

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ФІЗИКИ НАПІВПРОВІДНИКІВ

На правах рукопису

ТЕТЬОРКІН Володимир Володимирович

**ЗОННІ ТА ДЕФЕКТНІ СТАНИ У ВУЗЬКОЩІЛИННИХ
НАПІВПРОВІДНИКАХ ТА СТРУКТУРАХ НА ЇХ ОСНОВІ**

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 - 1996

321,375.59 +
534,226

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00753871 (V)

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті фізики напівпровідників НАН України.

Офіційні опоненти: член-кореспондент НАН України,
доктор фізико-математичних наук, професор
Литовченко Володимир Григорович

доктор фізико-математичних наук, професор
Савицький Володимир Григорович

доктор фізико-математичних наук, професор
Горлей Петро Миколайович

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

Захист відбудеться "29" листопада 1996 р. о 14¹⁵ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 50.07.01 при Інституті фізики напівпровідників НАН України за адресою: 252650 МСП, Київ 28, проспект Науки, 45

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту фізики напівпровідників НАН України

Автореферат розісланий 24" жовтня 1996 р.

**Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради**

Іщенко С.С.

Загальна характеристика роботи.

Актуальність теми досліджень. В сучасній оптоелектроніці значна увага приділяється інфрачервоному (ІЧ) діапазону довжин хвиль, що зумовлено потребами науки і техніки. Відбувається постійне удосконалення методів і пристроїв для детектування і отримання ІЧ випромінювання для потреб медицини, екологічного моніторингу, отримання теплових зображень, дослідження природних ресурсів Землі, клімату і т.і.

Не дивлячись на те, що в останні роки здійснювались значні зусилля для створення приймачів ІЧ випромінювання на основі квантоворозмірних структур напівпровідників A_4B_6 і твердих розчинів SiGe, основними матеріалами ІЧ оптоелектроніки залишаються вузькощілинні напівпровідники (ВН). При цьому найбільшу увагу дослідників притягають бінарні сполуки і потрійні тверді розчини напівпровідників A_4B_6 і A_2B_6 , такі як PbSe, PbSnTe, HgCdTe та інші.

Актуальними для практичного використання ВН є дослідження властивостей домішок і власних дефектів ґратки. Відомо, що вказані сполуки характеризуються значним відхиленням від стехіометрії (аж до значень $\delta \sim 10^{-3}$). Для отримання матеріалів, придатних для створення приймачів ІЧ випромінювання, використовується довготривалий ізотермічний відпал, або легування різними домішками. Проте ступінь однорідності об'ємних монокристалів, а також епітаксійних шарів ще недостатня для створення лінійок фоточутливих елементів і, особливо, багатоелементних матриць великої площі. Актуальною проблемою для вузькощілинних напівпровідників залишається стабільність властивостей матеріалів, а також приладів на їх основі.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Значний практичний і науковий інтерес становлять дослідження структур з квантовими ямами і надграток (СКЯ і НГ) ВН, зокрема сполук A_4B_6 . Багатодолинний характер зонного спектра цих сполук, великий коефіцієнт анізотропії ефективних мас носіїв, рекордно високі рухливості електронів і дірок припускають більшу різноманітність фізичних властивостей СКЯ і НГ у порівнянні з більш вивченими структурами на основі напівпровідників A_3B_5 . Важливим є також той факт, що квантоворозмірні структури напівпровідників A_4B_6 з достатньо високою структурною досконалістю можуть бути отримані за допомогою відносно простого методу молекулярної епітаксії ("гаряча стінка"). Фізичні властивості вказаних структур досліджені недостатньо. До цього часу залишається дискусійним питання про тип модуляції зон періодичним потенціалом СКЯ і НГ. Практична зацікавленість у дослідженні СКЯ і НГ базується на наявності потенційної можливості створення на їх основі ІЧ приймачів і випромінювачів нового покоління з покращеними характеристиками.

Недостатня вивченість перерахованих вище питань, їх дискусійний характер і важливість їх вирішення для прикладних цілей зумовили актуальність виконання даної дисертаційної роботи.

Мета роботи полягала в наступному:

-вивчення параметрів зонної структури в об'ємних монокристалах і епітаксійних шарах ВН;

-отримання інформації про електронні стани власних дефектів і домішок у ВН і їх вплив на енергетичний спектр носіїв, електрофізичні, фотоелектричні і оптичні властивості ВН;

-вивчення механізмів легування домішками ВН і можливостей цілеспрямованої модифікації їх властивостей;

-вивчення впливу домішок і власних дефектів ґратки на механізми токопроходження, фотоелектричні властивості і порогові

характеристики поверхнево-бар'єрних структур, гетеро- і гомопереходів, а також квантоворозмірних структур на основі ВН.

дослідження енергетичного спектра носіїв у вищевказаних структурах на основі ВН, механізмів їх фоточутливості і переносу носіїв заряду з метою оптимізації параметрів структур і дослідження можливостей їх практичного використання в ІЧ фотоелектроніці.

Наукова новизна. В результаті виконаних досліджень вперше:

1. Знайдені енергетичні положення рівнів дефектів в легованих домішками Cd, Mn, Ti, Cr, Bi, Tl твердих розчинах $Pb_{1-x}Sn_xTe$ ($x < 0.23$) і вивчені механізми легування об'ємних кристалів вказаними домішками.

Показано, що в твердих розчинах $Pb_{1-x}Sn_xTe$ ($x < 0.20$) домішки перехідних елементів періодичної системи (Mn, Cr, Tl) утворюють резонансні рівні в зоні провідності. Характер легування і концентрація носіїв струму при цьому визначається переважно положенням резонансних рівнів по відношенню до дна зони провідності, а не будовою зовнішніх електронних оболонок домішок.

2. Знайдені енергії утворення власних дефектів в монокристалах $Pb_{1-x}Sn_xTe$ і $Pb_{1-x}Sn_xSe$. Показано, що рівні власних дефектів в монокристалах PbSe попадають в заборонену зону, на відміну від бінарних сполук PbTe і PbS, де вони утворюють резонансні стани.

3. В напівпровідниках $Pb_{1-x}Sn_xTe$ ($x=0, 0.20$) встановлено аналітичні залежності, які описують енергетичні відстані між дном зони провідності в точці L зони Бріллюена і потолком валентної зони "тяжких" дірок в точці Σ , а також значення ефективних мас "легких" та "тяжких" дірок.

4. Отримані експериментальні докази того, що висота бар'єрів Шотткі в телуриді свинцю не залежить від роботи виходу металів (Ag, Au, In, Cu) і визначається наявністю дефектів на межі розділу "метал-оксид-напівпровідник", які стабілізують положення рівня Фермі. Енергетичне положення рівнів дефектів на межі розділу залежить як від самого металу, так і від способу його нанесення на поверхню підкладок. Вказані дефекти виникають як результат нанесення металу на поверхню окислених підкладок.

5. Показано, що більш високі значення добутку R_0A і виявної здатності D^* поверхнево-бар'єрних структурах на основі PbTe можна отримати при використанні хімічно неактивних металів (Ag, Au, Cu), які не вступають в реакції обміну під час нанесення їх на поверхню підкладок.

6. Експериментально показано, що в ізоперіодичних гетероструктурах PbTeSe(S)-PbSnTe заміна халькогену Se-S приводить до більш різкої гетеромежі та поліпшення електричних характеристик. В ізоперіодичних гетеропереходах $PbTe_{0.97}S_{0.03}$ - $Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te$ ($\lambda = 11.0$ мкм при 77 K) динамічний опір обмежує дифузійний струм, що для структур на основі напівпровідників A_4B_6 отримано вперше.

7. В поверхнево-бар'єрних структурах на PbTe та ізоперіодичних гетеропереходах PbTeSe(S)-PbSnTe величина добутку R_0A і, відповідно, виявної здатності фотоприймачів D^* , при низьких температурах ($T < 50$ K) обмежує тунельний струм з участю дефектів на межах розділу. При $T > 77$ K переважають генераційно-рекомбінаційний і дифузійний струми, причому збільшення частки дифузійного струму спричинює зростання величини добутку R_0A . Генерація і рекомбінація носіїв струму відбувається через рівні глибких дефектів з типовими значеннями постійної часу $\tau = 10^{-8} - 10^{-9}$ с.

8. У надгратках і структурах з квантовими ямами $\text{PbTe-Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ реалізується контраваріантний тип модуляції зон періодичним потенціалом, причому величина розривів зон на гетеромежах $\Delta E_c \cong \Delta E_v$.

9. У структурах з квантовими ямами $\text{PbTe-Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ ($x = 0.20$) при товщині бар'єрних шарів $\text{PbTe} > 60$ нм спостерігається планарна (в площині шарів) фотопровідність до температур близьких до кімнатної. В цих же структурах отримані найбільш високі із відомих літературі для структур напівпровідників A_4B_6 значення добутку $R_0A = 70$ Ом см^2 при $T = 77$ К.

10. У надгратках і структурах з квантовими ямами PbTe-PbS реалізується коваріантний тип модуляції зон періодичним потенціалом, причому потолок валентної зони PbS знаходиться над дном зони провідності PbTe (структури 2-го типу розривні). Величина розривів зон на гетеромежах $\Delta E_v \cong 0.32$ еВ.

Практична цінність полягає в наступному:

1. В роботі отримані експериментальні докази можливості виготовлення поверхнево-бар'єрних структур, гомо- і гетеропереходів, придатних для створення на основі ІЧ фотоприймачів, які працюють в режимі обмеження флуктуаціями фонового випромінювання.

2. Показана можливість поліпшення стабільності характеристик поверхнево-бар'єрних структур шляхом легування підкладок телуриду свинцю талієм і відповідної обробки поверхні підкладок перед нанесенням хімічно інертних металів.

3. Виготовлені структури з квантовими ямами, фоточутливі в широкому інтервалі температур $T = 77-300$ К. В цих структурах досягнуті значення величини добутку R_0A , які перевищують майже на

порядок величини значення вказаного добутку для одиночних гетеропереходів.

4. Досліджені електричні і фотоелектричні властивості фоточутливих в інтервалі температур 77-300 К полі- і монокристалічних шарів PbSe і PbS на кремнієвих підкладках. Отримані відомості, необхідні для оптимізації характеристик фоточутливих шарів.

5. Показана можливість цілеспрямованої і контрольованої зміни характеристик монокристалів з'єднань A_4B_6 шляхом їх легування, або ж дією випромінювання ІЧ лазера.

6. Результати експериментальних досліджень, які були отримані в процесі виконання роботи, являються важливими для подальшого розвитку теоретичних досліджень в області фізики вузькощілинних напівпровідників.

Рівень реалізації, впровадження наукових розробок.

Одержані в роботі результати стали науковим підґрунтям для створення багатоелементних фотоприймальних пристроїв в інтересах Національного космічного агенства України в рамках програми "Океан-Січ".

Достовірність отриманих результатів базується на використанні сучасних методик досліджень електричних, фотоелектричних, оптичних, магнетооптичних, структурних характеристик об'ємних кристалів, епітаксійних шарів, р-п гетеро- та гомопереходів і структур з квантовими ямами. Використані методики і прилади були автоматизовані, а обробка експериментальних результатів проводилась з використанням персональних ЕОМ. Експериментальні результати аналізувались на основі сучасних теоретичних представлень про досліджувані ефекти і явища. Враховувались похибки вимірів і розкид експериментальних даних.

Результати, отримані автором, порівнювались з літературними даними.

На захист виносяться такі положення:

1. В монокристалах PbTe легованих домішками Ti, Cr, Cd, Ga, Bi, Tl їх характер (донорний або акцепторний) визначається утворенням квазілокальних (резонансних) та локальних рівнів і в меншій мірі будовою зовнішніх електронних орбіталей. При цьому концентрація носіїв визначається двома факторами: концентрацією електроактивних атомів домішок та положенням вказаних рівнів по відношенню до основних енергетичних екстремумів.

2. Рівні власних дефектів в PbSe попадають в заборонену зону, в той час як в інших бінарних сполуках (PbTe, PbS) вони являються резонансними.

3. Тип бар'єрів Шотткі в PbTe з окисленою поверхнею для металів In, Cu, Ag, Au, а також їх висота визначається конкуренцією двох механізмів-Шотткі і Бардіна. Найбільш ймовірним механізмом утворення дефектів на межі розділу, які стабілізують положення рівня Фермі, є хімічні процеси, які визивають інтердифузійне перемішування металів та компонентів напівпровідника, утворення нових фаз, зв'язування кисню на межі розділу "метал-напівпровідник".

4. При низьких температурах ($T < 77$ K) основним механізмом, який обмежує динамічний опір в діодах Шотткі, а також гетеропереходах на основі твердих розчинів $Pb_{1-x}Sn_xTe=0.20$) є тунелювання з участю дефектів на межі розділу.

5. В ізоперіодичних гетеропереходах p-PbSnTe-n-PbTeS величину динамічного опору при температурі 77 K обмежує дифузійний струм. Заміна S на Se, а також використання замість потрібного розчину PbTe веде до збільшення інтердифузії на гетеромежі та значного відхилення від стехіометрії, в результаті чого

у вказаних гетеропереходах основним механізмом переносу заряду при 77 К являється генераційно-рекомбінаційний. Процеси генерації та рекомбінації носіїв характеризуються постійною часу 10^{-8} - 10^{-9} с.

6. Композиційні надгратки та структури з квантовими ямами $\text{PbTe-Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ ($x \sim 0.20$) відносяться до структур з контраваріантним типом модуляції зон. Квантові ями в цих структурах знаходяться в шарах вузькощілинного PbSnTe . Квантоворозмірний ефект спостерігається при товщині шарів в межах від 20.0 нм до 80.0 нм. Величина розривів зон на гетеромежах $\Delta E_c \cong \Delta E_v$. Знайдені положення квантоворозмірних зон в залежності від товщини шарів.

7. Планарна (в площині шарів) фотопровідність у структурах з квантовими ямами з товщиною буферних шарів $d > 60.0$ нм спостерігається до високих (300 К) температур.

8. Характер поперечної провідності визначається періодичним потенціалом надгратки, причому величина динамічного опору надграток зростає у порівнянні з одиночними гетеропереходами. Отримана величину добутку $R_0 A = 70 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ підтверджує можливість створення на основі структур з квантовими ямами напівпровідників A_4B_6 високоефективних інфрачервоних фотоприймачів нового покоління.

9. В композиційних надгратках та структурах з квантовими ямами $\text{PbTe} - \text{PbS}$ реалізується коваріантний тип модуляції зон, причому потолок валентної зони PbS знаходиться над дном зони провідності PbTe (квантоворозмірні другого типу, розривні). Величина розриву зон на гетеромежі $\Delta E_v \cong 0.32 \text{ eV}$.

Публікації. Основні результати дисертації викладені в 41 науковій роботі, що опубліковані в ведучих вітчизняних та зарубіжних журналах, та трьох авторських свідоцтвах про винахід.

Апробація роботи.

Основні результати роботи доповідались на таких конференціях: Міжнародна нарада по фізиці вузькощілинних напівпровідників, Москва, 1981; Четверта міжнародна конференція по інфрачервоній фізиці, Цюрих, 1988; Третя міжнародна конференція по фізиці поверхні, Закопане, 1988; Міжнародна конференція по вузькощілинних напівпровідниках та споріднених матеріалах, 1989, США; П'ята міжнародна конференція по надгратках та мікроструктурах, 1990, Берлін; Напівпровідники з вузькою забороненою зоною та напівметали, Львів, 1980, 1983; V Всесоюзна конференція по фізико-хімічних основах легування матеріалів, 1982, Москва; V Всесоюзна конференція по хімії, фізиці та технічному використанню халькогенідів, Баку, 1979; II Всесоюзна конференція по радіаційній фізиці напівпровідників, 1984, Ташкент; VII Всесоюзна конференція по хімії, фізиці та технічному використанню халькогенідів, Ужгород, 1988; III та IV Міжнародна конференція по фізиці та технології напівпровідникових шарів, 1990, 1993, Івано-Франківськ; Всесоюзна конференція по домішках та дефектах у вузькощілинних напівпровідниках, 1989, Павлодар; IV Всесоюзна конференція по термодинаміці та матеріалознавству напівпровідників, 1989, Москва; Перша національна конференція Росії по дефектах в напівпровідниках, 1992, Санкт-Петербург.

По темі дисертації опубліковано 44 роботи, включаючи три авторських свідоцтва на винахід.

Особистий внесок автора. В дисертаційній роботі узагальнені результати досліджень, виконаних автором особисто, або з співавторами, які працювали під його керівництвом. В роботах, що увійшли в дисертацію, автору належить ініціатива у постановці

задач, безпосередня участь у їх виконанні і отриманні результатів, провідна роль в узагальненні та інтерпретації результатів.

Основна частина отриманих в роботі результатів доповідалась автором особисто на семінарах та наукових конференціях.

Структура та об'єм дисертації. Дисертація складається із вступу, шести глав та висновків. Зміст дисертації викладений на 309 сторінках машинописного тексту та включає 85 рисунків і 16 таблиць. Список літератури містить 300 найменувань.

ЗМІСТ РОБОТИ.

В першій главі досліджується енергетичний спектр носіїв і стани власних дефектів у вузькощілинних напівпровідниках [4,6,8,9,27,41].

В роботі виконані дослідження структури валентної зони твердих розчинів $Pb_{1-x}Sn_xTe$. Використання для досліджень взірців з широким інтервалом значень концентрації носіїв $p = 7 \cdot 10^{15} - 3.5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, врахування температурної залежності відношення рухливостей носіїв і виконання досліджень в широкому температурному інтервалі дозволило встановити наступні параметри валентної зони:

$$m_d^{\Sigma} = 3 m_0$$

$$E_g^{L\Sigma} = 0.29 + 0.7 \cdot 10^{-4} T \quad (x = 0.20) \quad (1)$$

$$E_g^{L\Sigma} = 0.35 + 0.7 \cdot 10^{-4} T \quad (x = 0)$$

де m_d^{Σ} - ефективна густина станів зони тяжких дірок, $E_g^{L\Sigma}$ - енергетична відстань між дном зони провідності в точці L зони Бріллюена і потолком валентної зони тяжких дірок в точці Σ .

Використовуючи знайдені параметри зонної структури були розраховані енергії утворення власних дефектів (вакансій металів і халькогенів) в твердих розчинах PbSnTe та PbSnSe, а також максимально можливі концентрації носіїв, зумовлених власними дефектами ґратки.

В одноелектронному наближенні власні дефекти (вакансії металу та халькогена) в телуриді свинцю утворюють квазілокальні (резонансні) рівні [45]. Зокрема в n-PbTe вакансії Te утворюють три резонансні рівні в зоні провідності. Вказані рівні завжди іонізовані і зумовлюють напівметалічний характер провідності PbTe. Ці висновки вважались справедливими і для інших напівпровідників A_4B_6 . Врахування міжелектронної взаємодії веде до значної зміни положення резонансних рівнів. Зокрема, в твердих розчинах PbSnSe та бінарному з'єднанні PbSe один із рівнів вакансії Te може попадати в заборонену зону. Цей результат є принциповим з точки зору прогнозування як властивостей самих матеріалів A_4B_6 , так і приладів на їх основі.

Адекватної експериментальної перевірки вказаних теоретичних передбачень до цього часу не було виконано. В даній роботі були досліджені епітаксійні шари PbSe з високою структурною досконалістю, вирощені на кремнієвих підкладках, орієнтованих в напрямку (001) з буферними шарами YbS. Нанесення буферних шарів YbS зумовлено великою (~12%) невідповідністю постійних ґраток кремнію та селеніду свинцю, в результаті чого осадження монокристалічних шарів PbSe безпосередньо на кремнієві підкладки стає неможливим.

Монокристалльні шари PbSe мали електронний тип провідності і типові значення концентрації носіїв $(4-6) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. При 77 К електрони мали високу рухливість $\mu = 10^4 \text{ см}^2/\text{В с}$, причому у

вказаному інтервалі температур $\mu \sim T^{-\nu}$ ($\nu = 2.2-2.3$), як і у об'ємних монокристалах.

В досліджених шарах спостерігається "виморожування" носіїв на локальні рівні у забороненій зоні. Обробка експериментальних даних дозволила встановити, що густина станів локальних рівнів $N \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Шляхом співставлення експериментальних і розрахованих значень концентрації носіїв $n(T)$ було знайдено енергетичне положення рівня власних дефектів $\Delta E_1 = -(30 + 0.14T \text{ меВ})$ по відношенню до дна зони провідності.

Крім рівня поблизу дна зони провідності, було також встановлено наявність рівня поблизу валентної зони на відстані від її потолка $\Delta E_2 = 20 \text{ меВ}$. Виникнення декількох рівнів для одного типа дефектів є характерним також для легованих домішками кристалів.

Друга глава присвячена вивченню дефектних станів в легованих вузькощілинних напівпровідниках [1-3,5,7,11,20,30,40]. Для встановлення закономірностей легування напівпровідників $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ використовувались домішки різних груп періодичної системи з різною будовою зовнішніх електронних орбіталей (Cd, Bi, Ga, Tl, Ti, Cr, Mn).

Умовно вказані домішки можна розділити на дві групи - домішки, які утворюють резонансні стани в зоні провідності (Ti, Cr, Mn) або валентній зоні (Tl), а також домішки (Cd, Ga), які утворюють локальні рівні в забороненій зоні. Встановлена наступні закономірності легування PbTe . Незалежно від структури зовнішніх електронних орбіталей, домішки, які утворюють резонансні рівні, поставляють в дозволені зони по одному носію на кожний атом домішки. Цей експериментальний результат підтверджується також для інших домішок (наприклад, In в PbTe [45]). Положення рівнів по відношенню до основних енергетичних екстремумів а priori

передбачити неможливо, проте на основі аналізу отриманих в даній роботі експериментальних результатів, а також відомих із літератури, встановлено наступне:

- в кристалічній ґратці вказані вище домішки заміщують свинець;

- енергетичне положення рівнів дефектів корелює з різницею між іонними радіусами домішок і свинцю: чим більша вказана різниця, тим глибше в зоні провідності знаходиться резонансний рівень; домішки, іонні радіуси яких близькі до іонного радіуса свинцю, утворюють, як правило, рівні в забороненій зоні; для талію, іонний радіус якого перевищує іонний радіус свинцю, резонансний рівень знаходиться у валентній зоні.

Із досліджень ефекта Холла знайдено, що дефектний рівень в легованих Cd кристалах знаходиться в забороненій зоні на відстані від дна зони провідності $\Delta E = 0.01$ еВ. При цьому необхідно відмітити, що концентрація електрично активних атомів кадмію значно менша концентрації введених в кристал атомів. Ця ситуація є, мабуть, характерною для легованих кристалів PbTe та твердих розчинів $Pb_{1-x}Sn_xTe$ ($x < 0.20$), в яких дефектні рівні попадають в заборонену зону [45].

Було встановлено, що легування PbTe титаном і хромом призводить до електронного типу провідності. Причому, кожний домішковий атом Ti і Cr віддає в зону провідності один електрон. Характер залежностей $n(T)$ суттєво залежить від рівня легування взірців. При відносно невеликому рівні легування концентрація електронів зростає при підвищенні температури. У сильно легованих взірцях залежності $n(T)$ мають протилежний характер. При цьому, при $T = 4.2$ К у досліджених взірцях концентрація електронів була близькою до концентрації домішкових атомів.

Картина дефектних рівнів в PbTe:Cr(Ti) досить складна. Встановлено, що при легуванні хромом та титаном виникає два рівні дефектів з енергіями активації ΔE_{T1} і ΔE_{T2} (енергії відраховуються від дна зони провідності). Обидва рівні знаходяться в зоні провідності. При низьких температурах $T = 4.2 \text{ K}$ функцію основного донора виконує верхній рівень ΔE_{T2} , який може заповнити зону провідності електронами до енергії ΔE_{T2} , якщо раніше не буде досягнута межа розчинності хрому в ґратці телуриду свинцю. При температурах $T > 4.2 \text{ K}$ цей рівень має акцепторний характер (в результаті захоплення електронів із зони провідності їх концентрація з ростом температури зменшується). Активація нижнього донорного рівня ΔE_{T1} спостерігається лише в слабо легованих зірцях, теплові викиди носіїв в зону провідності з нижнього дефектного рівня є причиною зростання концентрації носіїв при підвищенні температури. Було знайдено, що нижній рівень лежить біля самого дна зони провідності, а верхній рівень має енергію активації $\Delta E_{T2} = 0.11 \text{ eV}$.

Резонансні рівні в PbTe:Ti , як було встановлено із досліджень оптичного поглинання, ефекта Холла та магнетооптичного ефекта Фарадея, мають енергії активації $\Delta E_{T1} = 0.160 \text{ eV}$ та $\Delta E_{T2} = 0.21 \text{ eV}$. Внаслідок того, що рівні дефектів PbTe:Ti лежать глибоко у зоні провідності, температурні залежності $n(T)$ майже не відрізняються від аналогічних залежностей в нелегованих кристалах.

Закономірності легування $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ домішками полягають в утворенні резонансних станів в дозволивих зонах енергій. При цьому характер домішки (донорний чи акцепторний), а також концентрація носіїв залежить головним чином від положення резонансних рівнів по відношенню до основних екстремумів дозволивих енергій. Рівні, які мають різні енергії, можуть відповідати різним зарядовим станам

центрів. Зсув енергетичного положення рівня при цьому зумовлений взаємодією центра з кристалічним оточенням.

В третій главі описані властивості поверхнево-бар'єрних структур [10,12,18]. Науковий інтерес до поверхнево-бар'єрних структур зумовлений тією обставиною, що теорія мікроскопічних явищ на межі розділу "метал-напівпровідник" в наш час лише створюється. При цьому у відношенні до вузькощілинних напівпровідників існують специфічні особливості, які не є характерними для широкозонних напівпровідників. Зокрема, теорія передбачає наявність залежності висоти потенціального бар'єру від концентрації носіїв в підкладах.

Прикладний інтерес до поверхнево-бар'єрних структур зумовлений наявністю потенціальної можливості створення на їх основі швидкодіючих приймачів ІЧ випромінювання.

В роботі досліджувався взаємозв'язок між мікро- та макроскопічними характеристиками структур. Зокрема, вивчався можливий вплив реакцій обмінної взаємодії на межі розділу "метал-напівпровідник", методів підготовки поверхні підкладок, а також їх легування на макроскопічні характеристики - вольтамперні і вольтфарадні характеристики (ВАХ і ВФХ), добуток динамічного опору при нульовому зміщенні R_0 на площу A структур, від величини якого залежить виявна здатність ІЧ приймачів.

При нанесенні металів на поверхню напівпровідника можуть відбуватись реакції обмінної взаємодії. З оцінок вільної енергії Гіббса було встановлено, що реакції обмінної взаємодії для чотирьох використаних в роботі металів найбільш ймовірні для системи In-PbTe. Інші метали Cu, Ag і Au практично не повинні взаємодіяти з телуридом свинцю при кімнатній температурі.

Складено ряд активності металів у відношенні до телуриду свинцю: Ga, Zn, Mn, Ti, Cd, In, Pb, Mo, Sn, Ge, Cu, Tl, Pt, Ag, Bi, Sb,

As, Au. Метали зліва від PbTe вступають в хімічну взаємодію, а справа - не вступають у взаємодію з телуридом свинцю. В діодах Шотткі досліджені макроскопічні характеристики (ВАХ, ВФХ, спектри фотовідповіді) і встановлено наступе:

висота бар'єрів Шотткі на межі "метал-вузькощілинний напівпровідник A_4B_6 " не залежить від роботи виходу досліджених металів, а визначається стабілізацією (піннінгом) рівня Фермі дефектами;

положення рівня Фермі, а значить висота бар'єру Шотткі, залежить як від обробки поверхні напівпровідника, так і від металу та способу його нанесення на поверхню підкладок (хімічне або термічне осадження);

динамічний опір діодів при використанні хімічно неактивних металів вищий, ніж при використанні хімічно активних; при використанні хімічно активних металів переважає генераційно-рекомбінаційний струм; при використанні хімічно неактивних металів при температурі 77 К величину динамічного опору обмежує термоелектронна емісія;

при низьких температурах ($T < 50$ К) переважає тунельний струм через дефекти на межі "метал - напівпровідник".

В цій же главі описані дослідження властивостей фоточутливих структур на основі полікристалічних шарів, вирощених на кремнієвих та скляних підкладках [29,32].

В четвертій главі дисертації описані властивості гетеро-переходів (ГП) $p\text{-Pb}_{0,8}\text{Sn}_{0,2}\text{Te}$ - $n\text{-PbTe}_{0,92}\text{Se}_{0,08}$ та $p\text{-Pb}_{0,8}\text{Sn}_{0,2}\text{Te}$ - $n\text{-PbTe}_{0,97}\text{S}_{0,03}$, а також гомопереходів на основі $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ [15,16,24,26,28,36].

Із дослідження оже-профілів гетеромежі встановлено, що товщина металургійної межі $p\text{-}n$ переходу зменшується в

ізоперіодичних ГП від ~ 10 нм до ~ 5.0 нм при заміні халькогена Se на S; в неізоперіодичних ГП вона становить 20-30 нм.

Методом вольтфарадної спектроскопії встановлено наявність в ізоперіодичних ГП локалізованих поблизу гетеромежі дефектів ґратки. Їх густина досягає величини 10^{11} см $^{-2}$, а рівні дефектів знаходяться поблизу середини забороненої зони при $T = 4.2$ К. Збільшення густини межових дефектів супроводжується зменшенням величини динамічного опору.

Встановлені основні механізми переносу зарядів в ізоперіодичних ГП:

при $T=77$ К переважає дифузійна та генераційно-рекомбінаційна складові, причому збільшення вкладу дифузійної складової приводить до зростання динамічного опору;

при низьких температурах ($4.2 \leq T \leq 50$ К) переважає тунельний механізм переносу зарядів з участю межових дефектів; в ГП з найбільшою густиною дефектів динамічний опір зменшується у вказаній ділянці температур;

при високих температурах ($T > 100$ К) вклад дифузійного струму стає переважаючим;

в ГП р-PbSnTe-n-PbTeSe переважає генераційно-рекомбінаційний струм, причому генераційно-рекомбінаційні процеси характеризуються постійною часу 10^{-9} - 10^{-8} с; в ГП р-PbSnTe-n-PbTeS, переважає дифузійна складова струму; в цих же ГП досягнуті найбільші для одиночних структур значення $R_0A = 20$ Ом см 2 ($\lambda_c = 11.0$ мкм).

В п'ятій главі описані властивості структур з багатьма квантовими ямами (СКЯ) і надґраток (НГ) першого типу PbTe - Pb $_{1-x}$ Sn $_x$ Te [13,17,19,22,38]. Вказані структури вирощувались методом молекулярної епітаксії ("гаряча стінка") на підкладках (001)

PbTe. (001) KCl, (111) BaF₂. Періодичність розподілу шарів досліджувалась за допомогою оже-профілювання та рентгенівської спектроскопії (методу кривих качання). Були вирощені та досліджені НГ і СКЯ n- та р-типу провідності з товщиною шарів від 10.0 до 100.0 нм.

Тип модуляції зон періодичним потенціалом НГ та СКЯ був знайдений із досліджень їх оптичних та електричних властивостей. Було встановлено, що

1) квантові ями знаходяться у шарах більш вузькоцільного Pb_{1-x}Sn_xTe;

2) переходи між мінізонами валентної зони і зони провідності є прямими дипольними переходами і відбуваються між мінізонами з однаковими квантовими номерами $\Delta n = 1$;

3) для НГ і СКЯ вирощених на підкладках (111) BaF₂ основний вклад в коефіцієнт поглинання дають переходи між мінізонами в нахилених долинах $\langle 111 \rangle$ у порівнянні з прямою долиною $\langle 111 \rangle$, що зумовлено більшою густиною станів в цих долинах;

4) особливості в оптичних спектрах СКЯ спостерігались при зміні товщини шарів Pb_{1-x}Sn_xTe в межах від 20.0 до 80.0 нм і не залежали від товщини буферних шарів PbTe.

Співставлення експериментальних результатів досліджень оптичних спектрів НГ та СКЯ з теоретичними розрахунками їх зонного спектра дозволили встановити, що величина розривів зон $\Delta E_c \cong \Delta E_v$. Внаслідок відносно малої глибини квантових ям та малих ефективних мас носіїв квантоворозмірні мінізони "виштовхуються" із квантової ями при товщині шарів $d < 20.0$ нм і спостерігати розмірне квантування зонного спектра при цьому стає неможливим.

Двовимірний характер провідності носіїв в НГ та СКЯ досліджувався шляхом вимірів кутових залежностей слабопольового магнетоопору. Для магнетоопору у загальному випадку можна записати:

$$\Delta\rho/\rho = M_{\varphi}^{\theta} (\mu\text{H}/\text{c})^2 \quad (2)$$

де кути θ та φ визначають відповідно напрям струму по відношенню до вибраної системи координат та напрям вектора магнітного поля в площині його обертання. Терія магнетоопору для тривимірної провідності розроблена в [46]. Використовуються три найбільш важливі конфігурації експерименту, позначені як А,В,С. Важливо відмітити, що у цьому випадку коефіцієнт M_{φ}^{θ} має наступні особливості: 1) він змінюється при зміні конфігурації експерименту; 2) у кожній із вказаних конфігурацій його значення відмінне від нуля, тобто спостерігається кутова залежність слабопольового магнетоопору.

У випадку двовимірної провідності ізоенергетичні поверхні являють собою еліптичні (або кругові) циліндри, вісь обертання яких співпадає з віссю квантоворозмірної структури. Внаслідок такої трансформації ізоенергетичних поверхонь коефіцієнти магнетоопору для конфігурацій В та С співпадають, а для конфігурації А він дорівнює нулю [47], що і спостерігалось на експерименті. В НГ величина магнетоопору на порядок величини більша, ніж у епітаксійних шарах з близькими електричними характеристиками, що пояснюється анізотропією часу релаксації носіїв у випадку двовимірної провідності. Носії з різних ділянок поверхні Фермі характеризуються різним часом релаксації, що навіть у випадку виродженого стану приводить до значного магнетоопору в НГ.

Докази двовимірної провідності в НГ були отримані із досліджень поздовжнього (в площині шарів) та поперечного

транспорту. Були отримані симетричні вольтамперні та вольтфарадні характеристики відносно нульового значення поперечного зовнішнього електричного поля, що є доказом симетричного характеру електростатичного модулюючого потенціалу НГ. Попередні дослідження показують, що при температурі 77 К в поперечному транспорті переважає тунельна складова струму. Відмітимо, що в НГ $\text{PbTe-Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ ($x = 0.20$) отримана величина добутку $R_0A = 70 \text{ Ом см}^2$, що майже на порядок величини переважає величину цього параметра в одиночних гетеропереходах і вказує на можливість створення на основі НГ ефективних ІЧ фотоприймачів з поліпшеними характеристиками.

В шостій главі описані результати досліджень квантоворозмірних структур другого типу (розривних) PbTe-PbS [23,31,33,35,37,39]. Не дивлячись на те, що в НГ та СКЯ першого типу існує можливість перебудови їх зонного спектра за рахунок зміни товщини квантоворозмірних шарів, вона досить обмежена, що пояснюється малою глибиною квантових ям в таких структурах. Більш перспективними для створення фотоприймачів можуть бути НГ та СКЯ другого типу. У цьому випадку глибина квантових ям ΔE може сягати значень, близьких до ширини забороненої зони компонентів. А у так званих НГ другого типу (розривних) величина ΔE може бути більшою від E_g . У випадку квантоворозмірних структур другого типу можна використовувати бінарні сполуки A_4B_6 , більш технологічні у порівнянні з потрійними твердими розчинами. При цьому на таких НГ та СКЯ можуть бути реалізовані фотоприймачі на ділянку спектра, де бінарні сполуки не є фоточутливими.

Виходячи з відомих значень роботи виходу та ширини забороненої зони в PbTe і PbS ($\Phi_{\text{PbS}} = 3.8 \pm 0.1 \text{ eV}$ та $\Phi_{\text{PbTe}} = 4.6 \pm 0.1 \text{ eV}$), можна прогнозувати утворення НГ з коваріантною модуляцією

зон для вказаної пари напівпровідників. Більше того, виходячи з наведених значень цих параметрів, в НГ потолок валентної зони PbS знаходиться вище дна зони провідності PbTe на відстані $\Delta E_v \approx 0.50$ еВ (більш точні розрахунки дають значення цього параметра 0.32 еВ [31, 33, 37]). Це значить, що у даному випадку утворюється НГ другого типу (разривна). Вперше модель такої НГ була запропонована в [48].

В роботі вперше отримані експериментальні докази існування надграток 2-типу на основі напівпровідників A_4B_6 . Були досліджені квантоворозмірні PbTe-PbS, які характеризуються значною невідповідністю постійних ґраток ($a_0(\text{PbTe})=0,6460$ нм, $a_0(\text{PbS})=0,5940$ нм). Вивчені в роботі НГ були вирощені методом "гарячої стінки" на поверхні (001) підкладок KCl при їх температурі ~ 575 К. В якості буферного шару використовувався переважно PbTe товщиною від 10 до 100 нм. Товщина окремих шарів змінювалась в межах від 5,0 до 50,0 нм. Загальна товщина НГ та СКЯ була 2-3 мкм. Максимальне число періодів у отриманих структурах склало 100. Вибір мінімальної товщини шарів був зумовлений вимогою відсутності інтердифузійного перемішування в процесі їх росту. При товщині шарів, яка переважає 2,0 нм, в НГ PbTe-PbS утворюється сітка дислокацій невідповідності, яка заважає перемішуванню компонент та акумулює пружні деформації в шарах. Період НГ визначався по методу Θ - 2Θ сканування.

Існування двомірної провідності в НГ була встановлена із досліджень кутових залежностей слабопольового магнетоопору в двох конфігураціях В та С. Для порівняння досліджувались також характеристики об'ємних шарів та гетероструктур PbTe-PbS, вирощених на підкладках KCl при таких же технологічних режимах. При температурі 77 К епітаксійні шари мали електронний тип

провідності з концентрацією носіїв $n = (2-5) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Приблизно таку ж концентрацію електронів мали гетероструктури. В НГ концентрація залежить від товщини шарів. Найбільш високі значення концентрації $n(77 \text{ K}) = (1-3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ спостерігались в НГ з найбільш тонкими шарами компонент. По мірі збільшення товщини шарів їх концентрація зменшувалась, а електричні характеристики наближались до характеристик об'ємних шарів.

В НГ спостерігалась аномально сильна для вказаних концентрацій носіїв залежність від магнітного поля постійної Холла та поперечного магнетоопору. Якщо в інтервалі значень магнітного поля 0.1-1.0 Тл відносна зміна R_H та поперечного магнетоопору в епітаксійних шарах та гетероструктурах складала від одиниць до порядку 10%, то в НГ - 200-400 %.

В разрывних НГ другого типу концентрація носіїв зумовлена власними переходами носіїв з валентної зони одного із компонент (у даному випадку PbS) в зону провідності іншого. Для цього необхідно, щоб перша мінізона E_c в зоні провідності PbTe знаходилась нижче першої мінізони E_v у валентній зоні PbS. При рівних товщинах d шарів компонентів НГ це відбувається при значеннях $d > d_i$, де d_i з наших оцінок приблизно дорівнює 5,5 нм. При $d > d_i$ в НГ утворюється вироджений електронно-дірковий газ носіїв, що і спостерігалось на експерименті. Зменшення концентрації при збільшенні товщини шарів пояснюється низкою факторів - вигином зон, зумовленого об'ємним зарядом в шарах, а також зменшенням відстані між підзонами, що веде до заповнення вищих мінізон та пониження рівня Фермі. Вигин зон перешкоджає переходу носіїв між шарами, а також впливає на зонний спектр НГ, "виштовхуючи" електронні та діркові підзони в заборонену зону. При товщині шарів

$d > 100$ нм внаслідок великого вигину зон НГ перетворюється в послідовне з'єднання ізольованих гетеропереходів.

В рамках цієї ж моделі можна пояснити польові залежності R_H та ρ . Так як при температурі $T = 77$ К електронний газ в НГ вироджений, для цього необхідно допустити наявність двох типів носіїв. Незалежно від типу провідності окремих шарів, в НГ другого типу існують як електрони, так і дірки, що зумовлено характером модуляції зон періодичним потенціалом. Внаслідок власних переходів між шарами, концентрація носіїв в НГ перевищує концентрацію власних точкових дефектів. При цьому екранування дефектів більш ефективно, ніж в окремих шарах, що пояснює високі рухливості носіїв в досліджених НГ.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ.

1. Встановлені параметри енергетичного спектра валентної зони (величини ефективних мас носіїв у "легкій" і "тяжкій" валентних зонах, енергетичні відстані між дном зони провідності і потолком валентної зони в точці L та Σ зони Бріллюена) в твердих розчинах $Pb_{1-x}Sn_xTe$ ($0 \leq x \leq 0.23$).

2. Вивчені закономірності легування $Pb_{1-x}Sn_xTe$ ($0 \leq x \leq 0.23$) домішками (Ti, Cr, Mn, Cd, Bi, Ga, Tl). Знайдені енергетичні положення квазілокальних (резонансних) та локальних рівнів в легованих кристалах. Показана можливість цілеспрямованої зміни електричних параметрів $Pb_{1-x}Sn_xTe$ ($0 \leq x \leq 0.23$) за допомогою легування домішками.

3. Експериментально доказано, що рівні власних дефектів в PbSe попадають в заборонену зону, що підтверджує результати теоретичних розрахунків, в яких враховується вклад міжелектронної взаємодія на положення рівнів дефектів. Розраховані енергії

утворення власних дефектів в твердих розчинах $Pb_{1-x}Sn_xTe$ та $Pb_{1-x}Sn_xSe$.

4. Досліджені механізми формування бар'єрів та параметри зонної діаграми в діодах Шотткі на основі телуриду свинцю. Встановлені основні механізми переносу заряду у вказаних діодах. Показано, що при використанні хімічно інертних металів динамічний опір в діодах може бути обмежений струмом термоелектронної емісії.

5. Досліджені ізоперіодичні гетеропереходи $p-Pb_{1-x}Sn_xTe - n - PbTe_{1-y}Se(S)_y$ виготовлені методом молекулярної епітаксії. Встановлені параметри зонної діаграми у вказаних гетеропереходах, а також вивчені механізми переносу заряду в широкому інтервалі температур 4.2 - 160 K. Експериментально показано, що при низьких ($T < 60$ K) температурах основним механізмом, який обмежує величину динамічного опору гетеропереходів, є тунелювання з участю дефектів ґратки. Показано, що в ізоперіодичних гетеропереходах величина інтердифузії власних компонент менша, ніж в неізоперіодичних структурах і зменшується при заміні халькогена Se на S. Експериментально встановлено, що величина динамічного опору гетеропереходів зростає при зменшенні інтердифузії на гетеромежах.

6. Методом молекулярної епітаксії виготовлені структури з квантовими ямами та надґратки $PbTe-Pb_{1-x}Sn_xTe$. Показано, що квантові ями в цих структурах знаходяться в шарах вузькощілинного $Pb_{1-x}Sn_xTe$, а тип модуляції зон - контраваріантний (надґратки першого типу).

7. Знайдені параметри енергетичної зонної структури (положення квантоворозмірних зон, величини розривів зон на гетеромежах) в надґратках та структурах з квантовими ямами p - та n -типу провідності. Експериментально встановлено, що квантування

зонного спектра має місце для товщин шарів в межах від 20.0 до 80.0 нм.

8. Досліджено поперечний (вздовж вісі надгратки) та поздовжній (в площині шарів) перенос носіїв в надгратках та структурах з квантовими ямами. Експериментально показана можливість реалізації на їх основі фоточутливих в ІЧ ділянці спектра структур з кращими, ніж в одиночних гетеропереходах, характеристиками.

9. Виготовлені надгратки та структури з квантовими ямами PbTe-PbS, товщина шарів в яких змінювалась від 5.0 до 100.0 нм. Показано, що ці квантоворозмірні структури мають коваріантний тип модуляції зон. Причому реалізується ситуація, коли дно зони провідності PbTe знаходиться нижче потолка валентної зони PbS, тобто утворюється квантоворозмірна структура другого типу, розривна. Знайдена величина розриву зон на гетеромежах у вказаних структурах $\Delta E_v = 0.32$ еВ.

Публікації по темі дисертації.

1. Влияние примеси переходных элементов (Ti) на зонный спектр PbTe/ Сизов Ф.Ф., Тетеркин В.В., Прокофьева Л.Е., Гуриева Е.А. // Физ. и техн. полупр. - 1980. - **14**, в.9. - С.1788-1791.

2. Энергетическое состояние примеси марганца и ее влияние на кинетические, оптические и магнитные свойства узкощелевых твердых растворов $Pb_{1-x}Sn_xTe$ / Лашкарев Г.В., Радченко М.В., Сизов Ф.Ф., Слынько Е.И., Тетеркин В.В. // Укр. физ. журн. - 1981. - **26**, N7. - С.1173 - 1176.

3. Гальваномагнитные и оптические свойства узкощелевых полупроводников $Pb_{1-x}Sn_xTe$. Влияние примесей кадмия и висмута /

Кондратенко М.М., Орлецкий В.Б., Сизов Ф.Ф., Тетеркин В.В. // Там же - **27**, №6.- С. 920- 925.

4. Сизов Ф.Ф., Тетеркин В.В. Край поглощения в $Pb_{1-x}Sn_xTe$ ($x < 0.23$) // Журнал. приклад. спектроскоп. - 1982.- **36**, в.2.- С.291-295.

5. Резонансные состояния примесей переходных элементов (Ti, Cr) в PbTe /Тетеркин В.В.,Сизов Ф.Ф., Прокофьева Л.В., Громовой Ю.С., Виноградова М.Н.// Физ. и техн.полупр.- 1983.- **17**, в.5. - С.782-785.

6. Сизов Ф.Ф., Тетеркин В.В., Пляцко С.В. Собственная концентрация носителей и параметры зоны тяжелых дырок в узкозонном $Pb_{1-x}Sn_xTe$ // Там же - 1984.- **18**, в. 9.- С. 1608- 1611.

7. Поведение примеси Ga в монокристаллах PbTe / Лакеенков В.М., Тетеркин В.В., Сизов Ф.Ф., Пляцко С.В., Белоконь С.А. //Укр. физ. журнал. -1984.-**29**, №5.- С.757-759.

8. Компенсация вакансий узкощелевого $Pb_{1-x}Sn_xTe$ примесными атомами Cd / Гуцуляк В.Г., Орлецкий В.Б., Пляцко С.В., Сизов Ф.Ф., Тетеркин В.В. //Там же - 1985. - **30**, №3. -С. 399-404.

9. Преобразование дефектов в узкощелевом $Pb_{1-x}Sn_xTe$ /Сизов Ф.Ф., Пляцко С.В., Дарчук С.Д., Тетеркин В.В., Громовой Ю.С.//Физ.и техн.полупр.-1986. -**20**, в.12.- С.11

10. Свойства контактов металл-PbTe /Сизов Ф.Ф., Тетеркин В.В.,Троян Ю.Г., Чопик В.Ю. //Опт. и техн. полупр.- 1987. -в.12 - С.47-51.

11. Поведение примеси индия в монокристаллах PbTe /Белоконь С.А., Сизов Ф.Ф., Пляцко С.В., Дарчук С.Д., Тетеркин В.В. // Изв. АН СССР. Сер. Неорг. матер.- 1988 -**24**. N10 - С. 1618-1622.

12. Properties of the Schottky barriers on compensated $\text{PbTe}<\text{Ga}>$ / Sizov F.F., Tetyorkin V.V., Troyan Yu.G., Chopik V. Yu. // *Infrared Phys.* - 1989. - N2-4 - P.271- 277.

13. Структуры с квантовыми ямами на основе $\text{PbTe}/\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ / Сизов Ф.Ф., Троян Ю.Г., Тетеркин В.В., Апатская М.В., Гуменюк-Сычевская Ж.В. // *Изв. АН СССР. Сер. физ.* - 1989. - **53**, в.9.-С. 1812-1815.

14. Тетеркин В.В., Белоконь С.А. Резонансные состояния в монокристаллах $\text{PbTe}<\text{TI}>$, выращенные методом Чохральского // *Физ. и техн. полупр.* - 1989. - **23**, в.11.-С.2096- 2098.

15. Свойства гетеропереходов $p\text{-Pb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}\text{Te}/n\text{-PbTe}_{0.92}\text{Se}_{0.08}$ / Тетеркин В.В., Сизов Ф.Ф., Чопик В.Ю., Алленберг В.Б. // *Опт. и полупр. техн.* - 1989. - в. 15. - С.33-37.

16. Carrier transport mechanisms and photoelectrical properties of $\text{PbSnTe}/\text{PbTeSe}$ heterojunctions / Tetyorkin V.V., Sizov F.F., Alenberg V.V., Copik V.Yu. et. al. // *Infrared Phys.* - 1990. - **30**, N6.- P. 499-504.

17. Электрофизические свойства сверхрешеток $\text{PbTe}/\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ / Апатская М.В., Сизов Ф.Ф., Тетеркин В.В., Ушанкина Н.Н. // *Физ.и техн. полупр.* - 1989. - **23**, в.7.- С.1203-1206.

18. Граница раздела и свойства выпрямляющих контактов $\text{In}(\text{Cu})/\text{PbTe}$ // Сизов Ф.Ф., Сава А.А., Тетеркин В.В., Бунчук С.Г., Белоконь С.А. // *Известия АН СССР. Сер. Неорг. матер.* - 1990. - **26**, в.27. - С. 1193-1198.

19. Electrical properties of $\text{PbTe}/\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ multiple quantum wells // Sizov F.F., Apaskaya M.V., Gumenjuk -Sichevskaya J.V., Tetyorkin V.V. and Troyan Yu.G. // *Semicond. Sci. Technol.* - 1990. - **5**. - P. 928-932.

20. Свойства монокристаллов твердых растворов $\text{PbSe} - \text{CdSe}(\text{CdS})$ / Тетеркин В.В., Томашик З.Ф., Томашик В.Н., Олейник

С.Г. // Изв. АН СССР. Сер. Неорг. матер.-1991.-**27**, в.7.- С. 1539-1541.

21. Влияние особенностей зонной структуры на процессы переноса в $Pb_{1-x}Sn_xTe$.1. Подвижность. / Бондаренко В.В., Шендеровский В.А., Тетеркин В.В. // Укр. физ. журн.-1991.- **36**, N3.- С.440-446.

22. Properties of PbTe/PbSnTe multiple QWs / Sizov F.F., Tetyorkin V.V., Gumenjuk-Sichevskaya J.V., Apatskaya M.V. // Superlattice and Microstruct.-1991. -**9**, N3.- P. 483-488.

23. Сизов Ф.Ф., Тетеркин В.В., Давиденко С.Н. Электрофизические свойства сверхрешеток PbTe/PbS // ДАН Украины-1992.- в.6.- С.68-71.

24. Пограничные состояния в гетеропереходах PbSnTe/PbTeS / Тетеркин В.В., Сизов Ф.Ф., Аленберг В.Б., Давиденко С.Н., Чопик В.Ю.//Укр. физ. журн.-1993.-**38**, N5. - С. 757-763.

25. Давиденко С.Н., Сизов Ф.Ф., Тетеркин В.В. / Сверхрешетки второго типа (разрывные) PbTe/PbS .Там же - 1993. - **38**, N6.- С.124-129.

26. Фотоэлектрические свойства и механизмы переноса заряда в гетеропереходах p-Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te - n- PbTe_{0,97}S_{0,03} / Тетеркин В.В., Аленберг В.Б., Сизов Ф.Ф., Давиденко С.Н., Чопик В.Ю. // Опт. и полупр. техн.- 1993.- в.25.- С.28-32.

27. Параметры зонного спектра, электрофизические и магнитные свойства четверных полумагнитных полупроводников HgCdMnTe / Гавалешко Н.Н., Тетеркин В.В., Сизов Ф.Ф., Паранчич С.Ю. // Физ. и техн. полупр.-1993. -**27**, в.3 - С. 459- 464.

28. Interface states in PbSnTe/PbTeS heterodiodes / Tetyorkin V.V., Sizov F.F., Alenberg V.B., Chopik V.Yu. // Infrared Phys. - 1993. - 34, N6. - P. 589-593.

29. Электрические свойства фоточувствительных поликристаллических пленок PbSe / Тетеркин В.В., Орлецкий В.Б., Сизов Ф.Ф., Фотий В.Д., Таштанбаев Н.О. // Опт. и полупр. техн. - 1993. - в.25 - С. 28-32.

30. Выращивание монокристаллических твердых растворов $(\text{SnTe})_x [\text{Zn}(\text{S.Se})]_{1-x}$ и исследование их электрофизических свойств // Буденная Л.Д., Горбик П.П., Дубровин И.В., Дякин В.В., Тетеркин В.В. // Изв. АН России. Сер. Неорг. материалы - 1994. - **30**, в. 2. - С. 172 - 175.

31. Band structure and properties of PbTe/PbS superlattices / Sizov F.F., Tetyorkin V.V., Golovin V.G., Gumenjuk - Sichevskaya J.V., Zabudsky V.V., Kulumbetov J. // Physics of Low-Dimensional Structures - 1994. - N6 - P.19-32.

32. Mechanisms of dark conductivity and photosensitivity in PbSe polycrystalline films on glass and Si substrates / Tetyorkin V.V., Sizov F.F., Orletskii V.B. // Optical Engineering - 1994. - **33**, N5 - P. 1450-1453.

33. Планарная проводимость и разрывы зон в сверхрешетках PbTe/Pbs // Сизов Ф.Ф., Тетеркин В.В., Давиденко С.Н., Кулумбетов Ж., Головин В.Г. // Опт. и полупр. техн. - 1994. - в.28 - С.65-70.

34. Фоточутливі гібридні структури PbSe/Si / Тетьоркін В.В., Орлецкий В.Б., Сизов Ф.Ф., Гуцуляк В.Г., Таштанбаев Н.О. // Укр. фіз. журн. - 1994. - N4. - С. 505 -508.

35. Band-offset and electronic properties of type-II PbTe/PbS superlattices / Sizov F.F., Gumenjuk - Sichevskaya J.V., Tetyorkin V.V., Zabudsky V.V. // Acta Physica Polonica A. - 1995. - **87**, N2 - P. 441-444.

36. Characterisation of p-on-n HgCdTe diffusion photodiodes / Tetyorkin V.V., Rutkowski J., Rogalski A., Sizov F.F. // Proc.SPIE - 1995. - 2373.-P. 380-385.

37. Properties of type II mismatched PbTe/PbS superlattices / Sizov F.F., Gumenjuk - Sichevskaya J.V., Tetyorkin V.V., Zabudsky V.V. and Golovin V.G. // Proc.SPIE - 1995. - 2373.- P.190-195.

38. IV-VI compositional MQWs and SLs for optoelectronic applications / Tetyorkin V.V., Sizov F.F., Svechnikov S.V., Golovin V.G.// Material Science and Engineering - 1995. - **B35** - P. 76-79.

39. Zabudsky V.V., Sizov F.F., Tetyorkin V.V. Semiconductor multilayer structure and type II electrical characteristic simulation // Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. - 1995. - 3.- P.575-582.

40. Электрически активное состояние примеси кобальта в теллуриде свинца / Асоцкий В.В., Кузнецова Т.А., Лашкарев Г.В., Радченко М.В., Тананаева О.И., Тетеркин В.В. // Физ. и техн. полупр. - 1996. - **30**, в. 1 - С. 153-158.

41. (001)-oriented lead selenide films grown on silicon substrates / Tetyorkin V.V., Sipatov A.Yu., Sizov F.F., Fedorenko A.I., Fedorov A.// Infrared Phys. and Technol.- 1996. - **37**, N3.- P.379-384.

42. Способ изменения равновесной концентрации свободных носителей тока в полупроводниках $Pb_{1-x}Sn_xTe$ ($x < 0.23$) / Сизов Ф.Ф., Тетеркин В.В., Пляцко С.В., Лисица М.П. // А.С.1190859 (1985).

43. Способ регулирования равновесной концентрации носителей тока в полупроводниках $Pb_{1-x}Sn_xTe$ / Сизов Ф.Ф., Тетеркин В.В., Пляцко С.В., Дарчук С.Д. // А.С. N129595 (1986).

44. Способ изготовления диода Шоттки на теллуриде свинца / Тетеркин В.В., Сизов Ф.Ф., Бунчук С.Г., Апатская М.В., Белоконь С.А. // А.С. N1577616 (1990).

Цитована література.

45. Кайданов В.И., Равич Ю.И. // Успехи физ. наук.- 1985.- **145**, в.1.- 51-86.

46. Allgaier R.S., Restoff J.B., Houston B. // Phys. Rev.B.- 1979.- **19**, N12.- P.6155-6163.

47. Kriechbaum M., Ambrosh K.E., Fantner E.J. et. al. // Phys. Rev.- 1984.- **30**, N6.- P.3394-3405.

48. Chang L.L., Esaki L. // Surf. Sci.- 1980.- **98**.-P.70.

РЕЗЮМЕ.

Тетеркин В.В. Зонные и дефектные состояния в узкощелевых полупроводниках и структурах на их основе.

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 44 научные работы, в которых содержатся результаты исследований зонного спектра и дефектных состояний в узкощелевых полупроводниках (УП), а также структурах на их основе, таких как диоды Шоттки, гетеропереходы, композиционные сверхрешетки и структуры с вантовыми ямами.

Изучены закономерности и механизмы легирования УП. Найдено положение уровней собственных дефектов и примесей.

Исследованы механизмы переноса заряда в диодных структурах. Установлен тип модуляции зон в квантоворазмерных структурах УП и величины разрывов зон на гетерограницах. Показана возможность создания на их основе приборов ИК техники с улучшенными параметрами.

Ключові слова:

напівпровідник вузькощільний, інфрачервоний, гетеро-структури, надгратки, квантові ями, діоди Шотткі, ІЧ фотоприймачі

ABSTRACT.

Tetyorkin V.V. Band and defect states in the narrow-gap semiconductors and structures on their basis.

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 of National Academy of Sciences of Ukraine. Kiev. 1996.

44 research work are defended. This thesis is dedicated to investigation of the band structures and deep defect states of the narrow-band gap semiconductors as well as of the structures on their bases, such as heterojunctions, superlattices and multiple quantum well structures.

The behavior of impurities in A_4B_6 narrow-gap semiconductors is studied. The location of resonant and deep defect states in the gap is found. The mechanism of dark conductivity in diode structures are investigated. The type of the superlattices and the band offset values are determined. The possibility is shown to exist to make the IR devices with improved characteristics.

Подписано к печати 14.10.96г. Формат 60x84/16.
Объем: 1.6 усл.-печ.л., 1.6 уч.-изд.л.
Тираж 100. Заказ 58.

Типография во Флоровском монастыре
тел. 416-54-62

44102

AB 35.923