

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
ВОЛИНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
і м. ЛЕСІ УКРАЇНКИ

На правах рукопису

ЯЦІНСЬКИЙ
Леонід Васильович

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИЧНИХ ЕФЕКТІВ В БАГАТОДОЛИННИХ
НАПІВПРОВІДНИКАХ ПРИ ПРУЖНІЙ ДЕФОРМАЦІЇ

01.04.10 – Фізика напівпровідників і діелектриків

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук



Луцьк-1997



Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Луцькому

Науковий керівник - доктор фізико-математичних наук,
професор Федосов А.В.

Офіційні опоненти: -доктор фізико-математичних наук,
професор Баранський П.І.
-кандидат фізико-математичних наук,
доцент Доскоч В.П.

Провідна організація - Чернівецький державний університет
ім. Ю.Федьковича.

Захист відбудеться " 7 " червня 1997 р. на засіданні
спеціалізованої вченої ради К 35.02.01 при Волинському
державному університеті ім. Лесі Українки. (263009, м.Луцьк,
проспект Волі, 13). *0 12⁰⁰ години*

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Волинського
державного університету (м.Луцьк, проспект Волі, 13).

Автореферат розіслано "6" травня 1997 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Божко В.В.

АВ 37-747

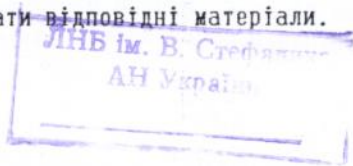
ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ. Сучасний науково - технічний прогрес забезпечує такий рівень розвитку технології розробки нових приладів, що час між виникненням ідеї при дослідженнях і її втіленням у промисловій розробки стрімко скорочується. В значній мірі це забезпечується високим рівнем розвитку фізики напівпровідників.

На протязі останніх десятиріч одним з основних матеріалів, який широко використовується в напівпровідниковій електроніці, є кремній. Напівпровідникові прилади на основі кремнію сьогодні використовуються для вирішення найрізноманітніших наукових та народногосподарських завдань. Це і сонячні батареї, і великі інтегральні схеми, силові та високочастотні діоди, транзистори різноманітного призначення, тензодатчики, фотодіоди та фотоелементи, приймачі та перетворювачі енергії радіоактивного випромінювання. Це і обумовлює неспадячу зацікавленість дослідників до кремнію. Фундаментальні дослідження електрофізичних властивостей кремнію виявилися особливо ефективними в комплексі з більш вивченим модельним напівпровідником - германієм.

Необхідність використання напівпровідникових приладів у різних, часто екстремальних умовах, таких як швидкозмінні температурні режими, значні механічні навантаження, великі електричні та магнітні поля, радіоактивне випромінювання, вимагає всестороннього вивчення впливу зовнішніх умов на властивості кремнію та германію. У свою чергу, це дозволяє формувати практичні рекомендації, що мають першочергове значення для різних областей напівпровідникової мікроелектроніки.

Використання різних методик дозволяє всесторонньо вивчати вихідні матеріали, призначені для вищевказаних напівпровідникових приладів. Зростання вимог до точності та достовірності в оцінці основних характеристик напівпровідників спонукало дослідників до пошуку методів, які дають найбільш надійні та адекватні результати у широких інтервалах зміни зовнішніх умов при визначенні основних параметрів і коефіцієнтів, якими можна характеризувати відповідні матеріали.



Одним з таких методів є вивчення тензоефектів, що дає багату і корисну інформацію про фізичні властивості досліджуваних матеріалів: зонну структуру, механізми п'єзоопору, особливості розсіювання носіїв заряду в багатодолинних напівпровідниках.

МЕТА РОБОТИ полягає в проведенні досліджень тензоефектів у технічно актуальних напівпровідникових матеріалах n -Si та n -Ge, а також в розробці методів для більш точного визначення основних фізичних параметрів і констант у цих матеріалах.

ОСНОВНІ ЗАВДАННЯ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ:

- дослідження залежності зміни питомого опору і рухливості носіїв заряду в n -Ge від температури при одновісному навантаженні (X), коли $X \parallel J \parallel [110]$ (J -вектор струму);
- визначення параметрів анізотропії рухливості (K) та розсіювання (K_T) в n -Si з різними концентраціями домішок;
- визначення зміни глибини залягання глибоких енергетичних рівнів у широкому інтервалі механічних напружень для n -Ge;
- дослідження впливу шаруватих періодичних неоднорідностей (ШПН) на кінетичні явища в γ -опромінених кристалах n -Ge при освітленні, а також на точність визначення констант деформаційного потенціалу зсуву в n -Ge та n -Si після опромінення.

НАУКОВА НОВИЗНА РОБОТИ:

- виявлено і досліджено вплив одновісної пружної деформації на температурну залежність питомого опору та рухливості носіїв заряду в n -Ge при $X \parallel J \parallel [110]$;
- вдосконалено методику визначення параметру анізотропії рухливості та розсіювання носіїв заряду в n -Si при різному внеску домішкового та акустичного розсіювання;
- досліджено вплив наявності ШПН та глибоких рівнів при освітленні на п'єзоопір γ -опроміненого n -Ge;
- запропоновано метод визначення зміни глибини залягання рівня $E_C - 0,2$ eВ в n -Ge для широкого інтервалу механічних напружень;

- досліджено вплив радіаційних дефектів та ШПН на надійність визначення констант деформаційного потенціалу зсуву в опромінених кристалах n-Ge і n-Si.

ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ.

1. Створено і освоєно в роботі модернізовану установку для дослідження монокристалів германію і кремнію в магнітному полі при великій одновісній пружній деформації, як в умовах темноти, так і при різних інтенсивностях освітлення.

2. Запропоновано методику визначення глибини залягання глибоких енергетичних рівнів у широкому інтервалі одновісних пружних деформацій.

3. На основі вимірювання поздовжнього і поперечного п'єзоопору запропоновані і реалізовані методи коректного розрахунку значень параметрів, що характеризують зонну структуру і механізми розсіювання носіїв заряду в досліджуваних кристалах.

4. Показано, що вплив шаруватих періодичних неоднорідностей на кінетичні коефіцієнти в n-Si і n-Ge визначається рівнем компенсації при γ -опроміненні і орієнтацією шарів по відношенню до напрямку вектора струму, що необхідно враховувати при виготовленні і використанні різних датчиків на основі цих кристалів.

ПОЛОЖЕННЯ, ЩО ВІНОСЯТЬСЯ НА ЗАХИСТ.

1. Особливості температурних залежностей питомого опору і рухливості носіїв заряду в недеформованих та пружнодеформованих кристалах n-Ge для випадку $X \parallel J \parallel [110]$.

2. Вдосконалення методу коректного визначення параметрів анізотропії рухливості та розсіювання носіїв заряду для n-Si на основі вимірювання п'єзоопору при різних значеннях вкладу домішкового та акустичного розсіювання.

3. Експериментальний доказ впливу наявності ШПН на фото-провідність γ -опромінених кристалів n-Ge при одновісній пружній деформації.

4. Розширення інтервалу механічних напружень при визначенні глибини залягання рівня $E_c - 0,2$ eВ в n-Ge.

5. Оцінка меж застосування методу поздовжнього п'єзоопору

для розрахунку констант деформаційного потенціалу зсуву в γ -опромінених кристалах n-Ge та n-Si при наявності ШПН.

СТУПІНЬ ДОСТОВІРНОСТІ. Достовірність одержаних результатів і висновків, зроблених на їх основі, забезпечувалась виконанням достатньої кількості експериментів та відтворюваності одержуваних результатів, використанням у вимірвальній установці приладів і вузлів, що пройшли метрологічну атестацію, а також коректністю розрахунків досліджуваних величин.

АПРОБАЦІЯ РОБОТИ. Основний зміст і результати роботи доповідались та обговорювались на Всесоюзній науковій конференції "Фотоелектричні явища в напівпровідниках" (Ташкент, 1989р.); на XII Всесоюзній конференції з фізики напівпровідників (Київ, 1990р.); на семінарах відділів N7 і N19 ІН АН України; на семінарах кафедри термоелектрики та фізичної метрології Чернівецького держуніверситету; на наукових конференціях професорсько-викладацького складу ЛІІ (1990-97р.); на об'єднаному науковому семінарі "Фізика напівпровідників та діелектриків" Волинського держуніверситету та Луцького індустріального інституту (1997р.).

ПУБЛІКАЦІЇ. За матеріалами дисертації опубліковано 10 робіт, які наведені в кінці автореферату.

ОСОБИСТА УЧАСТЬ АВТОРА в одержанні наукових результатів, викладених в дисертації, полягає у самостійній розробці і впровадженні окремих вузлів вимірвальної установки, одержанні основних результатів експериментальних досліджень, розрахунку відповідних параметрів і констант, які визначають фізичні властивості напівпровідникових матеріалів, що досліджувались. Усі висновки і положення, що складають суть дисертації, сформульовані автором особисто.

СТРУКТУРА І ОБ'ЄМ РОБОТИ. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків і списку використаної літератури. Основний зміст роботи викладений на 100 сторінках друкованого тексту, ілюстрованого 41 рисунком і 1 таблицею.

Список використаної літератури містить 108 найменувань.

КОРОТКИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність вибраної теми, розглянуто стан проблеми, визначено мету і завдання досліджень, відзначено наукову новизну і практичну цінність одержаних результатів, сформульовано положення, що виносяться на захист.

У першому розділі приведені літературні дані по вивченню кінетичних ефектів у багатодолинних напівпровідниках германію та кремнію, які є найбільш типовими представниками матеріалів з анізотропним характером розсіювання носіїв заряду. Пружна деформація в таких монокристалах приводить не тільки до кількісних, але й до якісних змін кінетичних ефектів в порівнянні з тими ж ефектами при відсутності деформації.

Проведено феноменологічний аналіз, який дає можливість одержати вирази для коефіцієнтів п'єзоопору. Показано співвідношення між коефіцієнтами п'єзоопору та еластоопору через коефіцієнти модуля пружності для кубічних кристалів.

Для конкретних кристалографічних напрямів кристалів германію та кремнію показана фізична суть явища п'єзоопору, яка полягає у залежності питомого опору кристалу від пружної деформації через порушення симетрії кристалічної ґратки кристалу при механічному навантаженні.

Відмічено, що при деформаціях, коли енергетична щільність долинами, що опускаються і піднімаються стає співмірною з kT , в багатодолинних напівпровідниках виникають нелінійні з деформацією ефекти. Максимальна зміна питомого опору для n -Ge має місце при $X \parallel J \parallel [111]$, а для n -Si при $X \parallel J \parallel [100]$.

На основі даних про зміни, що проходять в зонній структурі напівпровідників при одновісній поздовжній і поперечній деформаціях, приведено співвідношення, за якими на основі результатів вимірювання п'єзоопору визначаються параметри анізотропії рухливості та розсіювання носіїв заряду в n -Ge та n -Si.

Приведено літературний огляд результатів експериментальних робіт по дослідженню поздовжнього та поперечного п'єзоопору для кристалів кремнію та германію з різним внеском до-

мішкового та акустичного розсіювання.

У другому розділі розглянуто експериментальні методи досліджень. Представлено схематичне зображення установки і описано методику для вимірювання поздовжнього та поперечного п'єзоопору, особливістю якої є можливість одержання на досліджуваних зразках n-Ge і n-Si механічних навантажень до 25000 кг/см^2 у широкому температурному інтервалі (78–300 К).

Застосування в установці окремо розроблених пристроїв дозволяє визначати концентрацію і рухливість носіїв заряду в широких межах одновісних механічних напружень при різних рівнях інтенсивності освітлення в інфрачервоній області. Для дослідження впливу зовнішніх факторів на поведінку основних характеристик кристалів n-Ge і n-Si використано пристрій для автоматичного запису залежностей питомого опору від механічного навантаження $\rho = f(X)$, а також температурних залежностей питомого опору $\rho = f(T)$ при фіксованих значеннях механічних напружень.

Описано методику і технологічні операції при обробці та виготовленні зразків при дослідженні їх в екстремальних умовах. Наведено оптимальні геометричні розміри і форми зразків, що забезпечують простоту у вимірюваннях і надійність одержаних результатів.

Третій розділ присвячено вивченню особливостей розсіювання носіїв заряду в достатньо чистих кристалах n-Ge та визначенню параметрів анізотропії рухливості та розсіювання носіїв заряду в n-Si з різними концентраціями легуючої домішки. Виявлено, що одновісна пружна деформація усуває додаткові механізми розсіювання і приводить температурну залежність питомого опору кристалу до важливої характеристики акустичного розсіювання $\rho \sim T^{15}$ замість $\rho \sim T^{166}$ в недеформованих кристалах. Постійність концентрації носіїв заряду в зоні провідності для таких кристалів забезпечила можливість ототожнення температурних змін питомого опору ($\rho = \frac{1}{en\mu}$) з температурними змінами рухливості носіїв заряду (μ_n). Тобто для пружнодеформованих кристалів n-Ge при $X \parallel J \parallel [110]$ коли $\rho = f(X)$ виходить на насичення, одержано степеневий закон зміни холлівської рухливості носіїв заряду

Виходячи з того, що визначення параметру анізотропії рух-

ливості носіїв заряду в n-Si за даними лише поздовжнього п'єзоопору нашоувхується на ряд обмежень, як в температурній, так і в концентраційній областях, були проведені вимірювання поздовжнього та поперечного п'єзоопору на кристалах n-Si з двома різними (що відрізняються на два порядки) концентраціями донорної домішки.

Обчислення значень параметру K при T=78 K для кристалів n-Si з концентрацією домішки $N_d = 2,4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ за даними лише поздовжнього п'єзоопору $X \parallel J \parallel [100]$ згідно

$$K = \frac{3}{2} \frac{\rho_{\infty}^{\parallel}}{\rho_0} - \frac{1}{2} \quad (1)$$

а також за даними поздовжнього ($\rho_{\infty}^{\parallel}$) і поперечного (ρ_{∞}^{\perp}) п'єзоопору в області насичення залежностей $\rho = f(X)$ згідно

$$K = \frac{\rho_{\infty}^{\parallel}}{\rho_{\infty}^{\perp}} \quad (2)$$

привели до практично співпадаючих результатів. Для кристалів з концентрацією домішки $N = 2,3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ значення параметру K, одержані подібним чином вже суттєво відрізняються.

Отримані результати вказують на те, що в кристалах n-Si значення параметру анізотропії рухливості при концентраціях донорної домішки, що забезпечує умови домінуючого розсіювання на акустичних фонах при T=78 K, можна надійно визначати за даними лише поздовжнього п'єзоопору, при умовах же змішаного розсіювання, для коректного визначення параметру K, тобто для виключення деформаційної залежності іонізації домішкових центрів, необхідні вимірювання як поздовжнього, так і поперечного п'єзоопору в області насичення кривих $\rho = f(X)$.

Для визначення параметру анізотропії розсіювання носіїв заряду (K_r) досліджувалися температурні залежності (в інтервалі 78-300 K) питомого опору ($\rho = f(T)$) недеформованих і деформованих ($X=12000 \text{ кГ/см}^2$) кристалів n-Si з вицезгадуваними концентраціями донорної домішки. Виявлено, що для недеформованих кристалів з $N_d = 2,4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ $\rho = f(T)$ приблизно при 100 K має злам ($\rho \sim T^{2,3}$), що відповідає за перехід до домінуючого міждолинного розсіювання. Проведені теоретичні розрахунки підтверджують причину зламу на температурній залежності $\rho = f(T)$. Згідно даних поздовжнього і поперечного п'єзоопору

в насиченні одержано значення параметрів анізотропії рухливості та розсіювання .

Для недеформованих кристалів n-Si з концентрацією домішки $N = 2,3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ одержано залежність $\rho = f(T)$, хід якої пояснюється при низьких температурах як акустичним розсіюванням, так і розсіюванням на іонізованих домішках із збільшенням концентрації носіїв заряду в зоні провідності внаслідок термічної іонізації домішкових станів. В області високих температур залежність $\rho = f(T)$ приходить до вигляду, що відповідає за міждолинне розсіювання ($\rho \sim T^{2,3}$). На основі одержаних даних вимірювань поздовжнього і поперечного п'єзоопору n-Si в області насичення $\rho = f(X)$, тобто при повному виключенні деформаційної залежності іонізації домішкових центрів при низьких температурах, а також при виключенні міждолинного розсіювання в діапазоні вищих температур, можна надійно визначити параметр K , а значить і K_T для будь-якої температури.

В четвертому розділі представлені результати досліджень впливу інфрачервоного освітлення на кінетичні коефіцієнти в γ -опроміненому n-Ge з шаруватими періодичними неоднорідностями. Досліджувані зразки вирізались вздовж кристалографічного напрямку [111] так, щоб шари росту для зразків з різних груп були розміщені або перпендикулярно (1 група), або вздовж (2 група) напрямку струму і механічного напруження ($X \parallel J$). Для вихідних кристалів, доки шаруваті періодичні неоднорідності ще мало проявляються, залежності $\rho_x/\rho_0 = f(X)$ для зразків обох груп практично співпадають. Майже співпадають в цих зразках значення концентрації і холлівської рухливості носіїв заряду. Після γ -опромінення кристалів для зразків обох груп величини відношення ρ_x/ρ_0 суттєво відрізняються, відрізняються також значення середньої концентрації і холлівської рухливості носіїв заряду. Такі зміни кінетичних параметрів зразків обох груп пояснюються тим, що в результаті γ -опромінення в кристалах n-Ge виникають радіаційні дефекти, що викликають появу в забороненій зоні глибоких рівнів, де іонізація яких при низьких температурах приводить до різкого збільшення амплітуди шаруватих періодичних неоднорідностей.

При освітленні зразків в інфрачервоній області величина ρ_x/ρ_0 зростає, а із збільшенням інтенсивності підсвіт -

ки навіть перевищує значення для вихідних кристалів. Зростають при цьому значення середньої концентрації електронів (n) і значення холлівської рухливості носіїв заряду (μ_n). Особливо значне зростання μ_n і n спостерігається для зразків першої групи. Необхідно відмітити, що зміна μ_n і n від рівня підсвітки більш характерна для недеформованих кристалів. В сильно деформованих же кристалах, коли криві $\frac{\rho''}{\rho_0} = f(X)$ виходять на насичення, зміна μ_n в залежності від підсвітки практично відсутня.

Така залежність μ_n і n від рівня інтенсивності підсвітки і деформації в γ -опромінених кристалах n -Ge пояснюється зміною амплітуди потенціального рельєфу

$$\bar{\phi} = \frac{e^2 N_t^{2/3}}{2 n_{\text{екр}}^{1/3}} \quad (3)$$

де ϵ - діелектрична проникливість, $n_{\text{екр}}$ - концентрація екрануючих носіїв заряду, N_t - концентрація заряджених дефектів, e - заряд електрона. Із збільшенням інтенсивності освітлення і деформації буде зменшуватися через збільшення концентрації екрануючих носіїв заряду, яка в свою чергу зв'язана з фотоіонізацією рівня $E_c - 0,2$ еВ із зменшенням з деформацією енергетичної щілини між рівнем і дном зони провідності.

З метою визначення зменшення цієї енергетичної щілини та зміни глибини залягання рівня $E_c - 0,2$ еВ при одновісній пружній деформації були проведені вимірювання p '-зсоопору - опроміненого n -Ge в широкому діапазоні механічних напружень.

Приведено одержані при $T=165$ К залежності $\frac{\rho''}{\rho_0} = f(X)$ на зразках у вихідному стані і після γ -опромінення для випадку ХІІІ [110]. Якісні відмінності ходу обох залежностей $\frac{\rho''}{\rho_0} = f(X)$ свідчать про те, що в γ -опромінених зразках n -Ge при даній температурі одночасно проявляються з деформацією два механізми, що визначають зміну величини p '-зсоопору: перший - міждолинний перерозподіл носіїв заряду в s -зоні, що зумовлює ріст залежності $\Delta\rho''/\rho_0 = f(X)$ і вихід її на насичення при незмінній концентрації носіїв заряду в зоні провідності; другий - зростання загальної концентрації носіїв заряду в s -зоні через зменшення енергетичної щілини між дном зони провідності і глибоким рівнем, що веде до спаду $\Delta\rho''/\rho_0 = f(X)$. Безпосередній внесок зміни загальної концентрації носіїв заряду в

c-зоні на величину ρ із зростанням X може бути оцінений з приведених експериментальних залежностей $\frac{\Delta \rho}{\rho_0} = f(X)$ до і після γ -опромінення. Результуючі дані, представлені в напівлогарифмічному масштабі, трансформуються в пряму, нахил якої і дає значення зміни ширини енергетичної щілини E від механічного навантаження:

$$\Delta E' = \frac{2,3(\Delta \lg \rho) \cdot \Delta \cdot kT}{1,6 \cdot 10^{-19} \Delta X}, \quad (4)$$

де Δ - коефіцієнт, що змінюється від 1 до 2, в залежності від ступеня заповнення рівня.

Розрахунки показали, що лінійність зміни $\Delta E'$ від механічного навантаження простягається і в область малих тисків, де домінуючим є ефект міждолинного перерозподілу носіїв заряду. Обчисливши зміщення з деформацією дна зони провідності одержано величину зміщення глибокого рівня $E_c - 0,2$ еВ відносно свого початкового положення.

У п'ятому розділі досліджено вплив шаруватих періодичних неоднорідностей і γ -опромінення на визначення констант деформаційного потенціалу Ξ_u в n-Ge та n-Si. Для цього досліджувались зразки двох груп: в зразках першої групи шари росту перпендикулярні вектору струму J і механічному напруженню X ($X \parallel J$); в зразках другої групи $X \parallel J$ направлені вздовж шарів росту.

Для вимірювань поздовжнього p'езоопору в монокристалах n-Si вибрано кристалографічний напрям $[100]$, який для зразків 1 групи співпадає з напрямом росту кристалу. Розрахунок константи деформаційного потенціалу зсуву проводився згідно співвідношення:

$$\Xi_u = 1,6 \cdot 10^4 \frac{\Delta \lg(C' \cdot 10^4)}{\Delta X} \quad (\text{eB}), \quad (5)$$

де

$$C' = \frac{1 - \frac{\rho_x}{\rho_0}}{2K \frac{\rho_x}{\rho_0} - 2} \quad (6)$$

K - параметр анізотропії рухливості носіїв заряду.

Таким чином, за експериментальними даними $\rho_x/\rho_0 = f(X)$ згідно (5) і (6) одержуємо з ростом X лінійну функцію

$$\lg(C' \cdot 10^4) = f(X) \quad (7)$$

нахил якої, при заданих значеннях температури ($T = \text{const}$), і визначає величину константи деформаційного потенціалу зсуву. Обробка за даним методом залежностей $\rho_x/\rho_0 = f(X)$ для вихідних кристалів обох груп дає пряму, згідно якої одержано значення $\Sigma_u = 9,3$ еВ, що співпадає з літературними даними. Добре вкладається на лінійну залежність оброблені відповідно до (5) і (6) дані п'єзоопору для опромінених зразків 2 групи. Що ж до зразків першої групи, то після γ -опромінення їх такими ж дозами розрахунок $\lg(C' \cdot 10^4)$ згідно експериментальних кривих взагалі неможливий.

Аналіз ходу залежностей $\rho = f(X)$ вказує на те, що п'єзоопір у таких кристалах n-Si зумовлений вже не лише больцманівським перерозподілом носіїв заряду між мінімумами, що опускаються і піднімаються, а і тим, що в результаті γ -опромінення в кристалах кремнію з'являються радіаційні дефекти, з відповідними акцептарними рівнями $E_c - 0,17$ еВ в забороненій зоні, які з пониженням температури деіонізуються. З прикладанням одновісного механічного напруження крім перерозподілу носіїв заряду між долинами, що опускаються і піднімаються, буде збільшуватись концентрація носіїв заряду в зоні провідності через зменшення величини енергетичної щільності між глибоким рівнем і дном зони провідності. Що ж до зразків другої групи, то хоча середня концентрація носіїв заряду з опроміненням зменшується, шари росту продовжують залишатись добре провідними аж до дози $2,1 \cdot 10^{17}$ кв/см².

Для визначення константи Σ_u в n-Ge на основі експериментальних значень поздовжнього п'єзоопору було вибрано кристаллографічний напрям [111]. Досліджувані зразки вирізалися відносно осі росту кристалу аналогічно як для n-Si. Розрахунок значення константи Σ_u проводився згідно

$$\Sigma_u = 2,4 \cdot 10^4 \frac{\Delta \lg(C' \cdot 10^4)}{\Delta X}, \quad (8)$$

де

$$C' = \frac{\frac{\rho_\infty}{\rho_x} - 1}{\frac{8K+1}{3} - 3 \frac{\rho_\infty}{\rho_x}} \quad (9)$$

Обробка залежностей п'єзоопору для зразків обох груп до і після різних доз γ -опромінення по описаній методиці дає лінійну залежність функції $\lg(C' \cdot 10^4) = f(X)$, нахил якої відповідає значенню константи деформаційного потенціалу зсуву $\bar{\Sigma}_\kappa = 16,4$ еВ. Як відомо, в результаті γ -опромінення в кристалах п-Ge з'являються радіаційні дефекти з відповідними в забороненій зоні рівнями $E_c - 0,2$ еВ. З пониженням температури деіонізація цих центрів приводить до зростання градієнтів питомого опору, зумовлених наявністю ШПН. Але лінійність функції $\lg(C' \cdot 10^4) = f(X)$ для зразків обох груп свідчить про те, що п'єзоопір як у вихідних, так і в опромінених кристалах зумовлений лише бoльцманівським перерозподілом носіїв заряду між мінімумами, що опускаються і піднімаються. Цим підтверджується недостатність зміни з тиском енергетичної щільності між дном зони провідності і рівнем $E_c - 0,2$ еВ для переходу електронів при $T = 78$ К в с-зону.

При освітленні таких зразків, з прикладанням одновісного механічного напруження, крім перерозподілу між долинами носіїв заряду буде збільшуватись їх концентрація в с-зоні за рахунок фотоіонізації глибокого рівня, через зменшення енергетичної щільності між рівнем і дном зони провідності. Особливо суттєві відхилення функції $\lg(C' \cdot 10^4) = f(X)$ від лінійності для освітлених зразків 1 групи, що підтверджує більш сильну залежність амплітуди потенціального рельєфу компенсованих напівпровідників від підсвітки і деформації в напрямі перпендикулярному до шарів росту.

Таким чином наявність ШПН в компенсованому γ -опроміненні кремнії, коли суттєво зростають градієнти питомого опору, зменшує надійність визначення константи $\bar{\Sigma}_\kappa$ на основі даних поздовжнього п'єзоопору, тоді як в неопромінених і компенсованих γ -опроміненням кристалах п-Ge їх присутність при $T = 78$ К не впливає на точність визначення.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Виявлено, що одновісна пружна деформація ($X = 12000$ кг/см²) п-Ge для випадку $X // J // [110]$ усуває додаткові механізми розсіювання і приводить температурну залежність питомого опору кристалу до важливої характеристики акустичного роз-

сішвання $\rho \sim T^{1.5}$, що при постійній концентрації носіїв заряду в с-зоні тотожно $\mu \sim T^{-1.5}$.

2. Обґрунтовано можливість і достовірність визначення параметру анізотропії рухливості носіїв заряду в n-Si при малих концентраціях легуючої домішки за даними лише позовного ρ 'езоопору, а при концентраціях легуючої домішки, яка забезпечує змішане розсішвання, для коректного визначення K і K_T необхідні вимірювання як позовного, так і поперечного ρ 'езоопору в області насичення $\rho = f(X)$.
3. Одержано залежність $\rho = f(X)$, а також значення холлівської рухливості і середньої концентрації носіїв заряду в недеформованих і деформованих γ -опромінених кристалах n-Ge при різних інтенсивностях освітлення. Пояснюються зміни цих величин зміною амплітуди потенціального рельєфу ШПН через збільшення концентрації екрануючих носіїв заряду, яка в свою чергу зв'язана з фотоіонізацією рівня $E_c - 0,2$ еВ і із зменшенням з деформацією енергетичної щільності між рівнем і дном зони провідності.
4. Проведені розрахунки для визначення зміни глибини залягання глибокого енергетичного рівня $E_c - 0,2$ еВ показали, що лінійність зміни величини енергетичної щільності між дном зони провідності і глибоким рівнем від механічного напруження для випадку $X \parallel J \parallel [110]$ простягається і в область малих тисків, де домінуючим є ефект міждолинного перерозподілу носіїв заряду.
5. Показано, що наявність шарових періодичних неоднорідностей (ШПН) в неопромінених кристалах не впливає на точність визначення констант деформаційного потенціалу в n-Si і n-Ge. Але присутність ШПН в компенсованих γ -опромінених кристалах кремнію та германію при певних умовах, що ведуть до зростання градієнтів питомого опору, може суттєво ускладнювати (і навіть знижувати надійність) визначення констант деформаційного потенціалу на основі використання експериментальних даних лише для позовного ρ 'езоопору.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНІ В РОБОТАХ:

1. Федосов А.В., Тимошук В.С., Яцинский Л.В. Об определении параметра анизотропии подвижности в n-Si//ФТП.-1988.-Т.22.

- В.9.-С.1704.
2. Федосов А.В., Букало В.Р., Яцинский Л.В. Особенности пьезосопротивления γ -облученного p-Ge при подсветке //ФТП. - 1990.-Т.24.-В.4.-С.754-756.
 3. Федосов А.В., Тимощук В.С., Яцинский Л.В. Об особенностях определения параметра анизотропии рассеяния электронов в p-Si//УФЖ.-1990.-Т.35.-N2.-С.265.
 4. Федосов А.В., Яцинский Л.В. Определение сдвиговой константы деформационного потенциала в γ -облученном кремнии//Деп. в Укр.НДІНТІ 6.10.1988, N2565.-4с.
 5. Федосов А.В., Яцинский Л.В., Тимощук В.С. Особенности деформированного p-Ge для случая $X||J||[100]$ // Деп. в Укр.НДІНТІ, 1991, N1504.-7с.
 6. Федосов А.В., Яцинский Л.В., Тарасенко В.Б. Определение сдвиговой константы деформационного потенциала в γ -облученном германии //Деп. в Укр. НДІНТІ , 1991, N1503.-8с.
 7. Федосов А.В., Тимощук В.С., Яцинський Л.В., Войтович В.М. Про визначення зміни глибини залягання глибоких рівнів у p-Ge при одновісній пружній деформації // Наукові нотатки, серія фізико-математична. в.І. ЛІІ,1993. -с.30-31.
 8. Федосов А.В., Букало В.Р., Яцинский Л.В. Фоточувствительность γ -облученных кристаллов p-Ge при одноосной деформации // Тезисы Всесоюзной конференции, Ташкент, 1989.-2с.
 9. Федосов А.В., Яцинський Л.В., Семенченко Р.М. Поздовжній п'єзоопір в кристалах p-Si в температурному інтервалі 78 - 300 К // Тези ІХ науково - технічної конференції ЛІІ.1994. -с.126.
 10. Федосов А.В., Яцинський Л.В., Семенченко Р.М., Войтович В.М. Про особливості температурної залежності п'єзоопору кристалів p-Si //Тези ІХ науково - технічної конференції ЛІІ. 1994.-с.127.

АННОТАЦІЯ

Яцинский Л.В. Исследование кинетических эффектов в многодолинных полупроводниках при упругой деформации.

Диссертация представлена в виде рукописи на соискание

ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников и диэлектриков, Волынский государственный университет, Луцк, 1997г.

Защита 10 научных работ, содержащих исследования закономерностей и механизмов кинетических явлений, обусловленных анизотропией рассеяния носителей заряда в одноосно упругодеформированных кристаллах n-Si и n-Ge. Обнаружено и исследовано влияние одноосной упругой деформации в направлении [110] на температурную зависимость подвижности носителей заряда в n-Ge. Предложен метод корректного определения параметров анизотропии подвижности и рассеяния носителей заряда в n-Si при различном вкладе примесного и акустического рассеяния. Исследовано влияние присутствия слоистых периодических неоднородностей (СПН) и глубоких уровней на пьезосопротивление γ -облученного n-Ge. Определены изменения глубины залегания глубоких энергетических уровней в n-Ge в широком интервале механических напряжений. Определено влияние радиационных дефектов и СПН на надежность определения констант деформационного потенциала сдвига в γ -облученных кристаллах n-Si и n-Ge.

SUMMARY.

Yashchynsky L.U. Investigation of kinetic effects in multi-valley semiconductors with elastic deformation.

The thesis is submitted as manuscript for candidate of science in the field of physics and mathematics, speciality 01.04.10 - physics of the semiconductors and dielectrics, Volyn State University, Lutsk, 1997.

The defend of the 10 scientific works, containing investigation of mechanisms of kinetic phenomena caused by anisotropy of charge carriers scattering in uniaxial elastically deformed crystals of n-Si and n-Ge are to be defended. The influence of uniaxial elastic deformation in direction [110] upon temperature dependence of charge carriers mobility in n-Ge has been discovered and investigated. Method of correct determination of anisotropy parameters of mobility and scattering of charge carriers in n-Si with different contribution of additives and acoustic scattering is offered. The influence of presen-

ce of lamellar periodical heterogeneties (LPH) and deep levels upon piezoresistance γ -radiated n-Ge is investigated. Changes of depth of occurrence of deep energetic levels in wide interval of mechanical stresses are determined. The influence of radiation defects and LPH upon the reliability of determination of constants of deformational shearing potential in γ -radiated crystals n-Si and n-Ge is determined.

Ключові слова: напівпровідники, п'єзоопір, анізотропія, опромінення, неоднорідності, дефекти, надійність.

Підписано до друку 20.04.1997 р. 06.0,8 др. листа.
Формат 60 84/16. Тир. 100 прим. Зам. 44. Безкоштовно.
ПФ "Зоря", Луцьк, пр. Волі 2.

435135

AV 37.747

AV 37.747