

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ І.ФРАНКА

На правах рукопису

УДК 621.315.592

ГОРІН
Андрій Євгенович

ДОСЛІДЖЕННЯ АНІЗОТРОПІЇ
ТЕНЗОРЕЗИСТИВНИХ ЕФЕКТІВ
В СИЛЬНО ДЕФОРМОВАНИХ
КРИСТАЛАХ Ge ТА Si

01.04.10 - Фізика напівпровідників і діелектриків

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Львів-1997

AB 37.728



00752443 (P)

Дисертація
Роботу виконано в Інституті фізики напівпровідників НАН України

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук
КОЛОМОЄЦЬ В.В.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
БУДЖАК Я.С.

кандидат фізико-математичних наук, доцент
САВЧИН В.П.

Провідна організація - Чернівецький державний університет

Захист відбудеться <12> БЕРЕЗНЯ 1997 р. о 15³⁰ год.
на засіданні Спеціалізованої Ради Д 04.04.08 при Львівському
державному університеті імені І.Франка за адресою:
290005, Львів, вул. Кирила і Мефодія, 8, Велика фізична аудиторія.

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці Львівського
державного університету імені І.Франка (вул. Драгоманова, 5).

Відгуки на автореферат у двох примірниках, завірені печаткою
просимо надсилати за адресою: 290005, Україна, Львів, вул. Кирила і
Мефодія, 8, фізичний факультет, вченому секретарю.

Автореферат розіслано <10> лютого 1997 року.

Вчений секретар
Спеціалізованої Ради Д 04.04.08
доктор фіз.-мат. наук, професор

Л. Блажівський

БЛАЖИЄВСЬКИЙ Л.Ф.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток фізики значною мірою визначається технічними можливостями, які дозволяють реалізувати дослідження в екстремальних умовах експерименту. В фізиці напівпровідників, зокрема, реалізація таких досліджень має важливе значення як з точки зору вивчення механізмів нетривіальних ефектів, які, як правило, виникають в екстремальних умовах, так і для вирішення проблем матеріалознавства, пов'язаних з визначенням граничних можливостей того чи іншого матеріалу.

В зв'язку з тим, що сильні напрямлені тиски суттєво змінюють зонну структуру напівпровідників, механічні напружки, які виникають в кристалах, структурах та приладах на їх основі, або застосовуються для досліджень, повинні приводити до значних змін їх електрофізичних характеристик. Тому дослідження ролі механічних напружень у визначенні електрофізичних характеристик напівпровідникових матеріалів, зокрема Si та Ge, кристали яких є модельними напівпровідниками - є актуальним як з точки зору використання одержаних даних для підвищення стабільності функціонування напівпровідникових приладів, так і з точки зору здобуття відповідної інформації про тензорезистивні властивості матеріалів та структур, що можуть бути використані для розробки чутливих елементів механо-електричних перетворювачів.

Розвиток експериментальних і теоретичних методів вивчення механізмів розігріву носіїв струму в сильних електричних полях в анізотропних напівпровідниках безпосередньо пов'язаний з поглибленням фізичних уявлень про закономірності розсіювання енергії і імпульсу носіїв струму в нерівноважній анізотропній системі. Врахування багатодолинної структури при вивченні явищ переносу в гріючому полі приводить в теоретичних розрахунках в порівнянні з рівноважними умовами до значних труднощів і тому в даний час є актуальним як з теоретичної, так і з практичної точки зору.

У виробництві приладів напівпровідникової електроніки вимоги до безумовного забезпечення стабільності і відтворюваності їх параметрів в першу чергу ставлять питання щодо однорідності електрофізичних властивостей використовуваних матеріалів. Традиційними технологічними методами все складніше задовільняти вимоги забезпечення однорідності і точності дози легування. В зв'язку з цим в останній час все більша увага приділяється ядерному, або трансмутаційному легуванню напівпровідників, що дає можливість отримання матеріалу з високою однорідністю розподілу в ньому легуючої домішки. Саме це привело до інтенсивних досліджень в області поширення застосування вищезазначеного метода легування.

Незважаючи на значну кількість експериментальних і теоретичних робіт, присвячених вивченню валентної зони таких напівпровідникових матеріалів як германій та кремній, їй досі залишаються нез'ясованими механізми багатьох ефектів, що виникають в валентній зоні напівпровідників при сильних одновісних пружних деформаціях.

Значний науковий інтерес має також вивчення впливу валентної зони, відщепленої спин-орбітальною взаємодією, на електрофізичні властивості p-Si, p-Ge та інших напівпровідників в умовах дії сильних напрямлених тисків, які приводять до енергетичного розщеплення зон "легких" та "важких" дірок, значно більшого в порівнянні з значенням kT , та порівнянного з значенням спин-орбітального розщеплення валентної зони.

Мета та завдання роботи. Метою даної роботи було проведення експериментальних досліджень та аналіз закономірностей, які характеризують кінетичні явища в умовах перебудови енергетичної зонної структури та дії таких фізичних факторів, як: сильні напрямлені тиски, що сягають значень 5-6 Гпа; сильні електричні поля; низькі температури; великі дози γ -опромінення і т.ін., а також розвиток методів визначення фундаментальних параметрів зонної структури в германії n- і p-типу, кремнії n- і p-типу, та ідентифікація механізмів тензоефектів, що виникають в області екстремально високих тисків.

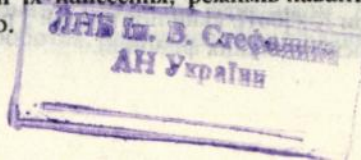
У відповідності до поставленої мети досліджень в дисертаційній роботі розв'язувалися такі завдання:

- експериментально дослідити закономірності, які характеризують тензорезистивні ефекти в умовах сильних одновісних пружних деформацій, в таких багатодолинних напівпровідниках як n-Si та n-Ge;
- дослідити процеси ударної іонізації мілких домішок Sb, P, As в одновісно деформованих кристалах германію та ідентифікувати механізми міждолинного перерозподілу і механізми, що визначають досліджені закономірності;
- дослідити особливості анізотропії тензоефектів в γ -опроміненних, легованих з розплаву та нейтроно-легованих, кристалах кремнію;
- отримати експериментальні дані по вивченню анізотропного характеру явищ переносу в валентних зонах одновісно деформованих кристалів германію та кремнію, і визначити на основі аналізу цих даних механізми тензоефектів в сильно деформованих кристалах.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що:

1. На основі досліджень ударної іонізації і розігріву електронів в сильно деформованих кристалах n-Ge визначено внесок в явища переносу еквівалентних і нееквівалентних долин зони провідності.
2. Показано, що в зв'язку з тим, що інверсія типу абсолютного мінімуму приводить до значної зміни параметрів зони провідності та домішкових станів мілких донорів, які характеризують розігрів носіїв

- струму в умовах ударної іонізації, зміна полів ударної іонізації домішок Sb, P, As в n-Ge в умовах значних одновісних пружних деформацій ($X \parallel [001]$) пов'язана в першу чергу з зростанням енергії іонізації домішок з тиском.
3. Приблизно чотирикратне збільшення енергії іонізації воднеподібних донорів в Ge внаслідок $L_1 - \Delta_1$ - інверсії дозволило продемонструвати внесок непружного розсіювання іонізуючих електронів на оптичних фононах, коли енергія іонізуючого електрона перевищує енергію оптичного фонона.
 4. Досліджено та проаналізовано залежності поля ударної іонізації мілких домішок Sb, P, As від одновісної деформації, орієнтованої в напрямку $[111]$, закономірності яких характеризують вплив двох конкуруючих механізмів (одновісного тиску і сильного (гріючого) електричного поля) на процеси перерозподілу носіїв струму між еквівалентними долинами с-зони.
 5. Доведено, що у випадку низькотемпературної ударної іонізації мілких домішок в n-Ge вигляд функції розподілу носіїв струму по енергії приймає сильно витягнутий (анізотропний) вигляд - виникає стрімінг.
 6. Аналіз експериментальних даних досліджень тензоефекту в γ -опромінених кристалах Si, легованого фосфором під час вирощування, так і методом трансмутаційного легування, дозволив однозначно встановити природу великої анізотропії такого ефекту для еквівалентних кристалографічних напрямків в γ -опроміненому n-Si, легованого фосфором під час вирощування.
 7. На основі експериментальних даних досліджень тензоефектів в сильно деформованих кристалах p-Si та p-Ge вперше наочно підтверджено основне положення теорії анізотропного розсіювання щодо вирішальної ролі анізотропії ефективних мас носіїв заряду в виникненні анізотропії їх розсіювання. Показано, що в p-Si відсутність насичення поздовжнього та поперечного p'езоопору в області сильних одновісних пружних деформацій (в протилежність випадку для p-Ge) пов'язана з малим значенням спин-орбітального розщеплення ($\Delta = 0.044$ eV) та залежністю його від тиску X.
- Практична цінність результатів роботи.** В процесі виконання дисертаційної роботи були одержані наступні результати, які мають практичну значимість.
1. Практично визначені можливості розширення діапазонів напрямлених (одновісних) тисків X, які не руйнують зразки, за рахунок вибору форми, розмірів, методів обробки зразків, розміщення електричних контактів та технології їх нанесення, режимів навантаження та розвантаження зразків, тощо.



2. В широкій області напрямлених тисків та концентрації акцепторів і донорів в кристалах кремнію та германію досліджено тензорезистивні властивості для головних кристалографічних напрямків (поздовжній та поперечний тензоефекти). Одержані дані можуть бути використані для розробки чутливих елементів сенсорів тиску з необхідною чутливістю та лінійністю.
3. На основі аналізу даних досліджень в n-Ge ударної іонізації домішки визначено зміну енергії іонізації фосфору внаслідок $L_1 - \Delta_1$ - інверсії типу абсолютного мінімуму зони провідності ($\epsilon_1^{\Delta}(P) = (41 \pm 2) \text{ meV}$).
4. Порівняльний аналіз тензорезистивних властивостей γ -опромінених кристалів n-Si, легованих фосфором як під час вирощування, так - і методом трансмутаційного легування, свідчить про більш високу радіаційну стійкість нейтроно-легованого кремнію в той час, коли такі параметри обох матеріалів, як константи деформаційного потенціалу, пружні константи, анізотропія рухливості носіїв струму, анізотропія їх розсіювання, тощо, практично співпадають. Одержані дані слід приймати до уваги, коли напівпровідникові матеріали, структури та прилади на їх основі використовуються в умовах дії γ -опромінення, а також - для прогнозування властивостей матеріалів та приладів, технологія виготовлення яких вимагає γ -опромінення.

Положення, що виносяться на захист:

1. Метод та результати експериментального визначення природи високої анізотропії для еквівалентних напрямків поздовжнього тензорезистивного ефекту γ -опромінених кристалів n-Si, легованих фосфором під час вирощування. Однозначно встановлено, що висока анізотропія тензорезистивного ефекту, яка спостерігається в таких кристалах n-Si<P>, починаючи з певних доз γ -опромінення, пов'язана з неоднорідною компенсацією радіаційними дефектами акцепторного типу (A-центри) неоднорідно розподіленої по шарах росту електрично активної донорної домішки фосфору.
2. Результати досліджень ударної іонізації домішки фосфору в кристалах германію в умовах інверсії типу абсолютного мінімуму c-зони та визначення енергії іонізації основного стану домішкового рівня фосфору, пов'язана з Δ_1 - долинами: $\epsilon_1^{\Delta}(P) = (41 \pm 2) \text{ meV}$.
3. Закономірності та механізми міждолинного перерозподілу електронів між еквівалентними і нееквівалентними долинами зони провідності германію, легованого домішками SB, P, As в умовах ударної іонізації та сильних напрямлених тисків і механізм виникнення максимуму на залежностях полів ударної іонізації від тиску для домішок As і P при $X \parallel [001]$, який пов'язаний з розсіюванням на оптичних фонах (емісія оптичних фонів).

4. Результати вимірів, закономірності та механізми, що визначають позовжний і поперечний тензорезистивні ефекти в кристалах p-Ge та p-Si, які одержані для широкого діапазону напрямлених тисків, концентрацій домішок та головних кристалографічних напрямків.
5. Результати вимірів анізотропії рухливості дірок в сильно деформованих кристалах p-Ge та p-Si, які безпосередньо підтверджують основне положення теорії анізотропного розсіювання щодо вирішальної ролі анізотропії ефективних мас носіїв заряду у визначенні анізотропії їх розсіювання.

Ступінь достовірності. Достовірність одержаних результатів забезпечувалась комплексним підходом в проведенні досліджень, виконанні достатньої кількості вимірювань та повторюваності їх результатів, а також використанням приладів, які пройшли метрологічну атестацію. Аналіз експериментальних даних та відповідних теоретичних розрахунків базувався на визначеній перевазі методу сильних напрямлених тисків в порівнянні з методом слабких тисків, як по відношенню до можливостей однозначної інтерпретації механізмів тензоефектів в напівпровідниках, так і з точки зору можливостей розробки методів визначення фундаментальних параметрів зонної структури та механізмів розсіювання.

Апробація роботи. Основні результати по темі дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на II Українській конференції "Матеріалознавство і фізика напівпровідникових фаз змінного складу" (Ніжин, 1993 р.), на IV і V Міжнародних конференціях з фізики і технології тонких плівок (Івано-Франківськ, 1993, 1995 рр.), на VI Міжнародній конференції "High Pressure Semiconductor Physics" (Банкувер, Канада, 1994 р.), на Першій Міжнародній науково-технічній конференції "Матеріалознавство алмазоподібних і халькогенідних напівпровідників" (Чернівці, 1994 р.), на Об'єднаній XV AIRAPT & XXXIII EHPRG Міжнародній конференції "High Pressure Science & Technology" (Варшава, Польща, 1995 р.), на XXIII Міжнародній конференції по фізиці напівпровідників (Берлін, Німеччина, 1996 р.), на VII Міжнародній конференції "High Pressure Semiconductor Physics" (Швабіш-Гмюнд, Німеччина, 1996 р.), а також на об'єднаному семінарі відділів № 7 і № 19 - Відділення "Фізики реальних кристалів" Інституту фізики напівпровідників НАН України.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 16 робіт, основні з них наведено в кінці автореферату.

Особистий внесок дисертанта. Основні результати та висновки дисертації отримані особисто автором. Постановка завдання та обговорення результатів були виконані спільно з науковим керівником. Дисертанту належить рівноправна роль у роботах, надрукованих у співавторстві.

Структура і об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків та списку літератури. Обсяг дисертації 108 сторінок. Дисертація вміщує 22 рисунки та 2 таблиці, 102 бібліографічних посилання.

КОРОТКИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтовано актуальність дисертаційної роботи, коротко розглянуто стан проблеми, викладено мету і завдання дослідження, відзначено наукову новизну і практичну цінність одержаних результатів, сформульовано положення, що виносяться на захист.

У першому розділі проведено огляд літературних даних по вивченню явищ переносу в багатодолінних напівпровідниках кремнію та германію. Багатодолінні напівпровідники є найбільш типовим прикладом напівпровідників з анізотропним енергетичним спектром носіїв заряду та анізотропним характером їх розсіювання, пружна деформація в таких напівпровідниках 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 поздовжнього та поперечного п'єзоопору в p-Si та p-Ge для визначеної орієнтації вісі деформації. Значний інтерес має вивчення розігріву носіїв струму при зміні їх концентрації з полем і, зокрема, при ударній іонізації мілких домішкових рівнів. Використання сильних одновісних пружних деформацій при вивченні явищ розігріву дозволяє перейти до одно- або двохдолінної моделі зони провідності, які широко використовуються в теоретичних розрахунках цих явищ, і тим самим - здійснити спрощену та більш коректну експериментальну перевірку результатів розрахунків. Розглянуто питання про вплив опромінення частинками високих енергій на властивості напівпровідників. Визначена, зокрема сильна залежність рухливості носіїв струму від дози опромінення. Наводяться результати вивчення впливу деформації на явища переносу в валентних зонах кремнію і германію. Показано, що механізми п'єзоопору p-Si і p-Ge обумовлені перебудовою валентної зони і переселенням носіїв струму в розієдлених зонах при зміні деформації.

Другий розділ присвячений розгляду експериментальних методів досліджень. В першому пункті розглянуто методику вимірів поздовжнього та поперечного п'єзоопору, особливістю якої є можливість одержання на досліджуваному зразку механічних напружень до 5 Гпа ($50000 \text{ кг} \cdot \text{см}^{-2}$) не тільки при гелієвій, але й при азотній температурах. Обгрунтовано необхідність проведення вимірів поперечного п'єзоопору. Розглянуто методику досліджень ударної іонізації мілких донорів при одновісній пружній деформації. Для дослідження розігріву носіїв струму

в умовах ударної іонізації використано пристрій для автоматичного запису вольт-амперних характеристик для різних значень механічної напруги X або залежностей $E_{np} = f(X)$ при фіксованому струмі через зразок. З метою усунення інжекції носіїв струму з контактів при дослідженні тензоефектів в умовах розігріву при високих одновісних деформаціях, найбільш придатними виявились гантелеподібні зразки. При вивченні поздовжнього та поперечного п'єзоопору виміри проводились на зразках, форма яких дозволяла використовувати простий і надійний метод вимірювання питомого опору на зондових точкових контактах. Для отримання температурних залежностей було обрано метод інерційного нагріву зразка. В цьому випадку автоматизована система проведення експерименту слідкує за температурою і проводить виміри в певних точках температурного діапазону.

Третій розділ дисертації присвячений експериментальному дослідженню ударної іонізації мілких донорів в одновісно деформованих кристалах германію.

Зона провідності германію окрім чотирьох найнижчих L_1 - долин має також шість Δ_1 - долин. При одновісній пружній деформації у випадку $X \parallel [001]$ виникає зустрічне зміщення найнижчих чотирьох L_1 - долин, які рухаються синхронно вгору по енергії із збільшенням X та двох Δ_1 - долин (які при відсутності деформації розташовані на 180 meV вище основних L_1 - долин зони провідності германію), що опускаються вниз по шкалі енергії. Експериментально встановлено, що при тиску $X > 2.1$ ГПа (≈ 21000 кГ*см⁻²) спостерігається інверсія типу абсолютного мінімуму зони провідності - L_1 - Δ_1 - інверсія. Така трансформація зонної структури приводить до того, що зона провідності германію (L_1 - долини) при тисках більших за 2.1 Гпа у випадку $X \parallel [001]$ набуває ознак зони провідності кремнію (Δ_1 - долини).

Згідно з даними розрахунків можна зробити висновок, що із збільшенням одновісної пружної деформації внесок Δ_1 - долин зони провідності германію в явища розігріву електронів у випадку $X \parallel [111]$ може лише зменшуватися тому, що при такій орієнтації деформації найнижча по енергії L_1 - долина і шість Δ_1 - долин розходяться на енергетичній шкалі. В цьому випадку розігрів носіїв струму в умовах ударної іонізації і їх перерозподіл за рахунок нееквівалентного розігріву та одновісної пружної деформації будуть відбуватись лише за участю L_1 - долин зони провідності германію. При низьких температурах (8 + 20) К та при орієнтації поля $E \parallel [111]$ електрони в слабких електричних полях переселяються в долину з більшою відносно напрямку електричного поля ефективною масою. При подальшому підвищенні поля виникає зворотній процес в зв'язку з включенням додаткових механізмів розсіювання. З іншого боку, прикладена одновісна пружна деформація також приво-

дить до перерозподілу електронів між енергетично розщепленими долинами, за рахунок чого у випадку $X \parallel [111] \parallel E$ відбувається переселення електронів в долину з більшою ефективною масою.

Враховуючи перерозподіл електронів як за рахунок їх нееквівалентного розігріву в "гарячих" і "холодній" долинах, так і за рахунок напрямленої пружної деформації, розраховано залежності полів ударної іонізації від прикладеного одновісного тиску $E_{np} = f(X)$, які відповідали умові експерименту $\tau = \text{const}$.

На основі теорії ударної іонізації мілких домішок розрахована загальна концентрація електронів в зоні провідності. А відношення концентрації електронів в долині, яка піднімається з тиском по шкалі енергії (n_2), до концентрації електронів в долині, яка опускається по енергії (n_1), визначається співвідношенням:

$$\frac{n_2}{n_1} = \exp\left(-\frac{4}{9} \Xi_u S_{44} X - \delta \epsilon\right) (\kappa T_e)^{-1} \quad (1)$$

Тут Ξ_u - константа деформаційного потенціала, S_{44} - константа пружної податливості, X - механічне напруження (тиск), κ - постійна Больцмана, T_e - температура електронів в "холодній" долині (визначається енергією носіїв струму в гріючому полі, яке здійснює ударну іонізацію), $\delta \epsilon$ - підгоночний параметр, який пов'язаний з різницею енергій електронів в "гарячих" і "холодній" долинах.

Зразки Ge на яких проводились вимірювання, мали концентрацію дорнів $1.15 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ для кожної з домішок Sb, P, As. Вимірювання проводились при температурі рідкого гелію ($T = 4.2 \text{ K}$).

Встановлено, що експериментальні залежності $E_{np} = f(X)$ для випадку $X \parallel [111] \parallel E$ характеризуються рядом особливостей, які обумовлені механізмами перерозподілу електронів між еквівалентними долинами (L-мінімуми).

Аналіз даних експериментів на основі відповідних теоретичних розрахунків визначив внесок двох домінуючих механізмів міждолинного перерозподілу електронів. По-перше, нееквівалентний розігрів електронів в різних ("гарячих" та "холодній") долинах, приводить до міждолинного перерозподілу електронів. По-друге, напрямлена деформація, змінюючи по енергії еквівалентні долини зони провідності, також обумовлює перерозподіл електронів між L₁-долинами. При умові, коли $\delta \epsilon \gg \kappa T_e$ відбувається повне переселення електронів в долину (долину), яка зміщується вниз по енергетичній шкалі.

Більш радикальна перебудова енергетичного зонного спектра, що обумовлює принципово інші механізми зміни полів ударної іонізації від прикладеного одновісного тиску має місце для випадку $X \parallel [001] \parallel E$. Доведено, що перебудова зонного спектра в цьому випадку приводить

до того, що зміна полів ударної іонізації мілких домішок Sb, P, As починає виникати тільки в області тисків $X > 1.6$ ГПа. Таке збільшення E_{np} пов'язане із значним зростанням енергії іонізації мілких домішок. Це зростання енергії іонізації виникає за рахунок збільшення внеску блохівських функцій Δ_1 - долин у хвильову функцію домішкових станів при зближенні L_1 - і Δ_1 - долин:

$$\Psi = \sum_k (C_{Lk} \psi_{Lk} + C_{\Delta k} \psi_{\Delta k}) \quad (2)$$

Найбільш характерною особливістю залежностей $E_{np}/E_{np}^0 = f(X)$ для X || [001] є наявність максимуму при тиску $X \approx 2.0$ ГПа, який спостерігається для домішок P і As, і практично відсутній для домішки Sb. Проведений аналіз одержаних даних з врахуванням трансформації зонної структури свідчить, що такий максимум визначається непружним розсіюванням іонізуючих електронів на оптичних фонах. Розсіювання на оптичних фонах дає помітний внесок в тому випадку, коли із збільшенням енергії іонізації домішки енергія іонізуючого електрона наближається до енергії оптичного фонуна ϵ_{omm} ($\epsilon_{omm} = \hbar \omega_0$).

Для визначених значень енергії ϵ_i^Δ (Sb) = 36 меВ, ϵ_i^Δ (P) = 41 меВ, ϵ_i^Δ (As) = 45 меВ, та $\epsilon_{omm} = 37$ меВ маємо: ϵ_i^Δ (As) > ϵ_i^Δ (P) > ϵ_{omm} > ϵ_i^Δ (Sb). Наведене співвідношення підтверджує припущення про природу максимуму на залежностях полів ударної іонізації від прикладеного одновісного тиску $E_{np} = f(X)$, який спостерігається для домішок As і P в Ge.

Визначено енергію іонізації основного стану домішкового рівня атомів P в Ge, зв'язаного з Δ_1 - долинами: ϵ_i^Δ (P) = (41 ± 2) меВ.

Раніше при розгляді явища ударної іонізації мілких домішок в германії вважали, що домінуючим механізмом розсіювання носіїв струму є розсіювання на акустичних коливаннях ґратки, а вплив на формування функції розподілу втрати енергії іонізуючого електрона в процесі ударної іонізації не враховувався.

Однак, характерною особливістю ударної іонізації мілких донорів в Ge є те, що при низьких температурах в чистих кристалах іонізуючий електрон може набрати необхідну для іонізації нейтрального атома домішки енергію практично без зіткнень з коливаннями ґратки та з невеликою кількістю вже іонізованих атомів. В результаті акту ударної іонізації обидва електрона (вільний і з рівня) опиняються на дні зони провідності і знову без зіткнень розганяються в електричному полі до порогової енергії іонізації. Таким чином, виконуються умови, коли функція розподілу електронів набуває різко анізотропний вигляд.

Проведений аналіз ударної іонізації мілких донорів показує, що у випадку X || [111] в германії значну роль відіграють процеси рекомбінації та втрата енергії і імпульс в процесі зіткнення електрона з атомом, що іонізується. Більш того, саме цими процесами й визначається формуван-

ня функції розподілу електронів. Завдяки вказаним процесам функція розподілу приймає голкоподібний вигляд - виникає стрімінг. Теоретичні оцінки, що співпадають з експериментальними даними по ударній іонізації мільких домішок в Ge для випадку $X \parallel [111] \parallel E$ підтверджують запропоновану модель.

У четвертому розділі подані результати дослідження анізотропії тензоефектів в γ -опроміненому n-Si.

Представлено результати вимірів і аналіз залежностей $\rho_x/\rho_0 = f(X)$ для звичайних (вирощених за методом Чохральського і легованих з розплаву) і нейтроно-легованих фосфором кристалів кремнію n-типу при $X \parallel [001]$ і $T = 78$ К.

Доведено, що особливості залежностей $\rho_x/\rho_0 = f(X)$ нейтроно-легованого n-Si<P> ($T = 78$ К) пов'язані з наявністю додаткового механізму тензорезистивного ефекту, обумовленого збільшенням концентрації електронів в зоні провідності для випадку сильних напрямлених тисків $X \parallel [001]$.

Вплив шаруватих періодичних неоднорідностей на кінетичні ефекти в вихідних і компенсованих γ -опроміненніях монокристалах n-Si вивчався за допомогою дослідження ефекту поздовжнього п'єзоопору. При високому напрямленому тиску (який сягав значень 0.8 ГПа ($8000 \text{ кГ} \cdot \text{см}^{-2}$)) досліджувались серії зразків n-Si<P>, вирощених в напрямку $[001]$, і орієнтованих вздовж та перпендикулярно до напрямку росту, що дозволило вивчати тензорезистивні властивості нейтроно-легованого кремнію в еквівалентних кристалографічних напрямках $[100]$ і $[001]$ та порівняти їх з відповідними даними для кремнію, легovanого домішкою фосфору з розплаву.

На основі того, що в γ -опроміненому нейтроно-легованому n-Si<P> не спостерігалось великої анізотропії поздовжнього тензорезистивного ефекту для еквівалентних напрямків, одержано безпосереднє підтвердження механізму сильної анізотропії тензорезистивних властивостей (для еквівалентних напрямків), яка має місце в γ -опроміненому Si, легovanому фосфором під час вирощування, і яка дійсно пов'язана з неоднорідною компенсацією нерівномірно розподіленої домішки фосфору радіаційними дефектами акцепторного типу, які утворюються під час γ -опромінення матеріалу.

На основі даних холлівських вимірів одержано інформацію як про енергію іонізації рівня радіаційного походження, що пов'язаний з дією γ -опромінення, так і про коефіцієнт зміни його положення відносно дна зони провідності під дією напрямленого тиску. Знайдена таким чином величина енергії іонізації дефекту радіаційного походження (так звано-

го А-центра) γ -опроміненого зразка з вихідною концентрацією домішки фосфору $7.24 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, виявилась рівною: $\epsilon_c = 0.14 \text{ eV}$.

Значення коефіцієнта зміщення такого енергетичного рівня із зміною напрямленого тиску, орієнтованого вздовж напрямку [100] визначено за зміною нахилу залежності $\ln n = f(1/T)$ під впливом тиску 0.8 ГПа і дорівнює: $\alpha = 45 \text{ мЕВ/ГПа}$.

На основі аналізу експериментальних даних з вивчення явищ транспорту у напрямлено-деформованих кристалах нейтроно-легованого та γ -опроміненого Si доведено, що нейтроно-легований n-Si слід вважати більш радіаційно стійким відносно γ -опромінення порівняно з Si, що легується фосфором під час вирощування з розплаву. Такі ж параметри n-Si, який легується різними методами, як: анізотропія розсіювання, анізотропія часу релаксації, пружні константи, константи деформаційного потенціалу в таких матеріалах в межах точності експерименту та точності методів їх визначення збігаються.

П'ятий розділ присвячений дослідженню тензоефектів в сильно деформованих кристалах p-Ge та p-Si.

В зв'язку з тим, що при одновісній деформації в валентній зоні германію і кремнію відбувається докорінна перебудова енергетичного спектру дірок, дані про анізотропію розсіювання дірок можна одержати (на відміну від n-Ge чи n-Si) тільки на основі вимірів як поздовжнього, так і поперечного (відносно напрямку деформації) п'єзоопору.

Найбільш помітний внесок в тензоефекти p-Ge вносить перебудова енергетичного спектру валентної зони, яка супроводжується перетворенням ізоенергетичних поверхонь у вигляді деформованих сфер (в недеформованих кристалах) в еліпсоїди обертання (при $X \parallel [111]$ і $X \parallel [001]$), або трьохвісні еліпсоїди (у випадку $X \parallel [110]$ з анізотропією ефективних мас, які характеризуються нерівністю $m_{\perp} > m_{\parallel}$ для нижньої (по енергії) розщепленої валентної зони і $m_{\parallel} > m_{\perp}$ для верхньої валентної зони).

На основі експериментальних даних отримано значення параметра анізотропії рухливості дірок в сильно деформованих кристалах p-Ge. Знайдені значення параметра анізотропії часу релаксації ($k_r = k_m/k$) помітно відрізняються як для різних орієнтацій напрямку деформації в кристалі з однаковою концентрацією іонізованих розсіюючих центрів, так - і для кристалів з різною концентрацією домішки, але при одній і тій самій орієнтації напрямку деформації.

Таким чином, отримані дані свідчать про те, що анізотропія розсіювання носіїв струму безпосередньо визначається як анізотропією їх енергетичного спектру, яка визначає анізотропію ефективних мас, так і анізотропними властивостями самих, розсіюючих носіїв струму, дефектів.

Розглянуто особливості п'єзоопору кристалів p-Si, з різною концентрацією легуючої домішки. В роботі представлені результати вимірів поздовжнього ($X \parallel J$) і поперечного ($X \perp J$) питомого опору зразків p-Si від величини прикладеної одновісної деформації для випадків $X \parallel [111]$, $X \parallel [110]$ та $X \parallel [001]$.

Характерною особливістю залежностей $\rho_x/\rho_0 = f(X)$ в p-Si як для поздовжньої, так і для поперечної орієнтацій, є відсутність насичення п'єзоопору в області високих тисків. Очевидно, ця особливість пов'язана із значним впливом на перебудову зонного спектру валентної підзони, відщепленої спин-орбітальною взаємодією, так як у випадку p-Si величина спин-орбітального розщеплення незначна ($\Delta = 0.044$ eV) і порівняна з величиною розщеплення зон "легких" і "важких" дірок при сильних деформаціях. В зв'язку з цим при досягненні значних механічних напруг перебудова валентної зони не завершується і за рахунок цього поздовжня і поперечна компоненти ефективної маси із збільшенням механічної напруги продовжують зменшуватись. Визначено, що збільшення концентрації легуючої домішки, яке приводить до зростання відносної долі "легких" дірок в недеформованому кристалі, приводить до більш ефективного росту залежностей питомого опору від механічної напруги, що свідчить про більш значний внесок в тензоефекти переселення носіїв струму із зони "легких" в зону "важких" дірок.

Визначено залежності величини параметра анізотропії рухливості дірок від механічної напруги для випадків $X \parallel [111]$ та $X \parallel [001]$ в зразках з різною концентрацією легуючої домішки. На всіх залежностях значень параметра анізотропії від тиску не спостерігається насичення. Таким чином, перебудова зонного спектру в широкому діапазоні механічних напруг приводить не тільки до зменшення величини компонент ефективних мас дірок m_{\parallel} та m_{\perp} , але й до зміни анізотропії розсіювання. При цьому для різної орієнтації напрямку деформації ці зміни якісно відрізняються. Якщо для орієнтації $X \parallel [001]$ ізоенергетична поверхня представляє собою фігуру, форма якої майже не відрізняється від ізотропної, то для орієнтації $X \parallel [111]$ ця поверхня є сильно анізотропною і змінюється в залежності від величини прикладеної одновісної пружної деформації.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Експериментально обґрунтовані оригінальні методи, методики та пристрої для досліджень поздовжнього та поперечного тензоефектів і ударної іонізації домішок в умовах екстремально високих напрямлених тисків.
2. На основі аналізу даних досліджень ударної іонізації і розігріву електронів в сильно деформованих кристалах n-Ge встановлено внесок в

- явища переносу при низьких температурах еквівалентних і нееквівалентних долин зони провідності.
3. Досліджено закономірності та встановлено механізми зміни полів ударної іонізації при сильних одновісних пружних деформаціях кристалів Ge, легованих домішками Sb, P, As в умовах інверсії типу абсолютного мінімуму зони провідності германію ($L_1 - \Delta_1$ - інверсія). Показано, що значна зміна параметрів зони провідності, яка пов'язана з інверсією типу абсолютних мінімумів, обумовлює виникнення низки характерних особливостей залежностей полів ударної іонізації від напрямленого тиску. Встановлено, зокрема, що внаслідок приблизно чотирикратного збільшення енергії іонізації мілких (воднеподібних) донорів в Ge в результаті $L_1 - \Delta_1$ - інверсії, непружне розсіювання іонізуючих електронів на оптичних фононах обумовлює виникнення максимуму на залежностях $E_{np} = f(X)$ для домішок P та As.
 4. Встановлено внесок двох конкуруючих механізмів міждолинного перерозподілу носіїв струму, пов'язаних з напрямленим тиском та нееквівалентним розігрівом електронів в умовах ударної іонізації мілких домішок Sb, P, As в германії для $X \parallel [111] \parallel E$.
 5. Експериментальні дані та теоретичні оцінки свідчать, що в умовах низькотемпературної ударної іонізації мілких домішок в напрямлено деформованому p-Ge вигляд функції розподілу носіїв струму приймає сильно витягнутий (анізотропний) вигляд - виникає стрімінг.
 6. Порівняльний аналіз експериментальних даних досліджень поздовжнього тензоефекту в γ -опромінених кристалах Si, легованого фосфором як під час вирощування, так і методом трансмутаційного легування, дозволив однозначно встановити природу високої анізотропії такого ефекту для еквівалентних кристалографічних напрямків в γ -опроміненому кремнії, легованому фосфором під час вирощування.
 7. На основі експериментальних даних досліджень тензоефектів в сильно деформованих кристалах p-Ge та p-Si наочно підтверджено основне положення теорії анізотропного розсіювання щодо вирішальної ролі анізотропії ефективних мас носіїв заряду в виникненні анізотропії їх розсіювання.
 8. Показано, що в p-Si відсутність насичення поздовжнього та поперечного тензоефектів в області сильних одновісних пружних деформацій кристалів, орієнтованих в головних кристалографічних напрямках, пов'язана з малим значенням спин-орбітального розщеплення та залежністю його від тиску X.

Основні результати дисертації опубліковані в роботах:

1. Горін А.С., Дмитренко М.М., Єрмаков В.М., Коломоєць В.В., Панасюк Л.І., Федосов А.В., Хіврич В.І. Вплив сильної напрямленої де-

- формації на властивості нейтроно-легованого γ -опроміненого кремнію // УФЖ. - 1994. - Т.39. - №5. - С.636-640.
2. Baidakov V.V., Ermakov V.N., Gorin A.E., Kolomoets V.V., Shenderovskii V.A. Non-Trivial Transport Phenomena in Extremely Strained Silicon and Germanium Crystals // J.Phys. Chem. Solids. - 1995. - V.56. - №3/4. - P.319-322.
 3. Горин А.Е., Ермаков В.Н., Коломоец В.В. Междолинное перераспределение электронов при ударной ионизации мелких доноров в одноосно деформированном Ge // ФТП. - 1995. - Т.29. - №4. - С.615-620.
 4. Baidakov V.V., Ermakov V.N., Gorin A.E., Kolomoets V.V., Stuchinska N.V., Shenderovskii V.A. and Tunstall D.P. Metal-Insulator Transition in Degenerately Doped Si and Ge Under High Uniaxial Pressure // Phys. Stat. Sol.(b). - 1996. - V.198. - №1, the Proceedings issue of HPSP VII.
 5. Baidakov V.V., Ermakov V.N., Gorin A.E., Kolomoets V.V., Shenderovskii V.A. Mechanisms of the MI Transition in High Strained n-Si and n-Ge Crystals // Abstracts of the Joint XV AIRAPT & XXXIII EHPRG International Conference on "High Pressure Science & Technology". - Warsaw, Poland. - September 11-15, 1995. - 366/ThP-R13.
 6. Baidakov V.V., Ermakov V.N., Gorin A.E., Grigor'ev N.N., Kolomoets V.V., Kudykina T.A., Stuchinska N.V., Shenderovskii V.A. Low-Temperature Impurity Breakdown. Model of Streaming // Abstracts of the 23-rd International Conference on the Physics of Semiconductors. - Berlin, Germany. - July 21-26, 1996. - ThP-165.
 7. Baidakov V.V., Ermakov V.N., Gorin A.E., Kolomoets V.V., Stuchinska N.V., Shenderovskii V.A. and Tunstall D.P. High Uniaxial Pressure Methods for Semiconductor Parameter Determination // Abstracts of the Seventh International Conference on "High Pressure Semiconductor Physics". - Schwabisch-Gmund, Germany. - July 28-31, 1996. - P.37.

SUMMARY

Gorin A.E. Investigation of the anisotropy of tensor resistivity effects in high strained Ge and Si crystals (manuscript).

The dissertation advanced for a degree of Philosophy Doctor in the speciality 01.04.10 - Semiconductor and Insulators Physics, Institute of Semiconductor Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 1996.

The work includes the investigation attributed to relationships and mechanisms of the transport phenomena due to the anisotropy of energy spectra and the scattering anisotropy of the charge carriers in high strained n-Si, p-Si, n-Ge, p-Ge crystals. The analysis of data of investigations of the shallow donors (Sb, P, As) impact ionization in high strained Ge allowed to determine of dominant mechanisms of the impact ionization field change which determine by the fundamental differences of the energy band structure transformation for the various orientations of the axis pressure. In order to determine unambiguously the nature of high anisotropy of tensor resistivity of γ -irradiated silicon doped by phosphorus at growing time the high uniaxial pressure tensor resistivity of the transmutation doped γ -irradiated n-Si<P> was investigated. The experimental investigation of the tensor resistivity anisotropy in high strained p-Si and p-Ge crystals was realized for the principle crystallographic orientations. The characteristic properties of the longitudinal and transverse tensor resistivity of p-Si and p-Ge in high strain range which relate to the difference in the valence energy bands structure of silicon and germanium were examined.

АННОТАЦИЯ

Горин А.Е. Исследование анизотропии тензорезистивных эффектов в сильно деформированных кристаллах Ge и Si (рукопись).

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников и диэлектриков, Институт физики полупроводников НАН Украины, Киев, 1996 г.

Диссертация содержит исследования закономерностей и механизмов кинетических явлений, обусловленных анизотропией энергетического спектра и анизотропией рассеивания носителей заряда в сильно деформированных кристаллах n-Si, p-Si, n-Ge, p-Ge. Анализ результатов исследований ударной ионизации мелких доноров Sb, P, As в сильно деформированном германии позволил определить доминирующие механизмы изменения полей ударной ионизации примесей, кото-

рые определяются принципиально различным характером трансформации зонного спектра для разных направлений ориентации оси деформации. Однозначно определена природа высокой анизотропии для эквивалентных кристаллографических направлений продольного тензорезистивного эффекта в γ -облученном кремнии, легированном фосфором при выращивании кристаллов. Реализованы исследования анизотропии тензорезистивных эффектов в сильно деформированных p-Si и p-Ge, результаты которых позволили объяснить характерные особенности исследованных закономерностей, которые связаны с различием энергетической структуры валентных зон кристаллов кремния и германия.

Ключові слова: напівпровідники, зонна структура, явища переносу, тензорезистивний ефект, сильна деформація, анизотропія, ударна іонізація, γ -опромінення.

В. Зорин

АННОТАЦИЯ

Торн А. Е. Исследования анизотропии тензорезистивных эффектов в сильно деформированных кристаллах Ge в γ (русский).

Изучены анизотропия тензорезистивных эффектов в сильно деформированных кристаллах Ge в γ (русский). Исследования выполнены в рамках программы исследований НАН Украины.

Изучены анизотропия тензорезистивных эффектов в сильно деформированных кристаллах Ge в γ (русский). Исследования выполнены в рамках программы исследований НАН Украины.

435851

Ав 37.128

Підписано до друку 03.01.97. Формат 60x84/16. Папір друк. №1.
Друк офсети. Умовн. друк. арк. 1,0. Обл.-вид. арк. 1,0.
Умовн. фарб. відб. 1,1. Тираж 100. Зам. 1.

Машинно-офсетна лабораторія Львівського держуніверситету
Ім. І.Франка. 290602 Львів, вул. Університетська, 1.