрішніх напружень,

які виникають через невідповідність ковалентних радіусів атомів матриці і легуючої домішки. У зв'язку з цим виникає необхідність оцінки величини цих далекодіючих хаотичних деформаційних полів і досліджень їх впливу на різні кінетичні ефекти.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження тензоефектів в опромінених кристалах *n-Si* та *n-Ge* пов'язане з державними науковими програмами, зокрема, науковими планами кафедри фізики Луцького державного технічного університету. Базовою для підготовки й подання дисертаційної роботи була науково – дослідна робота на тему “Дослідження впливу дефектів і їх комплексів на фізико-механічні властивості напівпровідникових матеріалів”, № державної реєстрації 0101U000346.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягає у вивченні природи тензоефектів в германії та кремнії при одновісних пружних деформаціях (ОПД) до і після γ -опромінення, а також з'ясування природи п'єзоопору у кристалах *n*-кремнію, легованих фосфором та ізовалентною домішкою (ІВД) германію.

Для досягнення поставленої мети необхідно було розв'язати такі задачі:

1. Визначити зміну глибини залягання енергетичного рівня $(E_c - 0,2)eV$ у γ -опроміненому *n-Ge* для головних кристалографічних напрямів у всьому діапазоні прикладених механічних напружень;
2. Експериментально дослідити особливості п'єзоопору германію при ОПД в області власної провідності;
3. Визначити зміну глибини залягання енергетичного рівня $(E_c - 0,17)eV$ А-центру в g-опроміненому *n-Si* для напрямку $[100]$ у широкому діапазоні механічних напружень $(0 \div 12000 \text{ eÅ}/\text{m}^2)$;
4. Дослідити вплив електрично активної домішки фосфору в комплексі з ізовалентною домішкою германію на п'єзоопір кристалів *n-Si*;
5. Розробити методику оцінки модулів пружності у монокристалах *n-Ge* та *n-Si* на основі вимірювання поздовжнього п'єзоопору.

Аналіз отриманих на даний час результатів дає право розглядати метод п'єзоопору у поєднанні з результатами вимірювань ефекту Холла як один з найбільш ефективних та інформативних методів для дослідження кристалів.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Запропоновано визначення зміни глибини залягання енергетичного рівня $(E_c - 0,2)eV$ радіаційного дефекту у g- опроміненому *n-Ge* для досліджуваного інтервалу механічних напружень. Встановлено, що для напрямів $[100]$ та $[110]$ ця зміна має лінійний характер у всьому діапазоні прикладених механічних напружень, а для напрямку $[111]$ терпить згин, який пояснюється різною взаємодією рівня з долинами *c*- зони при збільшенні тиску.
2. Вивчено п'єзоопір *Ge* в області власної провідності, коли одночасно проявляється деформаційне переселення носіїв заряду між еквівалентними *L* -долинами і зміна загальної концентрації власних носіїв з тиском. Показано, що при $T > 320 \text{ K}$ для напрямів $[111]$ та $[100]$ необхідно врахувати переходи електронів з деформацією між *L*- та *D*-долинами зони провідності.
3. Визначено у широкому діапазоні прикладених механічних напружень зміну глибини залягання енергетичного рівня $(E_c - 0,17)eV$ А-центру в *n-Si* на основі вимірювання поздовжнього п'єзоопору. Наявність згину на залежності $\lg r = f(X)$ для напрямку $[100]$ в області $X \sim 7000 \text{ kГ}/\text{cm}^2$ пояснюється різною взаємодією рівня $(E_c - 0,17)eV$ з долинами

c-зони при збільшенні тиску.

4. Досліджено особливості п'єзоопору кристалів *n-Si*, легованих електрично активною домішкою фосфору з $N_d > 10^{15} \text{ см}^{-3}$, в комплексі з ІВД германію і на основі цього виявлено зміну енергетичних електрично активних домішкових станів.

5. Запропоновано метод та визначено модулі пружності у монокристалах *n-Ge* та *n-Si* на основі обробки експериментальних залежностей поздовжнього п'єзоопору. Вказані температурні та концентраційні інтервали коректного застосування цього методу.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Модернізовано установку для дослідження монокристалів кремнію та германію при ОПД, що дозволяє досліджувати зонну структуру більш складних напівпровідникових сполук.

2. Вивчення тензоефектів у γ - опромінених кристалах германію та кремнію дозволяє не лише визначати вище згадані параметри, але і прогнозувати можливості щодо створення нових датчиків, які працюватимуть у полях радіації.

3. Дослідження методом п'єзоопору кристалів *Si*, легованих фосфором та ізовалентною домішкою германію, дозволяє робити оцінку величини внутрішніх деформаційних полів у цих кристалах.

4. Запропоновано доволі просту і надійну методику визначення модулів пружності у монокристалах *n-Ge* та *n-Si* при вимірюванні і обробці значень лише поздовжнього п'єзоопору.

Особистий внесок здобувача. Впродовж роботи над дисертацією автор особисто розробляв та впроваджував деякі вузли вимірювальної установки. Особисто було виконано всі експериментальні та теоретичні дослідження, що включені до дисертації. Самостійно представляв результати експериментів на наукових семінарах та конференціях. Дисертант проявляв творчий підхід в обговоренні з керівником постановки задач, а також у виборі ефективного шляху їх вирішення. Автором сформульовано усі положення і висновки, що складають суть дисертації.

Апробація результатів дисертації. Основні результати, подані в дисертації, доповідались на II Міжнародному Смакуловому симпозіумі (Тернопіль, 2000 р.); конференції молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики “ЕВРІКА – 2001” (Львів, ЛНУ ім. І.Франка, 2001р.); конференції молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики “ЕВРІКА – 2002” (Львів, ЛНУ ім. І.Франка, 2002 р.); на першому науковому симпозіумі “Сучасні проблеми інженерної механіки” (Луцьк, ЛДТУ, 2000 р.); на I-ій українській науковій конференції з фізики напівпровідників (Одеса, ОНУ, 2002р.); на наукових конференціях професорсько – викладацького складу Луцького державного технічного університету впродовж 1994-2002 років, об'єднаних наукових семінарах “Фізика напівпровідників та діелектриків” Волинського державного університету ім. Лесі Українки та Луцького державного технічного університету.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 16 друкованих праць, з них 6 – у фахових журналах.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та переліку використаної літератури. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 134 сторінки, з них 36 - рисунків та одна таблиця. У роботі використано 149 бібліографічних посилань.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, розглянуто стан проблеми, визначено її мету та основні завдання досліджень, відзначено наукову новизну та практичне значення. Приведено відомості про апробацію роботи, особистий внесок дисертанта, публікації, об'єм та структуру дисертації.

Перший розділ присвячено феноменологічній теорії п'єзоопору, яка дозволяє одержати вирази коефіцієнтів п'єзоопору для кубічних кристалів, а також показано співвідношення між коефіцієнтами п'єзоопору та еластоопору через коефіцієнти модулів пружності. Приведено літературний огляд результатів експериментальних робіт по дослідженню: лінійних і нелінійних по деформації ефектів багатодолинних напівпровідників (p-Ge та p-Si); впливу глибоких центрів радіаційного походження на п'єзогальваномагнітні ефекти у напівпровідниках; п'єзоопору монокристалів кремнію середнього ступеня легування електрично активними домішками; особливостей впливу ізовалентних домішок на електрофізичні властивості кремнію.

Огляд літературних джерел обґрунтовує актуальність поставленої задачі.

Другий розділ містить опис методики та технологічних операцій підготовки зразків для досліджень, а також в ньому представлено схематичне зображення установки для вимірювання поздовжнього п'єзоопору. Подано опис технічних характеристик установки, на якій проведена експериментальна частина роботи. Для забезпечення простоти у вимірюваннях та надійності при одержанні результатів наведено оптимальні геометричні розміри і форми зразків. Для дослідження впливу одновісних пружних деформацій на поведінку основних характеристик кристалів $n\text{-Ge}$ та $n\text{-Si}$ використовувався пристрій для автоматичного запису залежностей питомого опору від механічного напруження.

Описано методику, а також вимірювання ефекту Холла для зняття температурних залежностей концентрації носіїв заряду та їх рухливості. Обґрунтовано метод досліджень тензоефектів при одновісній пружній деформації.

Третій розділ присвячено результатам дослідження тензоефектів у кристалах германію. З метою визначення зміни з тиском енергетичної щільності $d(DE)$ між глибоким рівнем ($E_c-0,2$) eВ радіаційного дефекту та дном зони провідності у широкому діапазоні механічних напружень проведено вимірювання поздовжнього п'єзоопору γ -опроміненого $n\text{-Ge}$ для головних кристалографічних напрямів [100], [110], [111]. На рисунку 1 приведено одержані при температурі $T=165\text{K}$ залежності $\gamma = f(X)$ для вихідних зразків $n\text{-Ge}$ (криві 1, 2, а 3 – збігається з віссю X) та аналогічні залежності ($\gamma', \gamma'', \gamma'''$) для тих же зразків після g-опромінення дозою $8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Якісні відмінності ходу залежностей 1, 2 та γ', γ'' свідчать про те, що в g-опромінених зразках при даній температурі з деформацією одночасно проявляються два механізми, що визначають зміну величини п'єзоопору: перший - міждолинний перерозподіл носіїв заряду у зоні провідності, який зумовлює зростання $D\gamma/\gamma_0 = f(X)$ та вихід на насичення при $n = \text{const}$ носіїв заряду у c-зоні; другий – збільшення загальної концентрації носіїв заряду у зоні провідності внаслідок зменшення енергетичної щільності між дном зони провідності та глибоким рівнем, що зумовлює спад $D\gamma/\gamma_0 = f(X)$.

Внаслідок зіставлення залежностей $D\gamma/\gamma_0 = f(X)$ до і після опромінення, отримано залежності γ'' , γ''' , γ''' , зміна п'єзоопору яких зумовлена дією лише другого механізму.

Результуючі дані цих

залежностей, представ- лені в напівлогарифміч-ному масштабі ($\lg \gamma = f(X)$) для напрямків [100], [110], трансформуються в прямі лінії, нахили яких дають значення зміни ширини енергетичної щільності від механічного навантаження :

(1)
де α - коефіцієнт, що змінюється від 1 до 2, залежно від ступеня заповнення рівня. Якісно від цих залежностей відрізняється залежність $\lg \rho = f(X)$ у напрямку [111], для якої спостерігаються два характерні прямолінійні нахили (до та після 7000 кГ/см^2). Величина зміни енергетичної щільності для кристалографічних напрямів у розрахунку на кожні 1000 кГ/см^2 становить: $X \parallel J \parallel [100] \text{ } 1,32 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$; $X \parallel J \parallel [110] \text{ } 3 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$; $X \parallel J \parallel [111] \text{ } 10,2 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$ для $0 \leq X \leq 7000 \text{ кГ/см}^2$ і $2,55 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$ при $X > 7000 \text{ кГ/см}^2$. Як бачимо, зміна $\delta(E)$ для $0 \leq X \leq 7000 \text{ кГ/см}^2$ в чотири рази перевищує відповідну величину при $X > 7000 \text{ кГ/см}^2$.

Пояснюється, що у випадку $X < 7000 \text{ кГ/см}^2$ відбувається обмін носіями заряду між рівнем ($E_c - 0,2$) eV і чотирма долинами зони провідності, а при $X > 7000 \text{ кГ/см}^2$, в силу згадуваних вище причин (опускання рівня і підняття трьох долин), здійснюється обмін носіями заряду при $T = 165 \text{ K}$ між рівнем і лише з однією долиною (яка опускається), про що і свідчить згин на залежності $\lg \rho = f(X)$.

Для дослідження особливостей п'єзоопору германію в області власної провідності вибирались кристали з концентрацією носіїв при $T = 300 \text{ K}$. Хід залежностей $\rho = f(X)$ для кристалографічних напрямів [110] та [111] при $T = 290 \text{ K}$ пояснюється одночасною дією двох механізмів: - переселенням з деформацією носіїв заряду між долинами зони провідності, що приводить до зростання п'єзоопору; - збільшенням загальної концентрації власних носіїв заряду (що веде до спаду $\rho = f(X)$) внаслідок зменшення ширини забороненої зони з тиском, оскільки зміщення вниз L -долини описується:

(2)

де S_{11}, S_{12}, S_{44} – модулі пружності, а X_d^L і X_u^L – константи деформаційного потенціалу для L – мінімумів; а зустрічне зміщення максимуму розщепленої v -зони визначається як:

(3)

де α і d – значення констант деформаційного потенціалу. Для напрямку [100] відносне зміщення долин відсутнє, тому і відсутній перший механізм п'єзоопору. При збільшенні температури величина r_{max}/r_0 (коли криві проходять через максимум) зменшується, бо внесок другого механізму постійно зростає. А ось збільшення цієї величини (r_X/r_0) після 8000 кГ/см^2 зі зростанням температури неможливо пояснити дією лише двох вище згадуваних механізмів (рис.2).

При таких температурах і механічних напруженнях необхідно враховувати вплив D -мінімумів, котрі орієнтовані вздовж [100] і знаходяться при $X=0$ на $0,18 \text{ eV}$ вище основних мінімумів (L -мінімумів) енергії c -зони.

Перехід носіїв заряду з L -долин у D -долини супроводжується зростанням питомого опору (r_X/r_0). Згідно з теорією деформаційного потенціалу, енергетична щільність між L - та D -мінімумами із-за їх відносного зміщення при $X \parallel J \parallel [111]$ записується:

(4)

де X_d^D і X_u^D - константи деформаційного потенціалу для долин [100].

Це підтверджується і результатами вимірювання п'єзоопору для випадку $X \parallel J \parallel [100]$. При $T = 273 \text{ K}$ п'єзоопір для цього напрямку відсутній, бо немає відносного зміщення L -долин, не відбуваються ще переходи носіїв заряду з v -зони у c -зону і не проявляються при цій температурі та заданих X переходи між L - і D -долинами. Збільшення r_X/r_0 із зростанням температури при фіксованих $X > 4000 \text{ кГ/см}^2$ теж пояснюється зміною величини енергетичної щільності між L - і D -долинами та ефективністю переходів електронів між ними.

Зовсім відносного зміщення D -долин не відбувається, коли механічне напруження прикладено вздовж напрямку $[110]$ (тобто $X^\wedge[100]$), і в цьому випадку п'єзоопір у досліджуваних інтервалах X та температури визначається дією лише двох вище згадуваних механізмів, що добре підтверджується ходом експериментальних залежностей.

На основі одержаних результатів зроблено висновок, що в області власної провідності Ge для пояснення особливостей п'єзоопору крім деформаційного переселення носіїв заряду між еквівалентними L -долинами та зміни загальної концентрації n_i із-за зміни ширини забороненої зони з тиском необхідно, при певних умовах, враховувати для напрямів $[111]$ та $[100]$ переходи носіїв заряду між L - та D -долинами c -зони.

Суть методу визначення модуля пружності S_{44} в $n-Ge$ на основі вимірювання поздовжнього п'єзоопору для випадку зводиться до обробки експериментальних залежностей $\gamma = f(X)$ згідно з:

$$\rho_\infty = \rho_0 + \gamma \cdot X \quad (5)$$

де ρ_∞ - значення питомого опору при повному переселенні носіїв заряду в одну долину (виході $\gamma = f(X)$ на насичення),

$$\rho_0 = \rho(X=0) \quad (6)$$

- параметр анізотропії рухливості, ρ_0 - значення питомого опору при $X=0$.

В результаті одержуємо функцію $\lg(C1C0^4) = f(X)$, яка лінійно змінюється із зростанням X (рис.3). Нахилом цих прямих при заданих температурах ($T=\text{const}$) визначається величина модуля пружності за виведеною нами формулою:

$$S_{44} = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{d \lg(C1C0^4)}{dX} \quad (7)$$

Обчислені значення S_{44} із збільшенням температури становлять $(1,44; 1,45; 1,46; 1,49) \cdot 10^{-12} \text{ см}^2 \cdot \text{дин}^{-1}$ і знаходяться, як видно, в межах експериментальної похибки.

Четвертий розділ присвячено дослідженню тензоефектів у крист-талах кремнію. Для визначення зміни енергетичної щільності між глибоким рівнем $(E_c - 0,17) \text{ eV}$ А - центру та дном зони провідності у всьому діапазоні прикладання механічних напружень для напрямку $[100]$ було проведено вимірювання п'єзоопору γ -опроміненого $n-Si$. З цієї метою отримано залежності $\gamma = f(X)$ при $T = 125 \text{ K}$ (яка є температурою найкращої іонізації рівня) і представлено як $\gamma = f(X)$. Зіставляючи результати, одержані на вихідному зразку з аналогічною залежністю для цього ж зразка після g -опромінення дозою певною, отримали залежність, п'єзоопір якої зумовлений дією лише другого механізму – зростання концентрації у зоні провідності за рахунок іонізації одновісною пружною деформацією глибокого рівня. За нахилом прямолінійних відрізків $\lg \gamma = f(X)$ визначено величину зміни енергетичної щільності між рівнем і долинами c -зони згідно з (1).

Величина зміни енергетичної щільності у розрахунку на кожні 1000 кГ/см^2 при механічних напруженнях $X > 1000 \text{ кГ/см}^2$ складає $3,88 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$, а для $X < 1000 \text{ кГ/см}^2$ вона становить $11,64 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$. Як бачимо, зміна $\delta(E)$ для початкового інтервалу напружень у три рази перевищує відповідну величину при $X > 1000 \text{ кГ/см}^2$. При $T = 125 \text{ K}$ для відбувається обмін носіями заряду між рівнем $(E_c - 0,17) \text{ eV}$ і шістьма долинами зони провідності, а у випадку $X > 1000 \text{ кГ/см}^2$ рівень взаємодіє лише з двома долинами, про що і свідчить згин на залежності $\lg \gamma = f(X)$.

З метою вивчення впливу ІВД Ge на п'єзоопір $n-Si$ досліджували кристали $n-Si$ з кількома різними концентраціями домішки фосфору, а також кремній, спеціально легований ізовалентною домішкою германію і фосфору (рис.4). Механічне напруження, прикладене до зразків вздовж кристалографічного напрямку $[100]$, що збігається з

напрямом росту кристалів, змінювалось у всьому діапазоні. Для кристалів *n-Si* з найменшою концентрацією домішки фосфору залежність ρ_{∞} виходить при $T=78K$ на насичення близько 6000 кГ/см^2 . (після повного переселення носіїв в долини , що опустилися). Якісно від цієї залежності відрізняються криві 2, 4 рис. 4, де концентрація фосфору в *n-Si* перевищує 10^{15} см^{-3} .

Спостерігається проходження $\rho_{\infty}=f(X)$ через максимум з подальшим зменшенням питомого опору при збільшенні механічних напружень. Такий вигляд залежностей пояснюється одночасною дією двох основних причин, що зумовлюють наявність ρ_{∞} :

- перерозподілом носіїв заряду між долинами, що піднімаються і опускаються при ОПД , який призводить до зростання $\rho_{\infty}=f(X)$ через зменшення середньої рухливості електронів;
- збільшенням концентрації носіїв заряду в *c*-зоні за рахунок зменшення енергетичної щільності деформації між станами домішкових центрів і дном *c*-зони, що і викликає спад $\rho_{\infty}=f(X)$. При збільшенні концентрації легуючої домішки фосфору спад на залежності $\rho_{\infty}=f(X)$ затулюється в області більших механічних напружень. Однак ситуація змінюється, коли в кремній крім домішки фосфору вводиться значної концентрації електрично пасивна домішка германію. Введення ізовалентної домішки германію призводить до зменшення рухливості носіїв заряду. Залежність 3 рис.4 для зразків *n-Si<Ge>* з чітким виходом на насичення якісно нагадує хід залежності 1 з малою концентрацією фосфору, тобто відсутністю другої причини, що зумовлює після максимуму наявність ρ_{∞} в кристалах *n-Si* з домішковою зоною, хоча в даному випадку концентрація домішки фосфору найбільша серед досліджуваних нами кристалів. З одержаних результатів бачимо, що при наявності домішки германію концентрацією в кристалах кремнію з концентрацією домішки фосфору не спостерігається при $T>78K$ іонізації електрично активних домішкових центрів прикладеною одновісною пружною деформацією, тобто енергетичні стани цих центрів вже змінені появою у кристалах внутрішніх деформаційних полів, які виникають внаслідок різниці ковалентних радіусів атомів кремнію і германію.

Аналогічно *n-Ge*, розглянуто можливість визначення значень модулів пружності в *n-Si* на основі вимірювання поздовжнього ρ_{∞} , але, оскільки енергетичні мінімуми в цих кристалах знаходяться на осях $\langle 100 \rangle$, то з метою фіксування найбільших змін ρ_{∞} механічні одновісні напруження прикладалися вздовж цього напрямку. Визначення модулів пружності (S_{11} - S_{12}) в *n-Si* за результатами вимірювання ρ_{∞} для випадку $X \parallel J \parallel [100]$ здійснюється опрацюванням експериментальних значень залежностей ρ_{∞} згідно з одержаним виразом:

$$\rho_{\infty} = \rho_{\infty}^0 \left(1 + K \frac{X}{J} \right) \quad (8)$$

де ρ_{∞}^0 -значення питомого опору при насиченні $\rho_{\infty}=f(X)$, K - параметр анізотропії рухливості, який теж визначається згідно з (6), та одержанням залежностей $\lg(C10^4)=f(X)$. Для всіх досліджуваних зразків з різними концентраціями легуючої домішки одержані значення $\lg(C10^4)=f(X)$ мають лінійну залежність, нахил якої дає значення, що добре узгоджується з результатами інших авторів.

Таким чином, за нахилом лінійних залежностей $\lg(C10^4)=f(X)$ досягається висока точність при визначенні значень модулів пружності *n-Si* та *n-Ge*, а сам запропонований метод ґрунтується на використанні даних, одержаних лише при вимірюванні поздовжнього $\rho_{\infty}=f(X)$ (для *n-Ge*) та $\rho_{\infty}=f(X)$ (для *n-Si*), виключаючи цим самим похибки при вимірюванні поперечного ρ_{∞} .

ВИСНОВКИ

результати досліджень електрофізичних властивостей неопромінених та γ - опромінених монокристалів германію та кремнію дозволяють зробити наступні висновки:

1. Визначено при $T = 165K$ зміну глибини залягання енергетичного рівня $(E_c - 0,2)eV$ в γ -опроміненому $n-Ge$ у всьому діапазоні прикладання механічних напружень. Для напрямів $[100]$ і $[110]$ лінійність зміни величини енергетичної щілини $\delta(E)$ від механічного напруження між дном зони провідності і рівнем $(E_c - 0,2)eV$ спостерігається у всьому діапазоні прикладених механічних напружень, а у випадку $X \parallel J \parallel [111]$ ця зміна для $0 \leq X \leq 7000 \text{ кГ/см}^2$ у чотири рази перевищує відповідну величину при $X > 7000 \text{ кГ/см}^2$. Пояснюється, що при $X < 7000 \text{ кГ/см}^2$ відбувається обмін носіями заряду між рівнем і чотирма долинами зони провідності, а при $X > 7000 \text{ кГ/см}^2$, в силу згадуваних вище причин (опускання рівня і підняття трьох долин), рівень взаємодіє лише з однією долиною (яка опускається).
2. Показано, що в області власної провідності Ge для пояснення ходу залежностей $\rho = f(X)$ крім деформаційного переселення носіїв заряду між еквівалентними L -долинами та зміни загальної концентрації n_i із-за зміни ширини забороненої зони з тиском необхідно при $T > 320K$ для напрямів $[111]$ та $[100]$ враховувати переходи носіїв заряду між L - та D -долинами зони провідності.
3. Запропоновано метод визначення модуля пружності S_{44} в $n-Ge$ на основі вимірювання поздовжнього п'єзоопору для випадку $X \parallel J \parallel [111]$. Обробляючи експериментальні залежності $\rho = f(X)$, одержано функцію $\lg(C \cdot 10^4) = f(X)$, яка лінійно змінюється із зростанням X . За нахилом цих прямих при заданих температурах ($T = \text{const}$) визначено величину модуля пружності.
4. Визначено при $T = 125K$ зміну глибини залягання глибокого рівня A -центру в гамма-опроміненому $n-Si$. Встановлено, що величина зміни енергетичної щілини для $X < 1000 \text{ кГ/см}^2$ у три рази перевищує відповідну величину при $X > 1000 \text{ кГ/см}^2$. Пояснюється, що при $X < 1000 \text{ кГ/см}^2$ відбувається обмін носіями заряду між рівнем $(E_c - 0,17)eV$ і шістьма долинами зони провідності, а при $X > 1000 \text{ кГ/см}^2$ рівень взаємодіє лише з двома долинами.
5. Виявлено на основі вимірювання п'єзоопору, що при наявності ізовалентної домішки германію вказаною концентрацією у кристалах кремнію з концентрацією домішки фосфору $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ не спостерігається іонізації електрично активних домішкових станів прикладеною одновісною пружною деформацією, бо їх енергетичні стани вже змінені наявністю в кристалах внутрішніх деформаційних полів, які виникають внаслідок різниці ковалентних радіусів атомів кремнію і германію.
6. Визначено модулі пружності в $n-Si$. Цей метод також ґрунтується на основі вимірювання поздовжнього п'єзоопору, для випадку $X \parallel J \parallel [100]$ (тобто напряму максимальної зміни п'єзоопору) зводиться до обробки експериментальних залежностей п'єзоопору згідно із запропонованим методом. Одержана функція лінійно змінюється із зростанням X . За нахилом цієї залежності визначено величину модулів пружності.

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані у наступних роботах:

1. А.В. Федосов, М.В. Хвищун, Л.В.Ящинський. Вплив ізовалентної домішки германію на п'єзоопір кремнію // Журнал фізичних досліджень, ЛНУ ім.Франка.- 2000.-Т.4.-№ 4.- С.-318-320.
2. А.В.Федосов, С.А.Федосов, М.В.Хвищун, Л.В.Ящинський .Вплив радіаційних дефектів на провідність $n-Ge$ при одновісній пружній деформації // Фізичний вісник НТШ. -т.4.- 2001.- С.129-134.
3. А.В. Федосов, Р.М.Семенченко, Л.В.Ящинський, М.В. Хвищун. Особливості

- міждолинного розсіювання в n -Si в температурному інтервалі 78-300 К // Науковий вісник ВДУ. Серія фізичні, хімічні, математичні науки. – Луцьк: Волин. Держ. ун-т ім. Лесі Українки.- 1998.-№6.-С.11-15.
4. А.В. Федосов, М.В. Хвищун, Л.В.Ящинський, В.С. Тимошук. Визначення зміни глибини залягання електрично активного рівня в γ - опроміненому Ge при одновісній пружній деформації // Науковий вісник ВДУ. Фізичні науки. – Луцьк: Волин. Держ. ун-т ім. Лесі Українки.- 1999.-№14.-С.124-130.
 5. А.В.Федосов, С.А.Федосов, М.В.Хвищун, Д.А.Захарчук. Особливості п'єзоопору германію в області власної провідності // Науковий вісник ВДУ . Фізичні науки. – Луцьк: Волин. Держ. ун-т ім. Лесі Українки.- 2001.-№7.-С.26-30.
 6. М.В.Хвищун, С.А.Федосов, Д.А.Захарчук. Особливості п'єзоопору Ge при наявності глибоких рівнів та в області власної провідності // Вісник Львівського університету.Серія фізична.-Львів: Львівськ.Національн.ун-т ім.Івана Франка.-2001.-№34.С.85-93.
 7. А.В.Федосов, С.А.Федосов, М.В.Хвищун, Л.В.Ящинський. Особливості впливу глибоких радіаційних центрів на провідність n -Ge при одновісній пружній деформації // Фундаментальні і прикладні проблеми сучасної фізики. Матеріали II Міжнародного смакулового симпозіуму.- Тернопіль: ТДТУ, Джура.-2000.-С.187.
 8. М.В.Хвищун, С.А.Федосов, Д.А.Захарчук.Особливості п'єзоопору Ge при наявності глибоких рівнів та в області власної провідності // Тези доповідей Міжнародної конференції з теоретичної та експериментальної фізики “Евріка -2001”.-Львів: Львівськ. Націон. Ун-т ім. Івана Франка, 2001.-С.150.
 9. А.В.Федосов, М.В.Хвищун, Д.А.Захарчук. Вплив електрично пасивних домішок на механічну міцність монокристалів кремнію// Тези першого наукового симпозіуму “Сучасні проблеми інженерної механіки”.- Луцьк, ЛДТУ,2000,- С.31.
 10. М.В.Хвищун, С.А.Федосов, Д.А.Захарчук, А.М.Коровицький Особливості утворення термодонорів у кристалах n -Si<Ge>// Тези доповідей Всеукраїнської конференції молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики “Евріка -2002”.-Львів: Львівськ. Націон. Ун-т ім. Івана Франка, 2002.-С.15-16.
 11. М.В.Хвищун, Д.А.Захарчук, С.А.Федосов, Л.В. Ящинський, Ю.В. Коваль. Особливості впливу ізовалентної домішки германію на неоднорідність питомого опору в кристалах кремнію // Тези доповідей Всеукраїнської конференції молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики “Евріка -2002”.-Львів: Львівськ. Націон. Ун-т ім. Івана Франка, 2002.-С.19-20.
 12. А.В. Федосов, М.В. Хвищун, Л.В.Ящинський. Особливості п'єзоопору в n -Si з ізовалентною домішкою германію// Збірник наукових статей ЛДТУ, -1998.- С.240-243.
 13. В.І.Швабюк, А.В.Маткова, М.В. Хвищун. Визначення модулів пружності в монокристалах n -Ge та n -Si методом вимірювання п'єзоопору // Наукові нотатки, ЛДТУ. -1998.- С.184-194.
 14. А.В. Федосов, М.В. Хвищун, Л.В.Ящинський. Особливості впливу ізовалентної домішки Ge на п'єзоопір кремнію// Науковий вісник ЛДТУ, Вузівський збірник за напрямком “ Фізика, математика”, Т.1в.1, 1998. – С.72,77.
 15. А.В.Федосов, В.С.Тимошук, М.В.Хвищун. Методи дослідження поздовжнього і поперечного п'єзоопору в кристалах кремнію // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за напр.”Інженерна механіка”), Луцьк. 2001. С.6.
 16. А.К.Семенюк, А.М.Коровицький, М.В.Хвищун. Тензо- та атомнопереорієнтаційні ефекти у кристалах твердих розчинів кремній-германій// Тези доповідей I української конференції з фізики напівпровідників .-Одеса: Одеський. Націон. Ун-т ., 2002.Т.2,-С.108-109.

АНОТАЦІЇ

Хвищун М.В. Особливості п'єзоопору в неопромінених та γ -опромінених монокристалах германію і кремнію. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико – математичних наук за спеціальністю 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків. – Волинський державний університет ім. Лесі Українки, Луцьк, 2002.

Визначено для γ - опромінених монокристалів германію та кремнію величину зміни енергетичної щільності між рівнями $(E_c - 0,2)eV$ і $(E_c - 0,17)eV$ та дном c -зони при температурах найбільш повної іонізації рівнів у широкому діапазоні прикладених механічних напружень.

Встановлено, що у кристалах германію в області власної провідності для пояснення ходу залежностей п'єзоопору крім деформаційного переселення носіїв заряду між еквівалентними L -долинами та зміни загальної концентрації власних носіїв заряду з тиском необхідно при певних умовах враховувати для напрямів $[111]$ та $[100]$ переходи носіїв заряду між L - та D -долинами c -зони.

Показано, що при наявності ІВД германію в кристалах кремнію з домішкою фосфору не спостерігається із ОПД іонізації електрично активних домішкових станів.

Запропоновано метод визначення модулів пружності n -Ge та n -Si, який ґрунтується на вимірюванні поздовжнього п'єзоопору $\rho_x^{[111]} = f(X)$ (для n -Ge) та $\rho_x^{[100]} = f(X)$ (для n -Si).

Ключові слова: напівпровідник, тензоефекти, опромінення, ізовалентна домішка, глибокі рівні.

M. Khvyshchun. Features of piezoresistance in unexposed and γ -exposed to γ -rays monocrystals of germanium and silicon.

-Manuscript.

Thesis for Candidate's of Science Degree on speciality 01.04.10 – semiconductors and dielectric physics. Lesia Ukrainka Volyn State University, Lutsk, 2002.

The size of energy gap $\delta(E)$ between the deep level $(E_c - 0,2)eV$ and the bottom of conductivity band has been found in the wide range of applied elastic mechanical stresses for the main crystallographic directions. It has been ascertained that for the explanation of the peculiarities of piezoresistance of germanium crystals in the field of their own conductivity it is necessary, besides deformational migration of charge carriers between the equivalent L -valleys and the change of the total concentration n_i owing to the change of the energy gap width, to take into account the migration of charge carriers between L - and D -valleys for the directions $[111]$ and $[100]$.

The value of energy gap change (at a rate of each) between the deep level) and the bottom of the conductivity band has been found for exposed to γ -rays silicon monocrystals in wide range of applied elastic mechanical stresses for direction $[100]$ at $T=125K$.

It is shown that at the presence of electrically passive impurity of germanium in silicon crystals with phosphorus concentration () no ionization of electrically active impurity centers is observed at uniaxial elastic deformation. It became evident that energy levels of above mentioned centers have been already changed by existing crystalline deformation fields, formed a result of covalent radii difference of germanium and silicon atoms.

To obtain high accuracy at elastic moduli estimation for n -Si and n -Ge linear dependences were used. The offered method of n -Si and n -Ge elastic moduli value estimation is grounded on the use of data, obtained at the measurement of longitudinal piezoresistance (for n -Ge) and $r = f(X)$ (for

n -Si) only.

Key words: semiconductors, tenseffects, irradiation, isovalent impurity, deep levels.

Хвищун Н.В. Особенности пьезосопротивления в необлученных и γ -облученных монокристаллах германия и кремния. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников и диэлектриков. – Волынский государственный университет им. Леси Украинки, Луцк, 2002.

Определено для γ -облученных монокристаллов германия и кремния величину $\delta(\Delta E)$ между уровнем $(E_c-0,17)\text{eV}$ а также $(E_c-0,17)\text{eV}$, и дном зоны проводимости в широком диапазоне приложенных упругих механических напряжений.

Установлено, что в кристаллах германия в области собственной проводимости для объяснения хода зависимостей $\rho = f(X)$ кроме деформационного переселения носителей заряда между эквивалентными L -долинами, а также изменения общей концентрации собственных носителей заряда с давлением, необходимо, при некоторых условиях, учесть для направлений $[111]$ и $[100]$ переходы носителей заряда между L - и D -долинами s -зоны. Показано, что при наличии ИВД германия в кристаллах кремния из концентрацией примеси фосфора не наблюдается при ОУД ионизация электрически активных примесных центров, потому что энергетические уровни этих центров уже изменены наличием в кристаллах внутренних деформационных полей, которые образуются вследствие разности ковалентных радиусов атомов кремния и германия.

Предложен метод для определения значений модулей упругости на использовании данных, полученных при измерениях продольного пьезосопротивления $\rho_x^{[111]} = f(X)$ (для $n\text{-Ge}$) и $\rho_x^{[100]} = f(X)$ (для $n\text{-Si}$) исключая этим самым ошибки при измерениях поперечного пьезосопротивления.

Ключевые слова: полупроводник, тензоэффекты, облучение, изовалентная примесь, глубокие уровни.

Підписано до друку 20.09.2002р.
Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.
Друк на різнографі. Ум.друк.арк.1.1.
Тираж 100 прим. Зам.236.

Редакційно-видавничий відділ
Луцького державного технічного університету
Львівська, 75, Луцьк, 43018