

**Міністерство освіти і науки України
Волинський державний університет
імені Лесі Українки**

Захарчук Дмитро Андрійович

УДК 621.382:544.022.37

**ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА РАДІАЦІЙНИХ ДЕФЕКТІВ НА
ЯВИЩА ПЕРЕНОСУ В БАГАТОДОЛИННИХ НАПІВПРОВІДНИКАХ
n-Ge ТА *n-Si***

01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків

**АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук**

Луцьк-2005

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі фізики Луцького державного технічного університету Міністерства освіти і науки України.

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

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Шендеровський Василь Андрійович, провідний
науковий співробітник Інституту фізики 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 імені
Юрія Федьковича, м. Чернівці.**

Захист відбудеться “ 16 ” березня 2005р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К.32.051.01 при Волинському державному університеті імені Лесі Українки Міністерства освіти і науки України за адресою: 43000, м. Луцьк, вул. Потапова, 9.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Волинського державного університету імені Лесі Українки за адресою: 43000, м. Луцьк, вул. Винниченка, 30.

Автореферат розісланий “ 12 ” лютого 2005р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради _____ Божко В.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. За останні кілька десятиріч років твердотільна електроніка зазнала кардинальних змін, що визначили розвиток обчислювальної і вимірювальної техніки, радіоелектроніки, автоматики, оптоелектроніки, телемеханіки і енергетики. Основними матеріалами для виробництва найширшого класу електронних приладів є багатодолінні напівпровідники, серед яких центральне місце посідають германій та кремній.

Монокристали германію та кремнію, що використовуються у мікроелектроніці та приладобудуванні, суттєво змінюють свої фізичні характеристики під дією різних фізико-активних впливів, таких як великі механічні навантаження, швидкозмінні температурні режими, радіація, світло та інші. У зв'язку з цим виникає необхідність детального вивчення властивостей цих матеріалів, що створить передумови для врахування зазначених впливів при конструюванні різного роду напівпровідникових датчиків, інтегральних мікросхем тощо.

Направлені деформаційні впливи на кристали, що змінюють як міжатомні відстані, так і симетрію ґратки, призводять до найбільш істотних змін енергетичного спектра електронів у багатодолінних напівпровідниках. Висока інформативність методу дослідження тензоефектів у напівпровідникових кристалах має велике значення як в науковому, так і в прикладному аспектах, оскільки дає важливу інформацію про зонну структуру, анізотропію фізичних властивостей, особливості розсіяння носіїв заряду тощо.

Найголовніші параметри напівпровідників для твердотільної електроніки визначаються наявністю і просторовим розподілом у кристалі домішкових атомів та інших дефектів. Нерівномірність розподілу домішок та дефектів призводить до існування в реальних напівпровідниках неоднорідностей за електрофізичними, рекомбінаційними, оптичними та іншими характеристиками. Сучасні кристали германію та кремнію, в яких донорні або акцепторні домішки з мілкими рівнями компенсовані домішками чи радіаційними дефектами з глибокими локальними рівнями, активно застосовуються для створення швидкодіючих приладів, активних елементів інтегральних схем, детекторів ядерних випромінювань. Таким чином, вивчення впливу неоднорідності розподілу домішок у кристалах германію та кремнію є актуальною і важливою проблемою як у наукових дослідженнях, так і в промисловій індустрії.

Радіаційні дефекти в германії та кремнії є центрами сильної локалізації електронів з глибокими рівнями в забороненій зоні. Вивчення поведінки таких центрів при одновісній деформації дає важливу інформацію про характер зв'язку локальних електронних станів центрів з найближчими зонами, вказує на тип симетрії дефекту, ступінь деформації внутрішніх зв'язків у ґратці, дозволяє в ряді випадків спостерігати атомну переорієнтацію анізотропних радіаційних дефектів, сприяючи їх ідентифікації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження впливу технологічних та радіаційних дефектів на явища переносу в багатодолінних напівпровідниках n -Ge та n -Si безпосередньо пов'язане з державними науковими

програмами і, зокрема, науковими планами кафедри фізики Луцького державного технічного університету. Базовими для підготовки й подання дисертаційної роботи були науково-дослідні роботи на теми: 1) „Дослідження впливу дефектів і їх комплексів на фізико-механічні властивості напівпровідникових матеріалів”, № державної реєстрації 0101U000345; 2) „Дослідження впливу технологічних особливостей на фізико-механічні властивості полімерних плівок та напівпровідникових матеріалів”, № державної реєстрації 0103U000277.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є з'ясування закономірностей впливу дефектів технологічного та радіаційного походження на явища переносу у монокристалах германію і кремнію при різних фізико-активних впливах і наявності неоднорідного розподілу легуючої домішки в об'ємі напівпровідника.

Для здійснення поставленої мети у роботі були поставлені такі завдання:

- дослідити вплив шарових періодичних неоднорідностей (ШПН) в об'ємі монокристала на явища переносу γ -опромінених n -Ge та n -Si;
- встановити особливості тензорезистивного ефекту в γ -опромінених монокристалах германію та кремнію n -типу провідності з шаровим розподілом домішки при різних інтенсивностях освітлення;
- експериментально визначити зміну параметра анізотропії рухливості в n -Ge і дослідити залежність складових $\mu_{\perp}$ і $\mu_{\parallel}$ рухливості носіїв заряду в ізоенергетичних еліпсоїдах залежно від дози γ -опромінення та інтенсивності світла;
- дослідити характер впливу Δ -долин зони провідності на особливості p -ззоопору n -германію;
- визначити у широкому діапазоні механічних напружень величину деформаційних змін енергетичної щільності $\chi(\Delta E)$ між глибоким рівнем $(E_{C-0,17})eV$ і дном зони провідності в γ -опроміненому n -кремнії для кристалографічних напрямків $[110]$ і $[111]$;
- дослідити температурні залежності положення рівня Фермі в германії n - та p -типу провідності при наявності в забороненій зоні глибоких енергетичних рівнів.

Об'єктом дослідження є монокристали n -Ge та n -Si, вирощені методом Чохральського, леговані Sb , P , Au , а також опромінені певними дозами γ -опромінення.

Предметом дослідження є процеси розсіяння носіїв заряду у монокристалах германію та кремнію n -типу провідності за наявності в їх об'ємі дефектів технологічного та радіаційного походження.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань використовувався один із найбільш ефективних методів – метод дослідження тензоефектів при одновісній пружній деформації. Сукупність отриманих на даний час результатів дає право розглядати його у поєднанні з вимірюваннями ефекту Холла та p -ззо-холл-ефекту, як найбільш інформативний та наглядний метод для дослідження зонної структури,

коректного визначення її параметрів та параметрів, які характеризують механізми розсіяння носіїв заряду.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Показано, що шарові періодичні неоднорідності відіграють особливу роль у формуванні і конкретних проявах анізотропних властивостей компенсованих γ -опроміненим кристалів n -Ge та n -Si. За результатами досліджень встановлено, що вплив радіації на рухливість носіїв заряду і хід залежностей $\rho=f(X)$ в n -Ge і n -Si з періодичним розподілом легуючої домішки стає істотним при дозах $8 \cdot 10^{16} \text{ гкв/см}^2$ для n -Ge ($n_e = 2,6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$) та $1,25 \cdot 10^{17} \text{ гкв/см}^2$ для n -Si ($n_e = 1,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$).

2. Виявлено і досліджено вплив ШПН при різних інтенсивностях освітлення на п'єзоопір і рухливість носіїв заряду γ -опромінених монокристалів германію та кремнію n -типу. Експериментально показано якісно відмінний хід залежностей п'єзоопору для n -Ge і n -Si з неоднорідним розподілом домішки та встановлено, що із збільшенням інтенсивності освітлення і деформації амплітуда потенціального рельєфу зменшується.

3. Вперше для n -Ge визначено залежність складових $\mu_{\perp}$ і $\mu_{//}$ рухливості електронів в окремо взятому ізоенергетичному еліпсоїді від дози γ -опромінення та інтенсивності світла і показано, що поздовжня складова рухливості ($\mu_{//}$) практично не залежить від дози опромінення і освітлення на відміну від поперечної складової рухливості електронів ($\mu_{\perp}$). Встановлено, що зміна компоненти $\mu_{\perp}$ при збільшенні дози γ -опромінення та інтенсивності світла визначається зміною параметра анізотропії часів релаксації K_T .

4. Досліджено поздовжній п'єзоопір n -Ge в температурному інтервалі $77 \div 380 \text{ К}$ і показано, що при температурах вищих кімнатної слід враховувати вплив Δ -долин зони провідності на характер перерозподілу носіїв заряду в зоні провідності.

5. Обчислено у широкому діапазоні механічних напружень величину деформаційних змін енергетичної щільності $\delta(\Delta E)$ між глибоким рівнем $(E_C - 0,17) \text{ eV}$ і дном зони провідності в γ -опроміненому n -кремнії для кристалографічних напрямків $[110]$ і $[111]$.

6. Досліджено залежності положення рівня Фермі від температури в монокристалах германію n - та p -типу провідності за наявності глибоких енергетичних рівнів, що утворюються внаслідок введення в об'єм кристалу дефектів технологічним способом у процесі вирощування та γ -опроміненням.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Модернізовано на основі сучасних комп'ютерних технологій установку для досліджень п'єзоопору при одновісній пружній деформації та п'єзо-холл-ефекту монокристалів германію та кремнію при різних інтенсивностях освітлення.

2. Вплив ШПН на кінетичні коефіцієнти в n -Ge і n -Si визначається рівнем компенсації при γ -опроміненні і орієнтацією шарів по відношенню до напрямку вектора струму, що необхідно враховувати при виготовленні та експлуатації різного роду датчиків, які працюють в полях підвищеної радіації.

3. Наявність глибоких центрів радіаційного та технологічного походження вирішальним чином змінюють чутливість германію та кремнію до механічного тиску в широкому температурному інтервалі, що може бути використано в тензосенсорах.

4. Встановлено, що освітлення γ -опромінених монокристалів n -Ge та n -Si з глибокими рівнями суттєво впливає на їх важливі електрофізичні характеристики, що має практичний інтерес при створенні високочутливих фотоелектричних перетворювачів і датчиків на їх основі.

Особистий внесок здобувача. Експериментальні дослідження та теоретичні розрахунки, наведені в роботі, виконані автором особисто або за його безпосередньої участю. Дисертант особисто розробляв та впроваджував окремі вузли вимірювальної установки. Усі висновки та положення, які складають суть дисертації, сформульовані автором особисто. Постановка завдань, обговорення та кінцевий аналіз одержаних результатів проводилися за участю наукового керівника д.ф.-м.н., проф. Федосова А.В. При проведенні експериментальних досліджень, теоретичних розрахунків, а також на певних етапах оформлення наукових статей брали участь к.ф.-м.н., доц. Яшинський А.В., к.ф.-м.н., доц. Хвищун М.В., к.ф.-м.н., доц. Коровицький А.М., к.ф.-м.н., доц. Федосов С.А., аспірант Коваль Ю.В. Опромінення ^{60}Co досліджуваних зразків проводилось спільно з відділом радіаційної фізики Інституту ядерних досліджень НАН України (м. Київ). Одержані результати представлені автором особисто на вітчизняних та міжнародних наукових семінарах та конференціях.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень, які представлені в дисертаційній роботі, доповідались та обговорювались на Міжнародній конференції молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики „ЄВРІКА – 2001” (Львів, ЛНУ імені Івана Франка, 2001р.); на Міжнародній конференції молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики „ЄВРІКА – 2002” (Львів, ЛНУ імені Івана Франка, 2002р.); на Першому науковому симпозіумі „Сучасні проблеми інженерної механіки” (Луцьк, ЛДТУ, 2000 р.); на І-й Українській науковій конференції з фізики напівпровідників з міжнародною участю (Одеса, ОНУ, 2002р.); на Міжнародній конференції „Физика электронных материалов” (Калуга, Росія, 2002р.); на IV Міжнародній школі-конференції „Актуальні проблеми фізики напівпровідників” (Дрогобич, ДДПУ імені Івана Франка, 2003р.); на I науково-технічній конференції з міжнародною участю „Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології” (Кременчук, ІЕНТ, 2004р.); на Міжнародній конференції молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики “ЄВРІКА – 2004” (Львів, ЛНУ імені Івана

Франка, 2004р.); на X Міжнародному семінарі з фізики та хімії твердого тіла (Львів, ЛНУ імені Івана Франка, 2004р.); на XIV Міжнародному совещанні „Радіаційна фізика твердого тіла” (Севастополь, МІИЭМ, 2004р.); на II-й Українській науковій конференції з фізики напівпровідників з міжнародною участю (Чернівці - Вишніва, ЧНУ, 2004р.) ; на наукових семінарах кафедри фізики Луцького державного технічного університету; на наукових конференціях професорсько-викладацького складу Луцького державного технічного університету (1999-2004рр.); на об'єднаному науковому семінарі “Фізика напівпровідників та діелектриків” Волинського державного університету та Луцького державного технічного університету.

Публікації. Основний зміст дисертації викладено у 19 наукових публікаціях, з них 6 – у фахових журналах.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних літературних джерел. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 142 сторінки, включаючи 40 рисунків та 6 таблиць. У роботі використано 162 бібліографічних посилання.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи та її зв'язок із науковими програмами, планами і темами досліджень, сформульовані мета та завдання роботи, вказані методи дослідження, відзначена наукова новизна та практична значимість отриманих результатів, представлені відомості про апробацію роботи, вказано основні публікації та висвітлено особистий внесок здобувача, описано структуру дисертації.

У **першому розділі** дисертації проведено аналітичний огляд основних понять теорії пружності кристалів, розглянуті теоретичні основи ефекту п'єзоопору в багатодолинних напівпровідниках, викладена феноменологічна теорія цього ефекту як в області малих, так і в області екстремально великих деформацій, що призводять до повного перерозподілу носіїв заряду між еквівалентними долинами зони провідності, які зміщуються в шкалі енергії з різною „швидкістю” при одновісній пружній деформації (ОПД).

Подано огляд літературних джерел, у яких відображено: експериментальні результати досліджень впливу ОПД на фізичні властивості монокристалів *n-Ge* та *n-Si*; особливості п'єзоопору кристалів германію та кремнію *n*-типу провідності при наявності глибоких енергетичних рівнів технологічного та радіаційного походження; дослідження впливу шарових періодичних неоднорідностей (ШПН) на кінетичні ефекти γ -опромінених кристалів *n-Ge* та *n-Si*.

Огляд літературних джерел обґрунтовує актуальність поставленої задачі і визначає завдання, які необхідно виконати для досягнення мети дисертаційної роботи.

У **другому розділі** здійснено опис експериментальної установки для створення однорідної одновісної пружної деформації та вимірювання поздовжнього п'єзоопору і п'єзо-холл-ефекту кристалів германію та кремнію при різних температурах і інтенсивностях світла. Подано основні технічні характеристики окремих вузлів вимірювальної установки. Представлено конструкцію інформаційно-вимірювальної

системи, яка дає можливість: реєструвати та створювати бази даних досліджуваних величин; обробляти одержані результати; виводити на дисплей комп'ютера вихідні величини (таблиці, графіки); копіювати та зберігати дані у текстовому форматі з можливістю подальшої роботи з ними в більшості прикладних програм; друкування графіків і таблиць на принтері. Описано методику підготовки зразків германію та кремнію для експериментальних досліджень, вказано їх форму та оптимальні геометричні розміри. Наведена технологія нанесення контактів на досліджувані зразки.

У **третьому розділі** проведено детальний аналіз причин виникнення ШПН та їх вплив на електрофізичні властивості γ -опромінених монокристалів *Ge* та *Si*.

Як методи дослідження використано ефект подовжнього п'єзоопору та п'єзо-холл-ефекту. Експериментальні вимірювання проводилися у температурному інтервалі $77 \div 300$ K на зразках *n-Ge* та *n-Si* двох груп, у яких шари росту по-різному орієнтувалися щодо напрямку струму (J) і механічного напруження (X): у зразках I групи шари росту перпендикулярні $J \parallel X$, а для II групи $J \parallel X$ спрямовані приблизно паралельно (для *n-Ge*) або уздовж шарів (для *n-Si*). Такі умови легко досягаються шляхом вирощування кристалів з розплаву методом Чохральського для кристалів *n-Ge* в напрямку [111], а для *n-Si* вісь росту збігалася з напрямком [100].

Встановлено, що ШПН для неопромінених зразків *n-Ge* та *n-Si* практично не впливає на величину п'єзоопору, і залежності $\rho_X/\rho_0 = f(X)$ для вихідних зразків обох груп майже збігаються, практично однакові для них і значення холлівської рухливості носіїв заряду. Відмінності в ході залежностей $\rho_X/\rho_0 = f(X)$ для зразків з різних груп починають проявлятися, коли при γ -опроміненні в забороненій зоні напівпровідників з'являються глибокі енергетичні рівні $(E_C - 0,2) \text{ eV}$ в *n-Ge* і $(E_C - 0,17) \text{ eV}$ в *n-Si*, що належать радіаційним дефектам. Поява таких рівнів і їх деіонізація зі зниженням температури призводить до зменшення концентрації носіїв заряду в шарах, тобто до зростання градієнтів питомого опору. Із збільшенням дози опромінення концентрація радіаційних дефектів зростає, а, отже, збільшується амплітуда ШПН, що і проявляється на кількісних змінах величини ρ_X/ρ_0 і холлівської рухливості носіїв заряду. Зростання п'єзоопору зумовлене зміною середньої рухливості носіїв заряду через деформаційне переселення їх в зоні провідності з долин, що піднімаються (які мають більшу рухливість μ_1), у долини, які опускаються (μ_2), з наступним виходом на насичення, коли процес переселення електронів закінчений.

Виявлено, що в *n-Ge*, незалежно від концентрації радіаційних дефектів, величина ρ_∞/ρ_0 після всіх досліджуваних доз опромінення залишається постійною при 77 K аж до 12000 кГ/см^2 , тим самим підтверджуючи недостатність зміни з тиском енергетичної щільності між рівнем $(E_C - 0,2) \text{ eV}$ і дном зони провідності для закидання електронів при цій температурі з заповнених рівнів у *c*-зону.

На основі експериментальних результатів виявлено, що на відміну від n -Ge залежності $\rho_X/\rho_0 = f(X)$ для γ -опроміненого n -Si не виходять на насичення (крім вихідних) при $T=77\text{ K}$, а проходять через максимум з наступним зменшенням $\rho = f(X)$. Такий хід залежностей пояснюється тим, що п'єзоопір в опроміненних зразках з глибокими рівнями зумовлений не одним лише деформаційним перерозподілом носіїв заряду між долинами c -зони, які опускаються і піднімаються (що веде до росту $\rho = f(X)$), але і збільшенням концентрації носіїв заряду в долинах через зменшення з деформацією величини енергетичної щільності між глибоким рівнем $(E_C-0,17)\text{ eV}$ і долинами (що призводить до спаду $\rho = f(X)$). Зазначимо, що в n -Si (на відміну від n -Ge) здійснюється достатня зміна енергетичної щільності між рівнем $(E_C-0,17)\text{ eV}$ і дном c -зони, що необхідна для закидання носіїв заряду при $T=77\text{ K}$ із заповнених рівнів у c -зону.

Встановлено, що після γ -опромінення для зразків n -Ge і n -Si обох груп характерне зменшення холлівської рухливості носіїв заряду із збільшенням дози опромінення. Особливо істотні ці зміни у зразках I групи, в яких вузькі області більш сильної компенсації розташовані перпендикулярно до напрямку струму, що призводить до такого зростання питомого опору, коли вимірювання при $T=77\text{ K}$ після опромінення великими дозами стають складними. Враховуючи вихідну концентрацію домішки у зразках і розподілу її по шарах, з результатів вимірів встановлено, що вплив радіації на рухливість носіїв заряду і хід залежностей $\rho = f(X)$ в n -Ge і n -Si з періодичним розподілом легуючої домішки стає істотним при дозах $8 \cdot 10^{16} \text{ } \mu\text{кв/см}^2$ для n -Ge і $1,25 \cdot 10^{17} \text{ } \mu\text{кв/см}^2$ для n -Si, коли концентрація радіаційних дефектів приблизно рівна мінімальній концентрації легуючої домішки у шарах.

Виявлено можливість керування впливом ШПН на кінетичні ефекти у зразках n -Ge та n -Si використанням γ -опромінення та наступною дією освітлення різної інтенсивності. На рис.1 наведено результати вимірювань при $T=77\text{ K}$ поздовжнього п'єзоопору $X/J/[111]$, γ -опроміненого n -Ge дозою $1,1 \cdot 10^{17} \text{ } \mu\text{кв/см}^2$ з різними рівнями підсвітки (ρ_T/ρ_{II}), де ρ_T і ρ_{II} - значення питомого опору у темряві і при освітленні.

Як видно, для всіх залежностей $\rho = f(X)$ (рис.1) є характерним нелінійне зростання питомого опору із збільшенням механічних напружень з наступним виходом на насичення (ρ_∞). І якщо для вихідних зразків (залежність 1) ρ_∞/ρ_0 рівне 10 (де ρ_0 - значення питомого опору при $X=0$), то після опромінення (залежність 2), внаслідок зростання амплітуди ШПН за рахунок появи і деіонізації радіаційних дефектів, відношення ρ_∞/ρ_0 складає 5,5. При різних інтенсивностях освітлення опромінені

зразків відношення ρ_{∞}/ρ_0 зростає (залежність 3) і може значно перевищувати ці значення у вихідних зразках (залежності 4, 5).

Нелінійний хід залежностей поздовжнього п'єзоопору для цього напрямку пояснюється переселенням носіїв заряду (які мають більшу рухливість) з трьох долин зони провідності, що піднімаються за шкалою енергій при одновісному стиску вздовж [111], в одну долину (де носії заряду мають меншу рухливість), що опускається.

На рис.2 наведено залежності $\rho=f(X)$ γ -опроміненого n -Si дозою $1,6 \cdot 10^{17} \text{ гкв/см}^2$ для випадку $X//J//[100]$, одержані при $T=77 \text{ K}$ та різних інтенсивностях освітлення. Як видно з рисунка, на відміну від n -Ge, залежності $\rho=f(X)$ не виходять на насичення, а після проходження через максимум питомий опір зразків зменшується із збільшенням механічних напружень. Такий хід залежностей пояснюється одночасною дією двох основних причин, відповідальних за наявність п'єзоопору в n -Si для цього напрямку: переселенням носіїв заряду (що мають більшу

Рис.1. Залежності $\rho_X/\rho_0=f(X)$ для n -Ge ($T=77 \text{ K}$) при різних рівнях підсвітки, ρ_T/ρ_{II} : 1- для вихідних зразків; 2-1; 3-2; 4-3; 5-5.

Рис.2. Залежності $\rho_X/\rho_0=f(X)$ для n -Si ($T=77 \text{ K}$) при різних рівнях підсвітки, ρ_T/ρ_{II} : 1-1; 2-1,5; 3-2,5; 4-3,5; 5-4,5.

рухливість $\mu_{\perp}$) з чотирьох долин, що піднімаються у шкалі енергій при одновісному стиску вздовж [100], у дві долини (де носії заряду мають меншу рухливість $\mu_{//}$), що опускаються, і це призводить до росту залежності $\rho=f(X)$ з подальшим виходом на насичення при $n=const$ у c -зоні; збільшенням концентрації електронів у c -зоні через зменшення зі стиском енергетичної щільності між дном зони провідності і енергетичним рівнем радіаційних дефектів $(E_C-0,17)eB$, які виникають в результаті

γ -опромінення n -Si, що і веде до спаду залежності $\rho=f(X)$. Із збільшенням інтенсивності освітлення вплив другої причини поступово зменшується, бо значна частина носіїв заряду переходить з глибоких енергетичних рівнів у c -зону під дією світла. Слід відмітити, що у випадку n -Si після γ -опромінення при різних величинах підсвітки значення ρ_{max}/ρ_0 не перевищують вихідного значення $\rho_{\infty}/\rho_0=4$ до опромінення.

З експериментально виміряних залежностей п'єзоопору, а також значень середньої концентрації та холлівської рухливості носіїв заряду випливає, що із збільшенням інтенсивності світла і механічної деформації амплітуда потенціального рельєфу буде зменшуватися через збільшення концентрації екрануючих носіїв заряду, зумовленої як фотоіонізацією рівнів радіаційних дефектів $(E_C-0,2)eV$ в n -Ge та $(E_C-0,17)eV$ в n -Si, так і зменшенням з деформацією енергетичної щільності між цими рівнями і дном зони провідності:

$$\delta = \frac{e^2 \cdot N_t^{\frac{2}{3}}}{\chi \cdot \eta_{кр}^{\frac{1}{3}}}, \quad (1)$$

де χ - діелектрична проникливість, $\eta_{кр}$ і N_t - відповідно концентрації екрануючих носіїв заряду і заряджених дефектів.

Представлені оригінальні експериментальні результати по дослідженню зміни параметра анізотропії рухливості K в n -Ge, а зокрема залежність складових $\mu_{\perp}$ і $\mu_{\parallel}$ рухливості від дози γ -опромінення Φ і інтенсивності освітлення. Вимірювалися дві групи зразків (як було описано вище) вздовж кристалографічного напрямку [111]. З результатів вимірювань при температурі $T=77$ K в інтервалі механічних напружень $0 \div 8000$ $\kappa\Gamma/\text{см}^2$ поздовжнього п'єзоопору та п'єзо-холл-ефекту у вихідному стані та після опромінення Co^{60} різними дозами виявлено зниження параметра анізотропії рухливості, який обчислювався згідно з

$$K = \frac{\mu_{\perp}}{\mu_{\parallel}} = \frac{3}{2} \frac{\rho_{\infty}^{[111]}}{\rho_0} - \frac{1}{2}, \quad (2)$$

де ρ_0 - питомий опір при $X=0$; $\rho_{\infty}^{[111]}$ - питомий опір при $X=8000$ $\kappa\Gamma/\text{см}^2$, коли п'єзоопір виходить на насичення.

При деформаціях, які забезпечують повне переселення носіїв заряду у мінімуми енергії, поздовжня та поперечна компоненти рухливості визначалися:

$$\mu_{\parallel} = \frac{1}{en_e \rho_{\infty}^{[111]}}, \quad \mu_{\perp} = K \mu_{\parallel}. \quad (3)$$

За експериментальними даними та використовуючи співвідношення (3) побудовано залежності $\mu_{\perp}=f(\Phi)$ і $\mu_{//}=f(\Phi)$ (рис.3) для двох груп зразків. Результати вимірювань показують, що компонента рухливості $\mu_{//}$ (криві 1 та 1') практично не залежить від дози опромінення для зразків різних груп на відміну від $\mu_{\perp}$ (криві 2 та 2').

Виявлено також, що в зразках $n-Ge$ з вихідним значенням $\rho_{300K}=42 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ після γ -опромінення дозою $1,1 \cdot 10^{17} \text{ } \mu\text{Кв}/\text{см}^2$ із збільшенням інтенсивності світла зростає значення параметра анізотропії рухливості K .

Рис. 3. Дозові залежності $\mu_{//}=f(\Phi)$ та $\mu_{\perp}=f(\Phi)$ в $n-Ge$: а - для зразків I групи; б - для зразків II групи.

На рис.4 зображено залежності компонент рухливості $\mu_{//}$ (криві 1 та 1') та $\mu_{\perp}$ (криві 2 та 2') від рівня підсвітки ρ_T/ρ_{II} (де ρ_T і ρ_{II} - значення питомого опору в темряві і при освітленні) для зразків, по-різному орієнтованих до шарів росту. На залежностях

$$\mu_{\square} = f\left(\frac{\rho_T}{\rho_{II}}\right) \text{ (криві 1 та 1')} \text{ для зразків обох груп спостерігається майже незмінність}$$

компоненти $\mu_{//}$ від інтенсивності світла на відміну від компоненти $\mu_{\perp}$, яка різко зростає при збільшенні інтенсивності світла (криві 2 та 2').

Безпосередньо з означення параметра анізотропії

$$K = \frac{\mu_{\perp}}{\mu_{\square}} = \frac{K_m}{K_{\tau}} = \frac{m_{\square}}{m_{\perp}} \cdot \frac{\tau_{\perp}}{\tau_{\square}}, \quad (4)$$

і незалежності $\mu_{//}$ від дози опромінення та інтенсивності світла (при $K_m = m_{//}/m_{\perp} = \text{const}$) випливає, що одержана зміна $\mu_{\perp}$ при таких фізико-активних

Рис. 4. Залежності $\mu_{\parallel} = f(\frac{\rho_T}{\rho_{II}})$ та $\mu_{\perp} = f(\frac{\rho_T}{\rho_{II}})$ при $T=77\text{ K}$ в $n\text{-Ge}$: а – для зразків I групи; б – для зразків II групи.

впливах визначається зміною параметра анізотропії часів релаксації $K_{\tau} = \tau_{\parallel}/\tau_{\perp}$, оскільки $\mu_{\perp}K_{\tau} = \mu_{\parallel}K_m = \text{const}$. Більш відчутні зміни $\mu_{\perp}$ спостерігаються для зразків I групи, в яких вузькі області сильнішої компенсації розташовані перпендикулярно до напрямку струму і механічного напруження, що зумовлено збільшенням амплітуди ШПН до освітлення внаслідок захоплення носіїв заряду із зони провідності на глибокі рівні радіаційних дефектів.

У **четвертому розділі** розглянуто особливості п'єзоопору $n\text{-Ge}$ в температурному інтервалі $290 \div 380\text{ K}$. Показано, що хід кривих п'єзоопору для кристалографічних напрямків $\langle 111 \rangle$ та $\langle 110 \rangle$ при $T=290\text{ K}$ пояснюється двома основними механізмами, а саме - переселенням носіїв заряду між однотипними L -долинами c -зони, що веде до зростання питомого опору під дією деформації з подальшим проходженням через максимум; збільшенням загальної концентрації носіїв заряду внаслідок зменшення ширини забороненої зони з одночасним тиском, що зумовлює спад $\rho = f(X)$. В $n\text{-Ge}$, крім L -мінімумів зони провідності, які орієнтовані вздовж еквівалентних напрямків $\langle 111 \rangle$, в напрямках $\langle 100 \rangle$ міститься шість Δ -мінімумів. За відсутності деформації ці мінімуми розміщені на $0,18\text{ eV}$ вище абсолютних мінімумів і тому в рівноважних умовах не вносять вкладу в явища переносу, але при достатньо помітному зменшенні величини енергетичної щільності між L - і Δ -долинами з прикладанням одноосісних напружень можливе закидання носіїв заряду в мінімуми типу $\langle 100 \rangle$, що призводить до нового ефекту п'єзоопору.

При підвищенні температури для випадку $X \parallel J \parallel [111]$ спостерігається зниження максимумів залежностей $\rho_X/\rho_0 = f(X)$, тому що постійно зростає внесок другого вищезгаданого механізму. Виявлено, що для механічних навантажень

$X > 8000 \text{ кГ/см}^2$ величина питомого опору починає зростати, що не можна пояснити дією лише двох наведених механізмів. Враховуючи структуру зони провідності германію, такий хід залежностей пояснюється переходом носіїв заряду з L - в Δ -долини внаслідок зменшення з деформацією енергетичної щільності між ними. Для випадку $X // J // [100]$ при температурі $T \geq 320 \text{ K}$ незначне зростання питомого опору при малих тисках супроводжується переходами носіїв заряду між L - та Δ -долинами з подальшим спадом внаслідок дії другого механізму. Як і у випадку $X // J // [111]$ для великих тисків зростання $\rho_X / \rho_0 = f(X)$ при підвищенні температури також пов'язане із деформаційним зменшенням енергетичної щільності між чотирма L - та двома Δ -долинами. За умови $X // J // [110]$, коли $X \perp [100]$, відсутнє відносне зміщення Δ -долин, і в цьому випадку наявність п'єзоопору пояснюється дією лише двох вищезгадуваних механізмів.

Визначено величину деформаційних змін енергетичної щільності $\delta(\Delta E)$ між дном c -зони та глибоким рівнем $(E_C - 0,17) \text{ eV}$ (A -центр) в γ -опромінену n - Si дозою $6,3 \cdot 10^{16} \text{ гКв/см}^2$ для кристалографічних напрямків $[110]$ та $[111]$ в широкому діапазоні механічних напружень $(0 \div 12) \cdot 10^3 \text{ кГ/см}^2$. Для визначення $\delta(\Delta E)$ залежності $\rho_X / \rho_0 = f(X)$ наведені як $\frac{\Delta \rho}{\rho_0} = \frac{\rho_X - \rho_0}{\rho_0} = f(X)$ (рис.5). Кривими 1 та 2

представлено результати $\Delta \rho / \rho_0 = f(X)$, одержані при $T = 125 \text{ K}$ на вихідних зразках для випадків $X // J // [110]$ та $X // J // [111]$, а кривими 1', 2' - аналогічні залежності для тих же зразків після γ -опромінення.

Безпосередній внесок $\delta(\Delta E)$ у зміну ρ при збільшенні X , що визначається залежністю загальної концентрації носіїв заряду в c -зоні від X , показано на рис.5 кривими 1" і 2", які одержані в результаті співставлення значень даних $(1 - 1')$ і $(2 - 2')$. Представивши криві 1" і 2" в напівлогарифмічному масштабі (рис.6), за нахилом прямолінійних відрізків $\lg \rho = f(X)$ визначено величину деформаційної зміни енергетичної щільності $\delta(\Delta E)$ між рівнем $(E_C - 0,17) \text{ eV}$ і мінімумами c -зони згідно з

$$\delta(\Delta E) = \frac{2,3(\Delta \lg \rho) \cdot \alpha \cdot kT}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot \Delta X} (\text{eV}), \quad (5)$$

де α - коефіцієнт, який змінюється від 1 до 2 залежно від ступеня заповнення рівня.

Величина $\delta(\Delta E)$ для випадку $X // J // [110]$ у розрахунку на кожні 1000 кГ/см^2 становить $1,36 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$, а при $X // J // [111]$ - $0,84 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$ відповідно.

Рис.5. Залежності $\Delta\rho/\rho_0=f(X)$ в n -Si при $T = 125$ К для випадку: 1, 1', 1'' - [110]; 2, 2', 2'' - [111].

Рис.6. Залежності $\lg \rho=f(X)$ n -Si при $T = 125$ К для умов: 1'' - $X//[110]$; 2'' - $X//[111]$.

Досліджено залежності положення рівня Фермі від температури: 1) в n -Ge з глибоким енергетичним рівнем $(E_C-0,2)eV$, який утворювався в забороненій зоні внаслідок γ -опромінення дозою $1,22 \cdot 10^{17} \text{ } \mu\text{B}/\text{cm}^2$; 2) в Ge, опроміненому дозою $1,34 \cdot 10^{18} \text{ } \mu\text{B}/\text{cm}^2$ після $n \rightarrow p$ -конверсії, коли проявляється рівень $(E_V+0,27)eV$; 3) в легованому n -Ge домішкою Au з рівнем $(E_C-0,2)eV$; 4) в n -Ge(Au) після γ -опромінення дозою $2,4 \cdot 10^{18} \text{ } \mu\text{B}/\text{cm}^2$. При розрахунках враховувалась температурна залежність зміни ширини забороненої зони германію та температурна залежність енергії активації глибокого рівня.

Для першого випадку рівень Фермі E_f з підвищенням температури опускається від глибокого рівня $(E_C-0,2)eV$ до середини забороненої зони, перетинає її і далі поводить себе, як у власному напівпровіднику. В другому випадку при зростанні температури E_f піднімається від глибокого рівня $(E_V+0,27)eV$ до середини забороненої зони. При подальшому зростанні температури рівень Фермі поводить себе, як в області власної провідності. Для третього і четвертого випадку E_f при збільшенні температури опускається в обох випадках від глибокого рівня $(E_C-0,2)eV$ до середини забороненої зони, перетинає її і при подальшому зростанні температури поводить себе, як у власному напівпровіднику. Перехід n -Ge при високих температурах в область власної провідності для цього випадку спостерігається і на температурних залежностях концентрації носіїв заряду. У представлених вище результатах не спостерігаються

аномальні температурні залежності концентрації носіїв заряду та положення рівня Фермі, як в [1-2], оскільки досліджувані глибокі енергетичні рівні знаходяться приблизно у півтора рази ближче до країв зони провідності і валентної зони відповідно, ніж у наведених роботах, де глибокі рівні розміщені близько середини забороненої зони.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

На основі результатів досліджень і аналізу впливу технологічних та радіаційних дефектів на явища переносу в багатодолинних напівпровідниках n -Ge та n -Si, що визначили зміст дисертаційної роботи, можна сформулювати наступні висновки:

1. Показано, що анізотропія електрофізичних властивостей у γ -опромінених монокристалах n -Ge і n -Si виникає внаслідок зростання амплітуди крупномасштабного рельєфу, пов'язаного з наявністю ШПН. На основі вимірювань поздовжнього п'єзоопору та п'єзо-холл-ефекту встановлено, що при дозах $8 \cdot 10^{16} \text{ } \mu\text{Кв/см}^2$ для n -Ge ($n_e = 2,6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$) і $1,25 \cdot 10^{17} \text{ } \mu\text{Кв/см}^2$ для n -Si ($n_e = 1,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$) опромінення суттєво впливає на рухливість носіїв заряду.

2. Виявлено, що при збільшенні інтенсивності світла і механічної деформації амплітуда потенціального рельєфу зменшується через збільшення концентрації екрануючих носіїв заряду, зумовленої як фотоіонізацією рівнів радіаційних дефектів ($E_C - 0,2$) eV в n -Ge та ($E_C - 0,17$) eV в n -Si, так і зменшенням з деформацією енергетичної щільності між цими рівнями і дном зони провідності. Експериментально встановлено якісно відмінний хід залежностей поздовжнього п'єзоопору для n -Ge і n -Si при різних інтенсивностях освітлення.

3. На основі експериментальних вимірювань та теоретичних розрахунків вперше виявлено, що в n -Ge компонента рухливості $\mu_{//}$ в окремо взятому ізоенергетичному еліпсоїді практично не залежить від дози γ -опромінення і інтенсивності освітлення. Істотна зміна компоненти рухливості $\mu_{\perp}$ при збільшенні дози опромінення та інтенсивності світла визначається зміною параметра анізотропії часів релаксації K_{τ} .

4. Встановлено, що в n -Ge при температурах $290 \div 380 \text{ K}$ зміна питомого опору від механічного навантаження пояснюється впливом Δ -долин зони провідності на характер перерозподілу носіїв заряду в зоні провідності.

5. Визначено в широкому діапазоні механічних напружень у γ -опроміненому n -Si при $T = 125 \text{ K}$ величину деформаційних змін енергетичної щільності $\delta(\Delta E)$ між глибоким рівнем ($E_C - 0,17$) eV і дном зони провідності для кристалографічних напрямків $[110]$ і $[111]$. Проведені обчислення показали, що величина $\delta(\Delta E)$ при умові $X//J//[110]$ становить $1,36 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$ у розрахунку на кожні $1000 \text{ } \mu\text{Г/см}^2$, а при $X//J//[111]$ відповідно $0,84 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$.

6. Описано характер зміни температурної залежності положення рівня Фермі в монокристалах германію різного типу провідності при наявності в забороненій зоні глибоких енергетичних рівнів. Виявлено, що для n -Ge з глибоким енергетичним рівнем $(E_C-0,2)eV$ радіаційного і технологічного походження та Ge після $n \rightarrow p$ -конверсії з глибоким енергетичним рівнем $E_V+0,27eV$ не спостерігаються аномальні температурні залежності концентрації носіїв заряду та положення рівня Фермі як в [1,2], оскільки досліджувані глибокі енергетичні рівні знаходяться приблизно у півтора рази ближче до країв зони провідності і валентної зони відповідно, ніж у наведених роботах, де глибокі рівні розміщені близько середини забороненої зони.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

I. Статті:

1. Федосов А.В., Федосов С.А., Хвищун М.В., Захарчук Д.А. Особливості п'єзоопору германію в області власної провідності // Науковий вісник Волинського державного університету імені Лесі Українки. Фізичні науки. – Луцьк: Волинський державний університет імені Лесі Українки. – 2001. – №7. – С.26-30.

Дисертант виконував підготовку досліджуваних зразків та проводив експериментальні вимірювання холлівських параметрів та температурних залежностей п'єзоопору.

2. Хвищун М., Федосов С., Захарчук Д. Особливості п'єзоопору Ge при наявності глибоких рівнів та в області власної провідності // Вісник Львівського університету. Серія фізична. – Львів: Львівський національний університет імені Івана Франка. – 2001. – №34. – С.85-93.

Дисертант проводив експеримент по вимірюванню електричних параметрів та брав участь в обговоренні результатів.

3. Федосов А.В., Хвищун М.В., Федосов С.А., Коровицький А.М., Захарчук Д.А. Визначення зміни глибини залягання електрично активного рівня у γ -опроміненому n -Si при одновісній пружній деформації // Науковий вісник Волинського державного університету імені Лесі Українки. Фізичні науки. – Луцьк: Волинський державний університет ім. Лесі Українки. – 2003. – №11. – С.11-16.

Дисертант проводив експериментальні вимірювання електричних параметрів вихідних та опромінених зразків і виконував теоретичні розрахунки.

4. Федосов А.В., Захарчук Д.А., Хвищун М.В., Федосов С.А. Розрахунок величини зміщення рівнів радіаційних дефектів у γ -опромінених монокристалах n -Si // Науковий журнал „Нові технології”. – 2004. – № 1-2 (4-5). – С. 16-18.

Дисертант виконував експеримент та розрахунок деформаційної зміни величини енергетичної щільності між глибоким рівнем та дном зони провідності.

5. Федосов А.В., Ящинский Л.В., Федосов С.А., Захарчук Д.А., Хвищун Н.В. Влияние слоистых периодических неоднородностей на пьезосопротивление γ -

облученных монокристаллов $n-Si$ и $n-Ge$ // Наукоемкие технологии. – 2004. – Т.5, №6. – С.27-31.

Дисертант виконував експериментальні вимірювання п'єзоопору та п'єзо-холл-ефекту при різних дозах опромінення та інтенсивностях освітлення і брав участь в обговоренні результатів.

6. Хвищун М., Захарчук Д., Федосов С., Ящинський Л., Коровицький А., Коваль Ю. Особливості впливу ізовалентної домішки германію на неоднорідність питомого опору у кристалах кремнію // Вісник Львівського університету. Серія фізична. – Львів: Львівський національний університет імені Івана Франка. – 2004. – №37. – С.140-145.

Дисертант виконував експериментальні вимірювання і розрахунки електричних параметрів.

7. Федосов А.В., Захарчук Д.А., Хвищун М.В., Тимошук В.С. Визначення величини зміщення рівня $(E_C - 0,17)eV$ радіаційного походження в монокристалах $n-Si$ // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник, Луцьк. – 2003. – С. 363-368.

Дисертант проводив експериментальні вимірювання та виконував розрахунок величини деформаційного зміщення рівнів радіаційних дефектів.

II. Матеріали наукових конференцій:

8. Хвищун М.В., Федосов С.А., Захарчук Д.А. Особливості п'єзоопору Ge при наявності глибоких рівнів та в області власної провідності // Тези доповідей Міжнародної конференції молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики „Евріка-2001”. – Львів: Львівський національний університет імені Івана Франка. – 2001. – С.150.

9. Федосов А.В., Хвищун М.В., Захарчук Д.А. Вплив електрично пасивних домішок на механічну міцність монокристалів кремнію// Тези першого наукового симпозиуму “Сучасні проблеми інженерної механіки”. – Луцьк: ТЗОВ „Ковельська міська друкарня”. – 2000. – С.31.

10. Хвищун М.В., Федосов С.А., Захарчук Д.А., Коровицький А.М. Особливості утворення термодонорів у кристалах $n-Si < Ge >$ // Збірник тез Всеукраїнської конференції молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики “Евріка-2002”. – Львів: Львівський національний університет імені Івана Франка. – 2002. – С.15-16.

11. Хвищун М.В., Захарчук Д.А., Федосов С.А., Ящинський Л.В., Коваль Ю.В. Особливості впливу ізовалентної домішки германію на неоднорідність питомого опору в кристалах кремнію // Збірник тез Всеукраїнської конференції молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики “Евріка-2002”. – Львів: Львівський національний університет імені Івана Франка. – 2002. – С.19-20.

12. Федосов А.В., Захарчук Д.А., Федосов С.А., Ящинський Л.В. Особливості п'єзоопору γ -опромінених монокристалів $n-Ge$ та $n-Si$ при освітленні // Тези доповідей 1-ої Української конференції з фізики напівпровідників УНКФН-1 (з міжнародною участю). – Одеса: Одеський національний університет. – 2002. – Т.2. – С.87.

13. Федосов А.В., Яшинский Л.В., Федосов С.А., Захарчук Д.А., Хвищун Н.В. Влияние слоистых периодических неоднородностей на пьезосопротивление γ -облучённых монокристаллов n -Si и n -Ge // Материалы Международной конференции „Физика электронных материалов”. – Калуга, Россия: КГПУ им. К.Э. Циолковского. – 2002. – С. 148-149.

14. Федосов А.В., Захарчук Д.А., Федосов С.А., Хвищун М.В., Коваль Ю.В. Оцінка величини зміщення рівнів радіаційних дефектів у γ -опромінених Ge і Si при одновісному стиску // Тези доповідей IV Міжнародної школи-конференції „Актуальні проблеми фізики напівпровідників”. – Дрогобич: Видавництво НВЦ „Каменярь”. – 2003. – С. 184-185.

15. Федосов А.В., Захарчук Д.А., Хвищун М.В., Федосов С.А. Розрахунок величини зміщення рівнів радіаційних дефектів у γ -опромінених монокристалах n -Si. // Тези доповідей I науково-технічної конференції з міжнародного участю „Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології”. – Кременчук: Інститут економіки та нових технологій. – 2004. – С. 41-42.

16. Захарчук Д., Хвищун М., Семенченко Р. Вплив дози γ -опромінення та підсвіткі на зміну параметра анізотропії рухливості в n -Ge // Збірник тез Міжнародної конференції молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики “Евріка-2004”. – Львів: Львівський національний університет імені Івана Франка. – 2004. – С.66-67.

17. Захарчук Д., Федосов А., Федосов С. Температурні залежності положення рівня Фермі в германії при наявності глибоких енергетичних рівнів // Тези доповідей X Міжнародного семінару з фізики та хімії твердого тіла. – Львів: Львівський національний університет імені Івана Франка. – 2004. – С.84.

18. Федосов А.В., Захарчук Д.А. Особенности изменения параметра анизотропии подвижности n -Ge от дозы γ -облучения и подсветки // Труды XIV Международного совещания „Радиационная физика твердого тела”. – Севастополь. – 2004. – С.221-225.

19. Захарчук Д.А., Федосов А.В., Хвищун М.В., Семенченко Р.М. Вплив технологічних та радіаційних дефектів на явища переносу в германії // Тези доповідей II Української наукової конференції з фізики напівпровідників (за участю зарубіжних науковців). – Чернівці: Чернівецький національний університет імені Ю. Федьковича. – 2004. – Т.1. – С. 152.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Витовский Н.А., Машовец Т.В. Аномальный ход температурной зависимости коэффициента Холла в сильнокомпенсированных полупроводниках // ФТП.-1969.-Т.3, №2.- С. 280-281.

2. Карась Н.И. Глубокие уровни и аномальные температурные зависимости концентрации носителей заряда // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. -1996. Вып. 31.- С. 28-34.

АНОТАЦІЯ

Захарчук Д.А. Вплив технологічних та радіаційних дефектів на явища переносу в багатодолинних напівпровідниках *n-Ge* та *n-Si*. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико–математичних наук за спеціальністю 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків. – Волинський державний університет імені Лесі Українки, Луцьк, 2004.

З використанням методів вимірювання поздовжнього п'єзоопору та п'єзо-холл-ефекту в монокристалах германію та кремнію з періодичним розподілом легуючої домішки досліджено вплив ШПН при різних дозах γ -опромінення та інтенсивностях світла на анізотропію електрофізичних величин. Вперше отримано для *n-Ge* залежності поздовжньої $\mu_{//}$ і поперечної $\mu_{\perp}$ складових рухливості в окремо взятому ізоенергетичному еліпсоїді від дози γ -опромінення та інтенсивності світла. Встановлено незалежність $\mu_{//}$ від даних фізико-активних впливів. Показано, що зміна компоненти рухливості $\mu_{\perp}$ при збільшенні дози опромінення та інтенсивності світла визначається зміною параметра анізотропії часів релаксації K_{τ} .

Встановлено вплив Δ -долин зони провідності на характер перерозподілу носіїв заряду в *c*-зоні для *n-Ge* в температурному інтервалі $290 \div 380$ K при сильних одноосісних деформаціях.

Обчислено в γ -опромінену *n-Si* при $T = 125$ K величину деформаційних змін енергетичної щільності $\delta(\Delta E)$ між глибоким рівнем $(E_c - 0,17) \text{ eV}$ і дном зони провідності в широкому діапазоні механічних напружень для кристалографічних напрямків $[110]$ і $[111]$.

Досліджено характер зміни температурної залежності положення рівня Фермі в монокристалах германію *n*-та *p*-типу провідності при наявності в забороненій зоні глибоких енергетичних рівнів

Ключові слова: п'єзоопір, анізотропія, опромінення, ізоенергетичний еліпсоїд, рівень Фермі.

АННОТАЦИЯ

Захарчук Д.А. Влияние технологических и радиационных дефектов на явления переноса в многодолинных полупроводниках *n-Ge* и *n-Si*. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников и диэлектриков. – Волинский государственный университет имени Леси Украинки, Луцк, 2004.

При использовании методов измерения продольного пьезосопротивления и пьезо-холл-эффекта на монокристаллах германия и кремния с периодическим распределением легирующей примеси исследовано влияние слоистых периодических неоднородностей (СПН) на анизотропию электрофизических характеристик. Экспериментально установлено, что дозы γ -облучения $8 \cdot 10^{16} \text{ жв/см}^2$ для *n-Ge* ($n_e = 2,6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$) и $1,25 \cdot 10^{17} \text{ жв/см}^2$ для *n-Si* ($n_e = 1,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$) при наличии СПН в их объеме существенно влияют на подвижность носителей заряда.

Исследовано влияние СПН при разных интенсивностях освещения на пьезосопротивление γ -облученных монокристаллов *n-Ge* и *n-Si*. Экспериментально

установлено качественно различный ход зависимостей продольного пьезосопротивления для германия и кремния n -типа при разных интенсивностях подсветки. Показано, что при увеличении интенсивности освещения и механической деформации амплитуда потенциального рельефа уменьшается вследствие увеличения концентрации экранирующих носителей заряда, что обусловлено как фотоионизацией глубоких уровней радиационных дефектов $(E_C-0,2)eV$ в $n-Ge$ и $(E_C-0,17)eV$ в $n-Si$, так и уменьшением с деформацией энергетического зазора между этими уровнями и дном зоны проводимости.

На основании экспериментальных исследований и теоретических расчетов впервые определена зависимость параметра анизотропии подвижности, а также продольной $\mu_{||}$ и поперечной $\mu_{\perp}$ компонент подвижности в отдельно взятом изоэнергетическом эллипсоиде от дозы γ -облучения и интенсивности освещения. Показано, что компонента $\mu_{||}$ практически не зависит от дозы облучения и интенсивности освещения, в отличие от $\mu_{\perp}$, которая резко изменяется при выше упомянутых физико-активных влияниях. Изменение поперечной компоненты подвижности $\mu_{\perp}$ под влиянием радиации и света определяется изменением параметра анизотропии времен релаксации K_T .

Исследовано продольное пьезосопротивление в $n-Ge$ в температурном интервале $77-380\text{ K}$ для всех кристаллографических направлений и показано, что при температурах $T > 290\text{ K}$ нужно учитывать влияние Δ -долин зоны проводимости на характер перераспределения носителей заряда в c -зоне.

Определено в широком диапазоне механических напряжений в γ -облученном $n-Si$ при $T=125\text{ K}$ величину деформационных изменений энергетического зазора $\delta(E)$ между глубоким уровнем $(E_C-0,17)eV$ и дном зоны проводимости для кристаллографических направлений $[110]$ и $[111]$. Проведенные расчеты показали, что величина $\delta(E)$ при условии $X/J/[110]$ составляет $1,36 \cdot 10^{-3}eV$ на каждые 1000 KГ/см^2 , а при $X/J/[111]$ - $0,84 \cdot 10^{-3}eV$ соответственно.

Описан характер изменения температурной зависимости положения уровня Ферми в облученных монокристаллах германия разного типа проводимости при наличии в запрещенной зоне глубоких энергетических уровней. Выявлено, что для $n-Ge$ с глубоким энергетическим уровнем $(E_C-0,2)eV$ радиационного и технологического происхождения и Ge после $n \rightarrow p$ -конверсии с глубоким энергетическим уровнем $E_V+0,27eV$ не наблюдаются аномальные температурные зависимости концентрации носителей заряда и положения уровня Ферми, как в работах других авторов, поскольку исследуемые глубокие энергетические уровни находятся приблизительно в полтора раза ближе к краям зоны проводимости и валентной зоны соответственно чем в приведенных работах, где глубокие уровни размещены около середины запрещенной зоны.

ANNOTATION

Zakharchuk D.A. Influence of technological and radiation defects on the phenomena of transfer in many-valley semiconductors $n-Ge$ and $n-Si$. – Manuscript.

Thesis for the scientific degree of candidate of the physics-mathematical sciences. Specialty 01.04.10 – semiconductors and dielectric physics. Lesia Ukrainka Volyn State University, Lutsk, 2004.

With the use of methods of longitudinal piezoresistance and piezo-hall-effect in monocrystals of the germanium and silicon with the periodic distribution of alloying admixture the stratified periodic heterogeneity influence at the different doses of γ -irradiation and light intensities on anisotropy of electro-physical sizes is explored. First it is got for n -Ge dependence of longitudinal $\mu_{||}$ and transversal $\mu_{\perp}$ constituents of mobility in the separately taken isoenergetic ellipsoid from dose of γ -irradiation and light intensity. An independence of $\mu_{||}$ from the given physic active influence is set. It is shown, that change mobility $\mu_{\perp}$ components in case of increase of dose of γ -irradiation and light intensity is determined by the change of parameter of anisotropy of times of relaxation K_r .

An influence of Δ -conductivity area valleys on nature of redistribution of charge transmitters in c -zone is set for n -Ge in the temperature interval $290 \div 380$ K in case of uniaxial elastic deformation.

It is calculated in exposed n -Si to γ -irradiation at $T=125$ K size of deformation changes of power crack $\chi(\Delta E)$ between the deep level $(E_C - 0,17) eB$ and conductivity zone bottom in the wide range of mechanical tensions for the crystallographic directions [110] and [111].

A nature of change of temperature dependence of level position Fermi in single crystals germanium n - and p -conductivity type at presence of deep power levels in the restricted area is explored

Keywords: piezoresistance, anisotropy, irradiation, ellipsoid, Fermi level.

Підписано до друку 3.02.2005 р.
Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.
Друк на різнографі. Ум.друк.арк. 0,75.
Тираж 100 прим. Зам.838.

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