

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ ФІЗИКИ НАПІВПРОВІДНИКІВ

На прерах рукопису

КОЗЛОВСЬКИЙ СЕРГІЙ ІВАНОВИЧ

ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕНОСУ НОСІВ ЗАРЯДУ У НАПІВПРОВІДНИКОВИХ  
КРИСТАЛАХ КУБІЧНОЇ СИНГОНІЇ З НАВЕДЕНОЮ АНІЗОТРОПІЄЮ  
ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ.

01.04.10 - фізика напівпровідників та діелектриків

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора фізико-математичних наук

Київ - 1985

587. 226

7855.277

Дисертацією є рукопис.  
Робота виконана в Інституті фізики НАН України.  
Офіційні опоненти:

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00761421 (L)

доктор

доктор фізико-математичних наук, професор  
ГРИБНІКОВ Зіновія Самоялович,  
доктор фізико-математичних наук, професор  
САРБЕЙ Олег Георгієвич.

Провідна організація: Інститут радіофізики і електроніки  
НАН України, м.Харків

Заявист відбудеться "24" XI 1995р. о 14 год. 15 хв.  
на засіданні спеціалізованої ради Д 50.07.01 при Інституті  
фізики напівпровідників НАН України за адресою:

252650 м.Київ-28, проспекту Науки, 45.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту  
фізики напівпровідників НАН України за адресою:

252650 м.Київ-28, проспекту Науки, 45.

Автореферат розісланий "14" X 1995р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

ІШЕНКО С.С.

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ.

Актуальність теми: Як відомо, усі напівпровідникові кристали кубічної сингонії характеризуються досить складним енергетичним спектром носіїв струму і тому їх електронні властивості набагато ширші відповідних властивостей модельного напівпровідника з енергетичним спектром, подібним до спектру вільних електронів. У кубічному напівпровіднику є декілька груп електронів (дірок), що характеризуються анізотропною ефективною масою з різною орієнтацією осей анізотропії. Так електрони зони провідності германію та кремнію локалізуються у околах окремих, віддалених один від одного мінімумів енергії (долинах), а вільні дірки розміщуються біля краю валентної зони, де залежність енергії від хвильового вектору визначається кількома гілками з ефективною масою, що залежить від напрямку. Подібну будову енергетичних зон мають і інші відомі у наш час кубічні напівпровідники, так що їх електричні властивості характеризуються прихованою анізотропією, яка у багатьох випадках стає явною під дією різноманітних направлених збурень, прикладених до кристалу.

Збудження макроскопічної анізотропії електропровідності традиційно супроводжує більшість експериментальних досліджень у основних областях фізики та техніки напівпровідників (явища переносу, нерівноважні процеси). Тому не дивно, що саме із збудженням штучної анізотропії провідності пов'язано багато фундаментальних відкриттів та найбільш ефективні методи досліджень напівпровідників. А саме: усі гальваномагнітні явища повністю базуються на уявленні про анізотропію, що створюється сумісною дією електричного та магнітного полів, а фізику гарячих електронів неможливо собі уявити без серії надзвичайно важливих ефектів, обумовлених анізотропією електропровідності, що наведена грючим електричним полем.

Різноманітність природи (способів отримання) штучної анізотропії електропровідності кристалів визначає виключну широту використання пов'язаних з нею ефектів. При цьому особливо важливу роль грають так звані "поперечні" ефекти, що

обумовлені головною особливістю анізотропії провідності - неспівпадінням у загальному випадку напрямків електричного струму та поля, що у кінцевому наслідку веде до поперечного переносу носіїв заряду. Класичними прикладами таких ефектів є, зокрема, ефект Хола та фотемагнітний ефект Кікоїна-Носкова, а також їх аналоги - поперечна тензоерс та поперечний ефект Дембера у випадку анізотропії, наведеної пружною деформацією кристалу. Обидві пари вказаних ефектів, як відомо, досить ефективно використовуються у техніці фізичного експерименту (знаходження основних кінетичних і рекомбінаційних параметрів напівпровідників), а також визначають принцип дії багатьох перетворювачів фізичних величин (датчики магнітного поля, переміщення, сили, тиску, прискорення та інші).

Хоча на початку 80-х років загальні властивості ефектів, обумовлених поперечним переносом носіїв струму у анізотропних напівпровідниках, були достатньо добре вивчені, залишався ряд важливих питань, пов'язаних в основному, з новими способами збудження анізотропії та використанням на практиці вказаних ефектів. Так, зокрема, мало вивченими були можливості виникнення поперечних фотовольтаїчних ефектів в умовах збудження кристалу потужними імпульсами лазерного випромінювання. Між тим, виходячи із загальних міркувань, можна було сподіватись, що саме на основі визначення та детального аналізу особливостей характеристик таких ефектів виникне можливість подальшого суттєвого прогресу у розумінні складних процесів у просторі і часі, які супроводжують імпульсну модифікацію властивостей кристалів, лазерну технологію виготовлення та обробки напівпровідникових матеріалів.

З другого боку, на початок виконання даної роботи дуже мало дослідженими залишались також можливості використання поперечних тензо ефектів у таких важливих напівпровідникових приладах, як сучасні інтегральні перетворювачі механічних величин. Так перша згадка про створення найпростішого інтегрального перетворювача на основі поперечної тензоерс у кремнії відноситься до 1980 року. Що стосується інтегральних тензоперетворювачів, принцип дії яких базується на біполяр-

ному поперечному переносі носіїв струму, то яких-небудь відомостей про можливість їх створення методами мікроелектронної технології взагалі не було.

З урахуванням вищенаведеного визначались основні задачі та мета дисертаційної роботи. Виходячи з концепції поперечного переносу носіїв заряду у напівпровідниках з анізотропною електропровідністю, було необхідним:

-провести теоретичний аналіз та детальне експериментальне вивчення характеристик поперечних фотовольтаїчних ефектів, наведених у кристалах кубічної сингонії імпульсами світла великої потужності, а потім, на основі отриманих результатів, розробити нові методи дослідження світлонаведених процесів, супроводжуваних лазерну технологію обробки напівпровідникових матеріалів;

-з метою розвитку фізико-технологічних основ сучасних перетворювачів механічних величин вважалось необхідним зробити всебічне (теоретичне та експериментальне) дослідження особливостей поперечного переносу носіїв струму у різних (у тому числі інжекційних) тензочутливих структурах, які виготовляються методами інтегральної технології, та на основі цих досліджень запропонувати оптимізовані конструкції нових інтегральних датчиків тиску, що мають переваги перед відомими.

У відповідності з цим дисертація складається з двох частин, тісно пов'язаних між собою спільним підходом до рішення поставлених задач, який визначається розглядом з однієї точки зору явищ переносу з наведеною зовнішнім збудженням анізотропією електропровідності.

У першій частині дисертації викладені результати теоретичного та експериментального дослідження поперечних фотовольтаїчних ефектів (ПФЕ), а також (на основі характеристик останніх) теплових, деформаційних та концентраційних полів, що виникають у основних напівпровідникових кристалах (Si, Ge, GaAs) при їх імпульсному лазерному збудженні. Слід зазначити, що експериментальне дослідження ПФЕ дає змогу отримати інформацію про світлонаведені процеси у тонкому приповерхневому шарі напівпровідника при лазерному імпульсному

збудженні, яка, або не досяжна іншим, відомим методам досліджень (наприклад, оптичним), або суттєво їх доповнює.

Друга частина дисертації присвячена розробці фізико-технічних основ інтегральних датчиків тиску, принцип дії яких базується як на монополярних, так і біполярних ефектах у кремнії.

Сформульована мета досягалась рішенням таких задач:

- Теоретичним аналізом фізичного стану приповерхневого шару напівпровідникового кристалу при лазерному збудженні.

- Розробкою експериментальних методів реєстрації поперечних фотовольтаїчних ефектів в умовах збудження кристалу імпульсами світла наносекундної тривалості.

- Детальним (теоретичним та експериментальним) дослідженням процесів переносу носіїв заряду у пружнодеформованих кремнієвих планарних структурах.

Наукова новизна. Більшість представлених у дисертації результатів і у першу чергу всі основні, що наведені у наукових положеннях і виносяться на захист, були отримані пошуком уперше.

Практична цінність роботи визначається такими результатами.

- Теоретичні дослідження основних характеристик поперечних фотовольтаїчних ефектів та їх порівняння з експериментальними результатами створюють науковий базис для аналізу теплових, концентраційних та деформаційних полів у напівпровідникових кристалах при лазерному збудженні.

- Розвинуті фотовольтаїчні методи визначення рекомбінаційних та кінетичних параметрів нерівноважних носіїв заряду у приповерхневих шарах напівпровідникових кристалів в умовах імпульсного лазерного збудження.

- Розроблення та оптимізованія ряд чутливих елементів інтегральних датчиків тиску на основі кремнію.

Рівень реалізації, впровадження наукових розробок.

Отримані результати дозволяють приступити до створення нових ефективних типів інтегральних датчиків механічних параметрів на основі кремнію, що мають переваги перед відомими-

ми. Інтегральні датчики тиску на основі ефекту поперечної тензоерс вже зараз використовуються в ряді галузей господарства України. Фотовольтаїчний метод дослідження фізичних процесів у напівпровідникових кристалах при лазерному збудженні може бути використаний для оптимізації технологічних режимів лазерної обробки напівпровідників.

Основні положення, які виносяться на захист:

I. Природа та механізми поперечних фотовольтаїчних ефектів (ПФЕ) у кристалах германію, кремнію, арсеніду галію, що виникають при їх збудженні імпульсним лазерним випромінюванням наносекундної тривалості, пов'язані з наведеною анізотропією провідності.

-У пластинах германію, які вирізані під гострим кутом до головних кристалографічних напрямків, по мірі зростання інтенсивності збуджуючого світла послідовно спостерігаються такі типи ПФЕ: міждолинно-дифузійний, фототермопружно-дифузійний, фототермопружно-дрейфовий, та в умовах збудження екстремальними інтенсивностями (при  $G > 10^{26}$  кв/см<sup>2</sup> · с), може виникати фототермопружно-дифузійний ПФЕ, що обумовлений розширенням виродженої електрон-діркової плазми.

Міждолинно-дифузійний ПФЕ виникає при умовно малих інтенсивностях світла ( $G < 10^{23}$  кв/см<sup>2</sup> · с) і обумовлений дифузією нерівноважних носіїв заряду у приповерхневому шарі кристалу з анізотропією електропровідності, що наведена дифузійним міждолинним перезаселенням електронів.

Фототермопружно-дифузійний ПФЕ домінує при інтенсивностях збуджуючого випромінювання  $G > 10^{23}$  кв/см<sup>2</sup> · с та обумовлений дифузією нерівноважних носіїв заряду у приповерхневому шарі кристалу, де анізотропію електропровідності створюють фото-і термопружні напруження, які виникають внаслідок неоднорідних розподілів температури кристалічної ґратки та генерованих світлом носіїв струму.

Природа фототермопружно-дрейфового ПФЕ пов'язана з дрейфом нерівноважних носіїв заряду у наведеному збуджувачим випромінюванням варізонному полі. Варізонне поле виникає внаслідок неоднорідного нагріву приповерхневого шару напівпро-

відникового кристалу світлом та обумовлено зміною у ньому ширини забороненої зони напівпровідника. Анізотропію електропровідності створюють фото- та термопружні напруження.

-У пластинах кремнію, вирізаних під гострим кутом до головних кристалографічних напрямків, у широкому діапазоні інтенсивностей збуджуючого світла (до  $G < 10^{25}$  кв/см<sup>2</sup> · с) домінує міждолинно-дифузійний ПФЕ.

-У напівпровідникових кристалах Ge, Si та GaAs, розміщених у магнітному полі, у широкому діапазоні інтенсивностей світла спостерігається фотомагнітний ефект Кікоїна-Носкова, а при великих ( $G > 10^{25}$  кв/см<sup>2</sup> · с), у кристалах GaAs спостерігається термомагнітний ефект Нернста-Еттингсгаузена, що обумовлений неоднорідним розігрівом кристалічної ґратки.

2. Методика визначення міждолинних релаксаційних параметрів електронів (час міждолинної релаксації електронів в об'ємі та швидкість цього процесу на поверхні) у кристалах германію та кремнію, а також знайдені таким чином значення міждолинних релаксаційних параметрів у цих кристалах при кімнатній температурі.

3. У пластинах кремнію, які вирізані у площині (100), виникають ефекти просторових перерозподілів електричного потенціалу та концентрації інжектованих носіїв заряду при одноосній пружній деформації у кристалографічному напрямку [110]. Ефекти обумовлені наведеною деформацією анізотропією електропровідності.

4. Оптимізовані моделі, топологія та режими роботи нових типів чутливих елементів інтегральних датчиків механічних параметрів на основі кремнію. Серед них: кільцеві структури з монополярною провідністю в умовах однорідного та неоднорідного (лінійно змінного) розподілів одноосної пружної деформації, тензотранзистори з радіально симетричним та однорідним розподілами електричного поля в базовій області.

5. Визначення фізичного механізму, який обумовлює додатковий внесок у температурну залежність вихідного сигналу інтегральних датчиків тиску на основі поперечних тензоефектів. Природа механізму пов'язана з внутрішніми, температурозалеж-

ими пружними напруженнями у мембрані датчика, що можуть виникати при виготовленні чутливого елемента, складанні та корпусуванні.

Апробація роботи: Матеріали дисертації доповідались на X, XII Всесоюзних конференціях по фізиці напівпровідників (Мінськ, 1985, Київ, 1990), VI, VII Всесоюзних конференціях по взаємодії оптичного випромінювання з речовиною (Ленінград, 1988, 1990), II Всесоюзній нараді "Фізико-хімія взаємодії іонного та фотонного випромінювання з поверхнею твердих тіл" (Москва, 1988), VII Всесоюзному симпозиумі "Плазма і нестійкості струму у напівпровідниках" (Паланга, 1989), Міжнародній школі "Лазерна мікрообробка поверхні" (Ташкент, 1989), Научно-технічному семінарі "Мікроелектронні датчики" (Ульянівськ, 1988), Всесоюзній конференції "Мікроелектронні датчики у машинобудуванні" (Ульянівськ, 1990), IV науково-технічній конференції по електронним датчикам "Сенсор - 91" (Ленінград, 1991), наукових зборах Інституту фізики напівпровідників НАН України, присвячених пам'яті В.Є.Лашкарьова.

Публікації. По темі дисертації опубліковано 34 роботи, у тому числі 5 авторських свідоцтв на винахід і 7 тез доповідей на наукових конференціях, симпозиумах та семінарах.

Особистий внесок автора. Викладені у дисертації наукові результати є частиною широкої програми "Дослідження анізотропії нерівноважних процесів у напівпровідникових матеріалах та розробка нових приладів", у якій автор брав участь спочатку під керівництвом проф. В.О.Романова і докт. фіз.-мат. наук І.П.Жадько, а з 1982 року - самостійно. Автору належить ведуча роль у ставленні експериментальних методів досліджень, їх проведенні, інтерпретації та узагальненні отриманих результатів. Всі теоретичні розрахунки, окрім тих, що відзначені у тексті дисертації окремо, виконані автором. Частина результатів, які увійшли до дисертації, отримана у творчій співдружності із співробітниками ІФН НАН України та інших галузевих підприємств і наукових інститутів.

Структура дисертаційної роботи. Дисертація складається з вступу, двох частин, дев'яти розділів, додатку і загальних

висновків. Вона викладена на 258 сторінках і містить 49 ілюстрація та список літератури, який включає 201 найменування.

### ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дана загальна характеристика роботи: обґрунтовані актуальність теми та об'єктів досліджень, мета роботи, її наукове та практичне значення; сформульовані положення, які виносяться на захист.

Перша частина дисертації присвячена дослідженню поперечних фотовольтаїчних ефектів, що виникають у напівпровідникових кристалах кубічної сингонії при їх міжзонному збудженні світлом. Фотовольтаїчні ефекти розглянуті послідовно, у відповідності з тим, як вони виникають з ростом інтенсивності збуджуючого світла. При умовно малих інтенсивностях у напівпровідникових пластинках германію та кремнію певної кристалографічної орієнтації виникає міждолинно-дифузійний ПФЕ. Результати його теоретичного та експериментального дослідження наведені у першому розділі дисертації (1-4).

Інтерес до вивчення міждолинно-дифузійного ПФЕ був висликаний перш за все можливістю визначення міждолинних релаксаційних параметрів електронів (часу міждолинної релаксації в об'ємі та швидкості цього процесу на поверхні) у кристалах германію і кремнію. Знання цих параметрів необхідне як для обчислення кінетичних коефіцієнтів, так і для оцінки характеристик ряду розмірних ефектів. Під час імпульсного ( $\approx 10^{-8}$ с) лазерного міжзонного збудження у тонкому приповерхневому шарі напівпровідника, де і формується ПФЕ, вдається досягти значних рівнів концентрації нерівноважних носіїв та її градієнту, тим самим істотно зменшити вплив "паразитних" фотоерс, пов'язаних із неоднорідностями легування та приповерхневого вигину зон. Ці переваги імпульсного збудження дозволяють підняти амплітуду фотоерс на 3-4 порядки порівняно із стаціонарним випадком і експериментально вивчати міждолинно-дифузійний ПФЕ у кристалах германію та кремнію.

У теоретичних роботах (11,12) було показано, що у напівпровідникових кристалах з багатодолинним енергетичним спект-

ром зони провідності, біполярна дифузія нерівноважних носіїв заряду може призвести до міждолинного перезаселення електронів у первісно рівнозаселених долинах. В результаті цього кристал стає анізотропним і у напрямку, перпендикулярному до градієнта концентрації, виникає фотоерс (поперечний фото-вольтаїчний ефект). Величина  $\eta$  визначається часом міждолинних переходів електронів у об'ємі та швидкістю їх міждолинної релаксації на поверхні. У згаданих теоретичних роботах обчислення основних характеристик міждолинно-дифузійного ПФЕ проведені для стаціонарного освітлення. Тому у першому параграфі цього розділу розглянуті особливості нестаціонарного збудження (коли тривалість імпульса світла набагато менша за час життя нерівноважних носіїв заряду). На основі обчислень отримані основні характеристики ПФЕ: залежність амплітуди і знаку поперечного поля від кристалографічної орієнтації зразка, швидкості поверхневої рекомбінації, коефіцієнта поглинання та інтенсивності світла.

Експериментальні дослідження ПФЕ проводились при кімнатній температурі на зразках кремнію та германію. За джерело світла використовувались лазери з модульованою добротністю на неодимовому склі та рубіні (довжина хвилі, мкм: 0.347, 0.53, 0.694, 1.06) і тривалістю імпульса світла 20 і 34 нс. Поверхні зразків з метою зміни швидкості поверхневої рекомбінації  $S$  піддавались різним обробкам (травлення у  $CP-4$ , механічне полірування, висадження золота із водного розчину та інше). При цьому досягались значення  $S$  у межах  $10^2 - 10^5$  см/с і  $10^4 - 10^6$  см/с для германію та кремнію відповідно. Контроль за величиною  $S$  проводився з допомогою вимірювання нестаціонарного фотомагнітного ефекту.

Як у кристалах германію, так і кремнію, ПФЕ мав однакову залежність від кристалографічної орієнтації зразка. При кутах вирізки  $\theta$  кратних  $\pi/4$ , відносно головних кристалографічних напрямків, ПФЕ був відсутній і досягав максимуму при  $\theta$  кратних  $\pi/8$ . При перенесенні світла на протилежну грань зразка фотоерс змінювала знак, але  $\eta$  абсолютне значення залишалось незмінним. Така залежність вказувала на безумовний

зв'язок досліджуваного ПФЕ з анізотропією електропровідності.

Далі на основі співпадіння обчислених та експериментальних значень поперечного поля міждолинно-дифузійного ПФЕ при різних величинах швидкості поверхневої рекомбінації, довжинах хвиль збуджуючого світла були визначені при кімнатній температурі час міждолинної релаксації електронів  $\tau$  та швидкість цього процесу на поверхні  $\sigma$ . Найкраще співпадіння отримано для таких значень  $\tau$  і  $\sigma$  [3,4]:

у кристалах кремнію  $\tau = 2.0 \cdot 10^{-11}$  с,  $\sigma = 1.3 \cdot 10^7$  см/с

у кристалах германію  $\tau = 8.7 \cdot 10^{-12}$  с,  $\sigma \leq 2.5 \cdot 10^8$  см/с.

Залежність поперечного поля міждолинно-дифузійного ПФЕ від інтенсивності світла була подібна до аналогічної залежності фотомагнітного ефекту. Спостерігалось лінійне зростання поля із збільшенням інтенсивності світла  $G$  при відносно малих рівнях  $G$  і його насичення при великих  $G$ , коли провідність зразка визначається фотопровідністю.

У діапазоні інтенсивностей світла  $G$  від  $10^{20}$  до  $10^{25}$  кв/см<sup>2</sup> · с у кристалах кремнію форма імпульса ПФЕ повторювала форму імпульса світла. Для зразків германію така ситуація зберігалась до  $G \leq 10^{23}$  кв/см<sup>2</sup> · с; при  $G > 10^{23}$  кв/см<sup>2</sup> · с імпульс ПФЕ деформувався і виникала зсунута у часі друга компонента оберненої полярності, яка по мірі зростання  $G$  ставала домінуючою, а перша практично зникала. Особливістю другої компоненти ПФЕ був брак насичення, характерного для фотомагнітного та міждолинно-дифузійного ефектів. Вивченню фізичної природи ефекту присвячений другий розділ дисертації.

У другому розділі представлені результати дослідження фототермопружно-дифузійного ПФЕ [5-9]. При великій інтенсивності світлової хвилі та скінченні глибини її поглинання у напівпровідниковому зразку встановлюються неоднорідні розподіли температури кристалічної ґратки та концентрації нерівноважних носіїв заряду, які обумовлюють його механічну деформацію. У кристалах кубічної сингонії деформація, окрім

всестороннього розтягування та стискання, веде до зниження симетрії кристалічної ґратки, у результаті чого електропровідність стає анізотропною. Біполярна дифузія нерівноважних фотоносіїв у межах анізотропної області обумовлює появу поперечного фотовольтаїчного ефекту.

Процес встановлення механічних напружень у часі протікає досить складно. Привертають увагу три випадки - стаціонарний ефект [5], при якому температура та концентрація нерівноважних носіїв встигають встановлюватися по всьому кристалу, самий початок нестаціонарного процесу [9], коли деформація відстає у часі від змін температури та концентрації нерівноважних носіїв, і нестаціонарний процес, коли запізненням деформації можливо знехтувати [6,7].

У першому параграфі цього розділу проведення теоретичний розгляд фототермопружно-дифузійного ПФЕ при збудженні кристалу стаціонарним світловим потоком, імпульсами світла наносекундної та субнаносекундної тривалостей. Визначені залежності поперечного поля від кристалографічної орієнтації зразка, умов охолодження та механічного закріплення, швидкості поверхневої рекомбінації на освітлюваній поверхні, довжини хвилі збуджуючого світла.

Стаціонарний ПФЕ розглянутий для двох випадків механічного закріплення напівпровідникової пластини: пластини з вільними краями та закріплена на підкладинці. Обчислення показують, що для пластини з вільними краями основний розігрів кристалу, який дає внесок у параметр анізотропії, виникає за рахунок тепла, що виділяється у процесі рекомбінації нерівноважних носіїв. Прямий нагрів кристалу світлом має місце у вузькому шарі товщиною порядку оберненого коефіцієнту поглинання, при цьому просторовий розподіл температури близький до лінійного, а лінійний розподіл не дає внеску у параметр анізотропії, який дорівнює різниці відносних анізотропій рухливостей електронів та дірок. Для пластини, закріпленої на підкладинці, внесок прямого нагріву досить значний, завдяки чому ПФЕ у цьому випадку більш ніж у 50 разів перевищує ефект у вільній пластині.

Нестационарний ефект розглянути для випадку, коли стаціонарні розподіли температури та нерівноважних носіїв струму не встигають встановлюватись, тобто час дифузії носіїв та тепла поперек пластини великий порівняно з тривалістю імпульсу світла  $t_i$ , але значення  $t_i$  досить велике, щоб не враховувати запізнення змін концентрації та температури від деформації (у кристалах германію це має місце для  $t_i \gg 10^{-10} \text{с}$ ).

На основі обчислень знайдені залежності величини поперечного поля ПФЕ від коефіцієнту поглинання, швидкості поверхневої рекомбінації на освітлюваній грані зразка, тривалості імпульса та довжини хвилі збуджуючого світла. Встановлено, що при малих значеннях швидкості поверхневої рекомбінації фототермопружно-дифузійний ПФЕ обумовлений анізотропією електропровідності, що виникає внаслідок фотострикції (механічної деформації кристалу при збудженні нерівноважних носіїв струму). При великих значеннях швидкості поверхневої рекомбінації ПФЕ обумовлений анізотропією провідності, яку створюють термопружні зусилля із-за неоднорідного нагріву зразка збуджувачим світлом. При цьому велика швидкість поверхневої рекомбінації у поєднанні з скінченною глибиною поглинання світла, веде до немонотонного просторового розподілу нерівноважних носіїв. Зміна знаку градієнту їх концентрації у анізотропному по електропровідності приповерхневому шарі, призводить до зміни знаку поперечного поля.

Далі розглянуті особливості фототермопружно-дифузійного ПФЕ в умовах збудження кристалів германію імпульсами світла субнаносекундної тривалості. Встановлено, що коли тривалість імпульса світла менша або наближається до характерних часів запізнення деформації від змін концентрації нерівноважних носіїв та температури ( $t_i \approx D_n/c^2 \approx 10^{-10} \text{с}$ ;  $D_T/c^2 \approx 10^{-12} \text{с}$ , де  $D_n$ ,  $D_T$  - коефіцієнти біполярної дифузії нерівноважних носіїв струму та температуропровідності відповідно,  $c$  - швидкість звуку) анізотропію електропровідності створює генерована світлом акустична хвиля. При цьому домінуючий внесок у

значення поперечного поля належить динамічним напруженням, що генерує нерівноважна електрон-діркова плазма під час дифузії.

Характерною рисою залежності поперечного поля  $E_x$  фототермопружно-дифузійного ПФЕ від інтенсивності світла є те, що поперечне поле не досягає насичення з ростом інтенсивності. При інтенсивностях світла, коли фотопровідність перевищує рівноважну провідність зразка, поле  $E_x$  змінюється пропорційно  $G$ .

На закінчення параграфу коротко розглянутих споріднених до фототермопружно-дифузійного ПФЕ - пружно-дифузійний ПФЕ [1]. Цей вид ПФЕ виникає при дифузії нерівноважних носіїв струму у тонкому приповерхневому шарі, де анізотропія електропровідності створена стаціонарними напруженнями. Такого роду механічна деформація виникає після певних поверхневих обробок (механічна поліровка, бомбардування іонами).

На основі обчислень знайдені аналітичні залежності величини поперечного поля пружно-дифузійного ПФЕ від швидкості поверхневої рекомбінації, товщини анізотропного шару, параметрів напівпровідника, інтенсивності світла. Показано, що для цього типу ПФЕ залежність  $E_x(G)$  подібна до аналогічної залежності міждолинно-дифузійного та фотоманітного ефектів ( $E_x$  насичується при великих інтенсивностях світла).

У другому параграфі викладені результати експериментальних досліджень фототермопружно-дифузійного та пружно-дифузійного ПФЕ. Дослідження поперечного поля ПФЕ проводились у залежності від кристалографічної орієнтації зразка, швидкості поверхневої рекомбінації, інтенсивності та довжини хвилі збуджуючого світла. Встановлено, що поперечне поле, що виникає у кристалах германію при інтенсивностях світла  $G > 10^{23}$  кв/см<sup>2</sup> · с, обумовлено фототермопружно-дифузійним ПФЕ. Цей ПФЕ, як і передбачалось теоретичними розрахунками, не спостерігається у кристалах кремнію (параметр анізотропії у кристалах Si в 50 разів менше, ніж у кристалах Ge).

Обчислені залежності поперечного поля від вищезгаданих

параметрів та його величина були близькі до отриманих на експерименті. Так, зокрема, у відповідності до теоретичного розгляду, знаки поля  $E_x$  при малих та великих швидкостях поверхневої рекомбінації  $S$  були протилежними. Зміна знаку з ростом  $S$  при інтенсивностях світла  $G > 10^{23}$  кв/см<sup>2</sup> · с, при яких домінує фототермопружно-дифузійний ПФЕ, узгоджується з теоретичними розрахунками, але інверсія знаку при  $G < 10^{23}$  кв/см<sup>2</sup> · с, при яких домінує міждолинно-дифузійний ПФЕ, знаходиться у протиріччі з теорією цього ефекту. Показано, що у цьому випадку обробка поверхні, з допомогою якої досягалась зміна  $S$ , веде до появи пружно деформованого приповерхневого шару. Тому при  $S = 10^5$  см/с, яка досягалась механічною полірувкою, та  $G < 10^{23}$  кв/см<sup>2</sup> · с, ми спостерігали пружно-дифузійний ПФЕ.

У третьому розділі розглянуті термопружно-дрейфовий та фототермопружно-дифузійний ПФЕ у кристалах германію при екстремальних інтенсивностях світла ( $10^{24}$  -  $2 \cdot 10^{26}$  кв/см<sup>2</sup> · с) [10 -12].

Експериментальні дослідження поперечного поля проводились у залежності від таких параметрів: кристалографічної орієнтації, інтенсивності  $G$  та тривалості імпульса світла (довжина хвилі  $1.06$  мкм,  $t_1 = 20, 40$  нс). Поперечне поле з ростом інтенсивності світла двічі змінювало знак при  $G \cong 4 \cdot 10^{24}$  та  $10^{26}$  кв/см<sup>2</sup> · с. Після першої зміни знаку електричне поле  $E_x$  росло пропорційно  $G^{1.5-1.7}$ , а після другої  $E_x$  зростало по закону  $G^{0.5-1}$ . Збільшення тривалості імпульса світла вело до зсуву точок інверсії на згаданія залежності у бік більших інтенсивностей. Поперечне поле нестационарного фотомагнітного ефекту, що вимірювався паралельно у цьому діапазоні інтенсивностей світла, практично не змінювалось.

На основі обчислень, наведених у другому параграфі цього розділу, показано, що при неоднорідному розігріві кристалу збуджуючим світлом у приповерхневому шарі виникає варизонна структура, утворена термічною зміною ширини забороненої зони

$E_g$ . У таких напівпровідниках, як Ge, Si, GaAs, вона зменшується з ростом температури кристалічної ґратки. Виникнення вартонного поля обумовлює біполярний дрейф нерівноважних носіїв до освітлюваної поверхні та збагачення ними приповерхневого шару кристалу. Зміна напрямку потоку нерівноважних носіїв у межах анізотропного шару (анізотропію електропровідності, як і раніше створюють термопружні зусилля), веде до інверсії знаку поперечного поля та виникнення термопружно-дрейфового ПФЕ. По мірі зростання інтенсивності світла, а значить і концентрації нерівноважних носіїв струму підвищується внутрішній тиск плазми (тиск Фермі). Якщо внутрішній тиск перевищить ефективні стискаючі зусилля, пов'язані у нашому випадку із зміною величини забороненої зони, то потік нерівноважних носіїв змінить свій напрямок, а фотоерс. - знак. Таким чином, в умовах екстремальних інтенсивностей світла експериментально спостерігається ПФЕ, обумовлений дифузійною звироднілою електрон-дірковою плазми (фототермопружно-дифузійний ефект).

У четвертому розділі розглянуті особливості фотомагнітного ефекту у кристалах арсеніду галія при великих інтенсивностях збуджуючого світла [13]. В ізотропній напівпровідниковій пластині з однаковою тривалістю життя електронів та дірок поперечне поле фотомагнітного ефекту лінійно зростає по мірі підвищення інтенсивності збуджуючого світла (світло вважається сильнопоглинаючим) при порівняно малих інтенсивностях і досягає насичення при великих, коли фотопровідність значно перевищує рівноважну провідність пластини. Теоретичні дослідження показують, що у цій області, залежно від механізмів рекомбінації та розсіювання нерівноважних носіїв, можливо спостерігати логарифмічний або ступінний ріст поперечного поля фотомагнітного ефекту з ростом інтенсивності збуджуючого світла. Лінійна з насиченням залежність  $E_x(G)$  спостерігалась нами при дослідженні фотомагнітного ефекту у ізолюючих кристалах арсеніду галія при  $G < 10^{25}$  кв/см<sup>2</sup> · с (довжина хвилі світла 0,53 мкм). Але при більших інтенсивностях світла поперечне поле зменшувалось з ростом  $G$  і при  $G$

$> 2 \cdot 10^{25}$  кв/см<sup>2</sup> · с поле змінювало знак. Дослідженню причин інверсії знаку поперечного поля, а також розгляду методики визначення рекомбінаційних параметрів з допомогою фотоманітного ефекту в умовах імпульсного освітлення присвячений цей розділ дисертації.

Обчислення величини поперечного поля фотоманітного ефекту проведені у наближенні двозонної моделі Кейна з урахуванням непараболічності зони провідності. Показано, що при великих інтенсивностях світла поряд з дифузійними струмами нерівноважних носіїв виникають термоструми, пов'язані з неоднорідним розігрівом кристалічної ґратки збуджуючим випромінюванням. З ростом інтенсивності світла внесок термострумів стає головним, що веде до інверсії знаку поперечного поля, тобто при великих інтенсивностях світла у кристалах арсеніду галія домінує поперечний термомагнітний ефект Нернста-Еттінгсгаузена. При цьому зміна знаку поперечного поля обумовлена двома факторами: термічною зміною ширини забороненої зони та непараболічністю зони провідності.

У п'ятому розділі проведені дослідження впливу складної механічної деформації (одноосне розтягування чи стискання в умовах чистого вигину) на особливості спектральних характеристик поперечного ефекту Дембера у кристалах германію [14]. Такого роду деформація найбільш поширена і неминуче виникає у напівпровідникових плівках, нанесених на підкладку, як у відсутності зовнішніх дій, так і при їх лазерній обробці, системах окисел-напівпровідник, МДН структурах тощо.

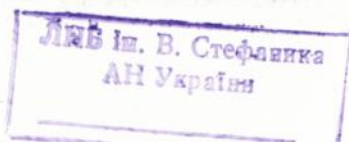
Проведені дослідження спектральної характеристики ПФЕ у пластинах з неоднорідним розподілом параметру анізотропії по її товщині у залежності від таких параметрів: довжини дифузійного зміщення нерівноважних носіїв струму, швидкостей поверхневої рекомбінації на освітлюваній та тильовій сторонах пластини, її товщини. Встановлено, що спектральні характеристики поперечного ефекту Дембера в умовах неоднорідної деформації істотно відрізняються від аналогічних характеристик фотоманітного ефекту і поперечного ефекту Дембера в однорідно анізотропних пластинах. Так, зокрема, при рівних

швидкостях поверхневої рекомбінації на освітлюванія та тило-  
вія гранях пластини у певному спектральному діапазоні послі-  
довне освітлення пластини з двох протилежних сторін не веде  
до зміни знаку поперечної ерс, тоді як у випадку однорідно  
анізотропного напівпровідника знак ефекту завжди змінюється  
на протилежний.

Отримані у першій частині роботи результати дозволяють у  
кожному конкретному випадку оцінити для наперед заданих зна-  
чень інтенсивності, довжини хвилі та тривалості імпульсу  
збуджуючого світла просторові розподіли та значення концен-  
трації нерівноважних носіїв заряду, температури кристалічної  
ґратки та механічних напружень, що виникають у напівпровідни-  
ковому кристалі під час його обробки лазером, а також  
прийняти до уваги можливі впливи наведеної анізотропії  
електропровідності на результати досліджень світлонаведених  
процесів іншими методами.

Друга частина дисертації присвячена дослідженню особли-  
востей поперечного переносу у напівпровідникових кристалах  
кремнію з анізотропією електропровідності, яка обумовлена  
пружною деформацією, та розробці на їх основі чутливих еле-  
ментів інтегральних перетворювачів механічних параметрів.  
Відомі типи чутливих елементів інтегральних п'єзорезистивних  
перетворювачів можна поділити на дві групи, що базуються на  
"монополярних" та "біполярних" ефектах, тобто формуються  
виключно на основних носіях заряду та на основних і неоснов-  
них носіях відповідно. До першої групи можливо віднести кон-  
струкції чутливих елементів, що розглянуті у першому розділі  
цієї частини.

У першому розділі викладені результати теоретичного та  
експериментального вивчення перерозподілу електричного по-  
тенціалу у первісно ізотропній напівпровідниковій пластині з  
кільцевими електродами в умовах анізотропії електропровід-  
ності, наведеної однорідною [15] та неоднорідною [16] одно-  
осними деформаціями. Кільцеві електроди утворюють омичний  
контакт з матеріалом пластини. Характерною особливістю ін-  
тегральних перетворювачів з чутливим елементом такого типу є



те, що для нього не є необхідною електрична ізоляція від матеріалу мембрани з допомогою р-п-переходу. Тому такі перетворювачі можуть бути використані в умовах підвищеної температури та рівня радіації, порівняно з відомими.

У відсутності механічної деформації екіпотенціальні лінії у пластині такої геометрії мають вигляд концентричних кіл з логарифмічною залежністю величини потенціалу від модулю радіуса-вектора. У анізотропному випадку (при накладанні деформуючих зусиль), коли анізотропія однорідна по площині кільця, вони будуть мати вигляд еліпсів, витягнутих у напрямку максимального значення електропровідності. Таким чином у ізотропному випадку різниця потенціалів між точками, що розміщені на заданому концентричному колі радіусом  $R$ , буде відсутня, але в умовах механічної деформації вона з'явиться. На основі теоретичного розгляду встановлена її залежність від кристалографічної орієнтації пластини, радіусів зовнішнього  $R_1$  та внутрішнього  $R_2$  електродів, положення точок на площині кільця. Показано, що при інших рівних умовах максимальна різниця потенціалів буде виникати між тими первісно екіпотенціальними точками, які лежать на напрямках головних компонент тензора електропровідності. Оптимальні співвідношення  $R_1/R_2$  і  $R/R_2$  дорівнюють 0.2 та 0.5 відповідно.

Для експериментальної перевірки результатів обчислень методами інтегральної технології були виготовлені датчики тиску на основі стандартних пластин кремнію n-типу. Чутливий елемент формувався у приповерхневому р-шарі пластини і був розміщений у центрі профільованої з двома жорсткими острівцями мембрани, яка трансформувала рівномірно розподілене по поверхні навантаження у одноосну деформацію її центральної частини. Отримані на цих структурах результати з точністю до експериментальної похибки узгоджувались з теоретичними.

У другому параграфі цього розділу розглянуто випадок неоднорідної (лінійної) зміни механічної деформації вздовж пластини та пов'язаної з нею анізотропії електропровідності. Такого роду деформація виникає у профільованій мембрані з

жорстким центром при рівномірному навантаженні поверхні. Інтерес до такої конструкції мембрани викликаний можливістю виготовлення на її основі датчиків тиску з підвищеною лінійністю навантажувальних характеристик.

Особливістю випадку неоднорідного (лінійного) розподілу механічної деформації є нетривіальний вигляд еквіпотенціальних ліній, що мають конфігурацію поворотної симетрії 3 порядку. Зокрема, максимальна різниця потенціалів буде виникати між тими первісно еквіпотенціальними точками, що лежать під кутом  $\pi/3$  по відношенню до головних напрямків тензора електропровідності. Оптимальні співвідношення  $R_1/R_2$  і  $R/R_2$  дорівнюють 0.5 та 0.75 відповідно. Різниця між аналогічними величинами для однорідного випадку обумовлена тим, що в умовах неоднорідного параметру анізотропії неефективною (з точки зору зміни потенціалу) є центральна частина кільцевої структури, де анізотропії електропровідності майже немає. Важливим є те, що для даної конструкції чутливого елемента датчика тиску знайдені такі оптимальні положення для розміщення вихідних електродів, при яких вона нечутлива до однорідної деформації, що може виникати при складанні та корпусуванні датчиків.

Перетворювачі, що базуються на монополярних ефектах, мають вихідний сигнал порядку декількох десятків мілівольт, у той же час рівень вхідних сигналів серійних аналогоцифрових перетворювачів досягає декількох вольт. У зв'язку з цим пошук принципів розробки первісних перетворювачів з підвищенням до кількох вольт вихідним сигналом вбачається головним у рішенні задач спрощення та підвищення надійності відповідних систем контролю та вимірювання.

Успішне рішення згаданої проблеми можливо досягти на основі датчиків, принцип дії яких базується на особливостях біполярного переносу носіїв струму у анізотропних напівпровідниках. Опис результатів дослідження таких приладів наведено у двох наступних розділах дисертації.

У другому розділі викладені комплексні теоретичні та експериментальні результати дослідження перерозподілу концент-

рації ін'єктованих носіїв струму у первісно ізотропну напів-провідникову пластину з кільцевими електродами в умовах її механічної деформації, що веде до утворення анізотропії електропровідності [17]. Нерівноважні носії ін'єктуються внутрішнім кільцевим електродом (емітером), а зовнішня електрод утворює омичний контакт з матеріалом пластини.

Теоретичний аналіз проведення у наступних наближеннях: квазінейтральності, малого рівня ін'єкції, відсутності анізотропії електропровідності основних носіїв струму, малих деформацій, коли параметр анізотропії значно менший одиниці. Показано, що первісний розподіл концентрації нерівноважних носіїв струму по площині пластини у цих умовах має радіальну симетрію, яка порушується при появі анізотропії електропровідності. При однорідній деформації пластини лінії однакової концентрації приймають вигляд еліпсів, витягнутих у напрямку максимальної рухливості нерівноважних носіїв струму. Таким чином, якщо на колі певного радіусу у межах пластини розмістити точкові колекторні p-n-переходи, що реєструють при їх включенні у зворотному напрямку концентрацію нерівноважних носіїв, то у відсутності деформації струми колекторів будуть однаковими і різницевого сигналу, який можна зняти з навантажувальних опорів у колах колекторів, при рівних інших умовах буде дорівнювати нулю. При деформації, що утворює анізотропію електропровідності, буде виникати зміна колекторних струмів, пропорційна зміні концентрації нерівноважних носіїв поблизу колекторів, а це означає, що на навантажувальних опорах з'явиться різницевого сигналу.

Обчислення зміни концентрації нерівноважних носіїв в умовах наведеної анізотропії електропровідності проведені у залежності від таких параметрів: кристалографічної орієнтації пластини, довжини біполярної дифузії нерівноважних носіїв  $L$ , різниці електричних потенціалів на кільцевих електродах, значення параметру анізотропії "a", геометричних розмірів пластини. Так, зокрема, найбільша відносна зміна концентрації нерівноважних носіїв при механічній деформації буде мати місце між точками на пластині, що розташовані на напрямках

головних компонентів тензора електропровідності та відстані  $(9-10)L$  від інжектуючого електрода. Величина максимальної відносної зміни концентрації нерівноважних носіїв для параметру анізотропії  $a = 0.1$  та різниці потенціалів на електродах  $(2-3) V$  може досягати 20-25%.

Експериментальна перевірка результатів згаданих вище розрахунків була проведена на датчиках тиску, що виготовлялися методами інтегральної напівпровідникової технології. Залежність струмів колекторних переходів від тиску якісно і кількісно узгоджувались з результатами теоретичних обчислень, відносна зміна колекторних струмів при навантаженні мембрани досягала 20%. При цьому рівень вихідного сигналу чутливого елемента, який можна назвати тензотранзистором з радіально симетричним розподілом електричного поля у базі, був близьким до 300 мВ (при нарузі живлення 3 В).

У третьому розділі наведені результати комплексних досліджень кремнієвих тензоперетворювачів, чутливим елементом яких є біполярні двоколекторні p-n-p та n-p-n тензотранзистори з прискорюючим електричним полем у базі (18-20). Мірою зовнішньої механічної дії у таких перетворювачах є величина розбалансу колекторних струмів, яка у p-n-p тензотранзисторі обумовлена ефектом поперечного відхилення неосновних носіїв заряду (дірок), інжектованих емітером і дрейфуючих у позаддовжньому електричному полі бази. Відхилення електрон-діркових пар до одного з колекторів, що виникає при деформації бази, обумовлено тільки величинами недіагональних компонентів тензора рухливості дірок, оскільки для дослідженої конструкції тензоперетворювача аналогічні компоненти тензора рухливості електронів практично дорівнюють нулю. У зв'язку з цим у p-n-p тензотранзисторі прискорююче поле у базі не змінює свого напрямку під дією зовнішніх механічних напружень, так що ефект поперечного відхилення дірок є єдиним визначаючим робота приладу у цілому.

Якісно інша ситуація виникає у конструктивно аналогічному перетворювачі на основі двоколекторного n-p-n тензотранзистора. У цьому випадку під дією зовнішніх механічних напру-

жень дрейф основних носіїв (дірок) у базі веде до появи поперечної складової до прискорюючого електричного поля. У цих умовах також виникає ефект відхилення інжектованих неосновних носіїв (електронів) до одного з колекторів, але це відхилення обумовлено не анізотропією електронної рухливості, а згаданою вище поперечною компонентою прискорюючого електричного поля. Крім цього, наведена деформацією поперечна різниця потенціалів у базі може значно модулювати ефективність локальної інжекції електронів протяжним емітерним  $n$ - $p$ -переходом.

У першій частині цього розділу наведені результати теоретичних та експериментальних досліджень тензоперетворювача з чутливим елементом на основі  $p$ - $n$ - $p$  тензотранзистора. Тензотранзистор розміщувався на планарній стороні профільованої мембрани з двома прямокутними острівцями і був виготовлений методами стандартної інтегральної технології на епітаксіальному шарі  $n$ -типу провідності.

Тензотранзистор включає в себе:  $p^+$ - $n$ -емітер, розміщений у межах базової області, два омичні контакти у вигляді смуг  $n^+$ - $n$  типів провідності, розташованих на краях базової області, два симетричні по відношенню до емітера колекторні переходи.

Теоретичний аналіз роботи тензотранзистора проведений у наближеннях малого рівня інжекції та слабких деформації, коли параметр анізотропії провідності значно менший одиниці.

Обчислювалися такі параметри, як розподіл густини струму вздовж колекторів та її зміна при наявності деформації, залежність колекторних струмів від відстані між колекторами, довжини дифузії нерівноважних носіїв струму, швидкості поверхневої рекомбінації на планарній поверхні бази, значення тягучого електричного поля у базі, відстані між колекторами і емітером та інше. Ці характеристики дозволяють оптимізувати топологію тензотранзистора, розміри його елементів та вибрати режим роботи.

Результати експериментальних досліджень у цілому узгоджувались з обчисленими даними. Розбіжності були обумовлені по-

хибками технологічного характеру, такими як асиметрія розміщення емітера по відношенню до колекторів тощо. Розбіжність між обчисленою та експериментальною залежностями чутливості  $S_a$  від тягнучого поля  $E_x$  (згідно з теорією вона повинна монотонно зростати з ростом  $E_x$ , але на експерименті при  $E_x$  близьких до 600 В/см величина  $S_a$  досягала насичення, а потім трохи зменшувалась) пов'язана з польовим розігрівом носіїв струму, що веде до падіння величини параметра анізотропії. Рівень номінального вихідного сигналу у експериментальних датчиках тиску досягав 3 В при напрузі живлення 10 В.

У другій частині третього розділу проведення аналіз роботи двоколекторного n-p-n тензотранзистора. Основна увага приділена порівняльному впливу двох ефектів (поперечного відхилення і модуляції інжекції неосновних носіїв заряду) на основні характеристики тензотранзистора.

У наближеннях малого рівня інжекції та слабких деформації були обчислені розподіли електричного поля [21] та концентрації нерівноважних носіїв у базі тензотранзистора, струми колекторів та їх зміна при наявності механічної деформації, залежність відносної зміни колекторних струмів при деформації бази від довжини емітера, залежності відносних змін колекторних струмів від величин деформації та електричного поля у базі. Обчислені характеристики у кожному конкретному випадку дозволяють оптимізувати геометричні розміри базової області, положення емітера та його довжину. Показано, що для протяжного емітерного n-p-переходу як абсолютна чутливість, так і ефективність перетворення тензотранзистора обумовлені ефектом модуляції локальної інжекції емітера. Цей ефект значно перевищує ефект поперечного відхилення нерівноважних носіїв у наведеному деформацією поперечному полі бази.

У четвертому розділі детально розглянуття вплив внутрішніх механічних напружень, що можуть виникати при складанні та корпусуванні інтегральних перетворювачів тиску, на значення та температурну залежність їх чутливості [22-25].

У третьому параграфі цього розділу описана оригінальна конструкція інтегрального перетворювача [26] для вимірювання

малих тисків на основі ефекту тензоерс та наведені результати її експериментального дослідження. Викотовлені на основі цієї конструкції інтегральні датчики тиску мають підвищену лінійність навантажувальної характеристики та характеризуються зменшенням впливом, порівняно з відомими, "паразитної" однорідної пружної деформації, що може виникати при виготовленні перетворювача, на його "нульовий" сигнал (у відсутності тиску) та чутливість.

У додатку представлені результати досліджень чутливих модулів напівпровідникових мікрофонів, створених методами інтегральної мікроелектронної технології на основі кремнію [27]. У якості базового принципу побудови чутливого модуля (капсуля) був обраний електростатичний метод перетворення акустичного сигналу в електричний. У розділі наведена методика обчислень основних характеристик капсулів мікрофона та експериментальні результати їх досліджень.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

I. Розвинуті фотовольтаїчні методики дослідження процесів рекомбінації та переносу нерівноважних носіїв струму у приповерхневих шарах напівпровідникових кристалів кубічної симетрії в умовах лазерного збудження імпульсами сильно поглинаючого світла наносекундної тривалості. Встановлено, що в міру збільшення інтенсивності світла у кристалах германію послідовно спостерігаються такі типи поперечних фотовольтаїчних ефектів (ПФЕ): міждолинно-дифузійний, фототермопружно-дифузійний, термопружно-дрейфовий і при екстремальних інтенсивностях збуджуючого світла ( $\approx 10^{26}$  кв/см<sup>2</sup> · с) можлива поява фототермопружно-дифузійного ПФЕ. У кристалах кремнію у тому ж діапазоні інтенсивностей світла домінує дифузійно-міждолинний ПФЕ. При внесенні кристалів кремнію, германію, арсеніду галія у магнітне поле у широкому діапазоні інтенсивностей світла спостерігається фотомагнітний ефект Кікоїна-Носкова, а у кристалах арсеніду галія при інтенсивностях світла близьких до  $10^{25}$  кв/см<sup>2</sup> · с, виникає поперечний термомагнітний

ефект Нернста-Еттингсгаузена.

2. Розроблена методика вимірювання та на її основі визначені релаксаційні міждолинні параметри електронів (час міждолинної релаксації та швидкість цього процесу на поверхні) у кристалах германію та кремнію при кімнатній температурі.

3. Досліджено вплив неоднорідного розігріву кристалічної ґратки на процеси переносу нерівноважних носіїв струму у напівпровідниковому кристалі при його лазерній обробці. Виявлений ефект локалізації нерівноважної електрон-діркової плазми у приповерхневому шарі кристалу, обумовлений наведеним теплом варизонним полем. Варизонне поле виникає із-за зміни ширини забороненої зони напівпровідника як результат його неоднорідного нагріву збуджуючим випромінюванням. Утворення варизонного поля може внести значні зміни як у глибину прогріву кристалу при його лазерній обробці, так і обумовити різко немонотонну залежність температури приповерхневого шару від інтенсивності збуджуючого світла. Встановлено, що у цьому випадку, окрім прямого нагріву випромінюванням, істотний внесок у розігрівання поверхневого шару буде вносити рекомбінаційне тепловиділення, яке визначається просторовою локалізацією електрон-діркової плазми.

4. Детально досліджені характеристики поперечного ефекту Дембера у напівпровідникових пластинах з складною просторовою залежністю параметру анізотропії. Показано, що у цьому випадку спектральні характеристики ефекту мають нетривіальний характер і принципово відрізняються від аналогічних залежностей для напівпровідника з однорідною анізотропією електропровідності.

5. Докладно (теоретично та експериментально) досліджені ефекти перерозподілу електричного потенціалу та концентрації нерівноважних носіїв заряду у пружно деформованих планарних структурах на основі кремнію з монополярною та біполярною провідностями відповідно. Знайдені необхідні співвідношення для розробки на основі цих ефектів чутливих елементів датчиків тиску.

6. Теоретично та експериментально досліджений ефект попе-

речного відкилу дрейфуючої електрон-діркової плазми у інжекційних кремнієвих структурах, підданих направлення пружної деформації.

7. Розроблена конструкція, виготовлені макетні зразки та досліджені основні характеристики багатоколекторних тензотранзисторів з однорідним та неоднорідним (радіально симетричним) просторовими розподілами електричного поля у базі, на основі теоретичного розрахунку оптимізовані їх параметри.

Основні результати дисертації викладені у таких роботах:

1. Бояко И.И., Жадько И.П., Козловский С.И., Линник Л.Ф., Романов В.А. Поперечные фотовольтаические эффекты в германии и кремнии при импульсном лазерном возбуждении //ФТП. -1982. -т.16, вып.10. -С.1803-1809.

2. Козловский С.И., Линник Л.Ф. Поперечный фотовольтаический эффект, обусловленный междолинным диффузионным переселением в германии при лазерном освещении //УФЖ. -1984. -т.29, вып.2. -С.261-265.

3. Козловский С.И., Моин М.Д. Поперечная фотоздс, обусловленная междолинным переселением в кремнии при лазерном возбуждении //ФТП. -1986. -т.20, вып.5. -С.806-810.

4. Козловский С.И. Междолинные релаксационные параметры в германии при ЗОК //ФТП. -1987. -т.21, вып.7. -С.1322-1324.

5. Бояко И.И., Козловский С.И. Фотовольтаический эффект, возникающий при нагреве полупроводника мощным электромагнитным излучением. I Стационарный эффект //УФЖ. -1981. -т.26, вып.10. -С.1960-1968.

6. Бояко И.И., Козловский С.И. Фотовольтаический эффект, возникающий при нагреве полупроводника мощным электромагнитным излучением. II Нестационарный эффект //УФЖ. -1981. -т.26, вып.11. -С.1844-1848.

7. Козловский С.И., Бояко И.И., Линник Л.Ф. Фотовольтаический эффект, возникающий при нагреве полупроводника мощным электромагнитным излучением. III Экспериментальное обнаружение эффекта. //УФЖ. -1982. -т.27, вып.4. -С.560-564.

8. Бояко И.И., Козловский С.И. Поперечная фотоздс в полу-

проводниках, возникающая при импульсном нагреве кристаллов световым потоком //В сб.: Использование солнца и других источников лучистой энергии в материаловедении. Киев: Наукова думка.- 1983, С.213-219.

9.Козловский С.И. Поперечный фотовольтаический эффект в кристаллах германия при субнаносекундном лазерном возбуждении //УФЖ.-1990.-т.35, вып.3.-С.395-399.

10.Козловский С.И., Моин М.Д. Поперечный фотовольтаический эффект, возникающий при лазерном возбуждении германия вследствие термического изменения ширины запрещенной зоны полупроводника //ФТП.-1984.-т.18, вып.10.-С.1772-1777.

11.Козловский С.И., Моин М.Д. Поперечная фотоэдс, возникающая в германии при экстремальных уровнях лазерного возбуждения //ФТП.-1985.-т.19, вып.5.-С.864-868.

12.Козловский С.И. Диффузионное растекание неравновесной электрон-дырочной плазмы при лазерном отжиге //Квантовая электроника, Киев: Наукова думка.-1986.-вып.31.-С.53-57.

13.Дубров И.Н., Козловский С.И., Коростышевский Ю.М., Моин М.Д. Фотомагнитный эффект в кристаллах изолирующего арсенида галлия при лазерном возбуждении //ФТП.-1990.-т.24, вып.4.-С.763-766.

14.Жадько И.П., Козловский С.И., Романов В.А. Поперечный эффект Дембера в полупроводниках с неоднородной анизотропией электропроводности//ФТП.-1986.-т.20, вып.1.-С.40-43.

15.Гузъ В.Н., Жадько И.П., Козловский С.И., Романов В.А. Перераспределение электрического потенциала в искусственно анизотропной (по электропроводности) полупроводниковой пластине с кольцевыми электродами //ФТП.-1990.-т.24, вып.3.-С.409-412.

16.Жадько И.П., Козловский С.И., Романов В.А. Перераспределение потенциала в полупроводниковой пластине с искусственно наведенной неоднородной анизотропией электропроводности // ЖТФ.-1994.-т.64, вып.7.-С.185-187.

17.Бабичев Г.Г., Гузъ В.Н., Жадько И.П., Козловский С.И., Романов В.А. Перераспределение концентрации инжектированных носителей заряда в искусственно анизотропной полупроводнико-

вся пластине с кольцевыми электродами //ФТП.-1992. -т.26, вып.10.-С.1723-1727.

18.Бабичев Г.Г., Гузь В.Н., Жадько И.П., Козловский С.И., Романов В.А. Исследование биполярного двухколлекторного тензотранзистора с ускоряющим электрическим полем в базе //ФТП.-1992.-т.26, вып.7. -С.1244-1250.

19.Козловский С.И. Исследование двухколлекторного п-р-п тензотранзистора с ускоряющим электрическим полем в базе //ФТП.-1995.-т.29, вып.10.-С.1783-1789.

20.А.с. 1783331 СССР, МКИ G 01 L 9/04. Интегральный преобразователь давления /Бабичев Г.Г., Гузь В.Н., Жадько И.П., Козловский С.И., Романов В.А.- 1992.

21.Бойко И.И., Жадько И.П., Козловский С.И., Романов В.А. Оптимизация параметров чувствительного элемента на основе эффекта поперечной тензоэдс в кремниевых преобразователях давления //Оптоэлектроника и полупроводниковая техника.Киев: Наукова думка. -1983, вып.27. -С.42-49.

22.Бабичев Г.Г., Жадько И.П., Козловский С.И., Кучерук А.Д., Романов В.А. Влияние условия корпусирования интегральных преобразователей на величину и температурную зависимость тензочувствительности //ЖТФ.-1994. -т.64, вып.9. -С.84-89.

23.Жадько И.П., Козловский С.И., Кучерук А.Д., Романов В.А. Размерные необратимые эффекты в электропроводности и магнитопроводности n-Si//УФЖ.-1988.-т.33, вып.11.-С.1731 -1735.

24.А.с. 1549415 СССР, МКИ H 01 L 23/00. Способ соединения деталей полупроводников или полупроводников и металлов /Бабичев Г.Г., Кармадонов Н.К., Козловский С.И., Романов В.А., Святогор Л.В., Стадник А.В.-1989.

25.А.с. 1738043 СССР, МКИ H 01 L 23/00. Способ соединения деталей полупроводников или полупроводников и металлов /Бабичев Г.Г., Козловский С.И., Романов В.А. - 1990.

26. Интегральный преобразователь давления /Бабичев Г.Г., Гузь В.Н., Жадько И.П., Заяцев В.А., Козловский С.И., Романов В.А. Полож. реш. по заявке N 5004549 от 31.01.92 г.

27.А.с. 1474869 СССР, МКИ H 04 R 19/04. Капсюль конденсаторного микрофона/Бабичев Г.Г., Бедусенню Н.П., Вержацкий Ю.П.,

Жадько И.П., Козловский С.И., Романов В.А., Шаповалов В.П.  
-1988.

#### ЦИТОВАНА ЛИТЕРАТУРА

Цз.Алмазов Л.А., Григорьев Н.Н. Междолинное перезаселение в полупроводниках при биполярной диффузии // УФЖ. -1977. -т.22, вып.12.-С.2047-2048.

Цз.Алмазов Л.А., Григорьев Н.Н. Междолинное перезаселение носителей и поперечная фотоэдс в полупроводниках // ФП. -1978, -т.12, вып.10.-С.1986-2003.

#### ABSTRACT

Kozlovskii S.I. Peculiarities of charged carrier transport in semiconductor crystals of cubic symmetry with induced conductivity anisotropy.

Thesis on adjudge research degree of doctor of physical and mathematical sciences on specialty 01.04.10 - Semiconductor and Dielectric Physics. Institute of Semiconductor Physics National Academy of Sciences of Ukraine, Kijiv, 1996.

Dissertation includes 22 scientific works and 5 author's certificates. Results of an investigation of the transverse transport in the semiconductor crystals of cubic symmetry under the external directed perturbations are represented. There are strong absorbed laser pulse excitation, magnetic field, uniaxial strain among these perturbations. A thesis is divided into the two parts. The first one is devoted to the complex (theoretical and experimental) investigations of the transverse photovoltaic effects (the TPE) in the semiconductor crystals of the cubic symmetry under the excitation by a nanosecond laser pulse. It has been shown that in the germanium plate cut at an acute angle relative to the principal crystallographic directions with increasing the light intensity the following types of the TPE are consecutively observed: diffusive intervalley, diffusive photothermoelastic, drifty photothermoelastic and in a limit of the strong excitation, it is possible to observe the diffusive photothermoelastic TPE again. In similarly

crystallographic oriented silicon plates the diffusive intervalley TPE dominates in the same range of light intensities. At introduction of plates Si, Ge, GaAs in a weak magnetic field in the wide range of the light intensities the Kikoin-Noskov photoelectromagnetic effect dominates and at the extremely large light intensities the transverse thermomagnetic Nernst-Ettingshausen effect might be observed. Each of the effects has a specific dependence of the emf from a light intensity and the sign, which permit to distinguish them easily.

The second part of thesis is devoted to a research of the transverse transport of charge carriers in the various structures (including the injecting structures), produced by the methods of integral technology. The optimized designs of new sensitive elements of the integral pressure sensors are offered. This part investigations includes the ring structures in the conditions uniform and non-uniform strain, tensotransistors with the radial symmetry and uniform distributions of an electrical field in the base region.

#### Резюме

Козловский С.И. Особенности переноса носителей заряда в полупроводниковых кристаллах кубической сингонии с наведенной анизотропией электропроводности.

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

Защищается 22 научные работы и 5 авторских свидетельств, которые содержат теоретические и экспериментальные исследования поперечных кинетических эффектов в полупроводниковых кристаллах кубической сингонии с наведенной анизотропией электропроводности внешними направленными возмущениями. Среди них: сильнопоглощаемое импульсное лазерное излучение, магнитное поле, одноосная упругая деформация. Диссертация состоит из двух частей. В первой части представлены результаты комплексных (теоретических и экспериментальных) исследова-

дования поперечных фотовольтаических эффектов в кристаллах кубической сингонии при их возбуждении лазерными импульсами наносекундной длительности. Показано, что в пластинах германия, ориентированных под острым углом к главным кристаллографическим направлениям, по мере увеличения интенсивности света последовательно наблюдаются следующие типы ПФЗ: диффузионно-междолинный, диффузионно-фототермоупругий, дрейфово-фототермоупругий и, в пределе экстремальных интенсивностей, можно снова наблюдать диффузионно-фототермоупругий ПФЗ. В аналогично ориентированных пластинах кремния в том же диапазоне интенсивностей света доминирует диффузионно-междолинный ПФЗ. При помещении пластин Si, Ge, GaAs в слабое магнитное поле в широком диапазоне интенсивностей света доминирует фотомагнитный эффект Кикоина-Носкова, а при больших интенсивностях в кристаллах GaAs наблюдается термомагнитный эффект Нернста-Эттингсгаузена. Для каждого из поперечных фотовольтаических эффектов характерны свои специфические зависимости фотоздс от интенсивности возбуждающего излучения и свой знак, что позволяет их легко разделять.

Вторая часть диссертации посвящена исследованию поперечного переноса носителей тока в различных (в том числе инжекционных) структурах, изготавливаемых методами интегральной технологии. На их основе предложены оптимизированные конструкции новых чувствительных элементов интегральных датчиков давления, обладающих рядом преимуществ перед известными. В этой части исследованы кольцевые структуры в условиях однородного и неоднородного деформирования, тензотранзисторы с радиально симметричным и однородным распределениями электрического поля в базе.

Ключові слова:

напівпровідники кубічної сингонії, поперечний перенос, лазерне випромінювання, поперечний фотовольтаїчний ефект, анізотропія електропровідності, односна пружна деформація, інтегральний перетворювач тиску, тензотранзистор.



028574

AB 33.214