

ЧЕРНІВЕЦЬКИЙ ДЕРЖУНІВЕРСИТЕТ ІМ.ЮРІЯ ФЕДЬКОВИЧА

На правах рукопису

ХЛЯП ГАЛИНА МИХАЙЛІВНА

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ
ГЕТЕРОПЕРЕХОДІВ НА ОСНОВІ
СУЛЬФІДУ СВИНЦЮ І СПОЛУК A_2B_6**

01.04.10 - ФІЗИКА НАПІВПРОВІДНИКІВ І ДІЕЛЕКТРИКІВ

АВТОРЕФЕРАТ
ДИСЕРТАЦІЇ НА ЗДОБУТТЯ НАУКОВОГО СТУПЕНЯ
КАНДИДАТА ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНИХ НАУК

ЧЕРНІВЦІ - 1995

021.315.57
537.226

AB 33.083

Дисертацією в рукопис

Робота виконана у Дрогобицькому
і Ярославському держуніверситеті

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00761214 (L)

Наукові керівники - кандидат фізико-математичних наук,
доцент БОГДАНОСЬКИЙ Анатолій Вікторович
кандидат фізико-математичних наук,
доцент ЯЦИВИН Василь Петрович

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
професор РАРЕНКО Іларія Михайлович,
кандидат фізико-математичних наук,
доцент БОДНАР В'ячеслав Дмитрович

Провідна установа: Державний університет "Львівська політехніка"
(м. Львів)

Захист відбудеться "27" жовтня 1995 р. о 15 год. на
засіданні спеціалізованої вченої ради Д 07.01.06 при Чернівецько-
му державному університеті ім. В.Федьковича.

Адреса: 274012, м. Чернівці, вул. Коцюбинського, 2.

З дисертацією можна ознайомитись в науковій бібліотеці
Чернівецького державного університету (вул. Лесі Українки, 23)

Автореферат розісланий "20" вересня 1995 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Курганецький Н.В.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Монокристали сполук $A2B6$ ($ZnSe$, $ZnTe$, $HgCdTe$) і плівки сульфїду свинцю вивчалися давно і досліджені досить повно. У даний час, у зв'язку із збільшенням зацікавленості до контактів напівпровідникових матеріалів, які відносяться до різних груп Періодичної системи елементів ($A2B6$ - $A3B5$, $A4B6$ - $A2B6$ та ін.), а також інтенсивне освітлення ІЧ-діапазону, необхідність розробки відповідних оптико-і мікроелектронних приладів зумовили підвищений інтерес дослідників до вузькозонних напівпровідників, серед яких особливе місце займають калькогенїди свинцю, зокрема, PbS .

Успіхи у розвитку різноманітних технологій одержання напівпровідникових матеріалів, зокрема, методу молекулярно-променевої епітаксії, який дозволяє отримувати плівки сульфїду свинцю із наперед заданими властивостями, роблять перспективним створення різноманітних мікроелектронних пристроїв на базі гетероструктур типу монокристал - шар, одним із компонентів яких є плівки сульфїду свинцю.

Ступінь дослідженості теми та її висвітлення в літературі.

Селенід і телурид цинку, що належать до групи сполук $A2B6$, є широкозонними матеріалами з шириною забороненої зони 2.72 і 2.26 еВ, відповідно, твердий розчин телуриду кадмію - ртуті є варіонним напівпровідником. Вказані матеріали досліджені досить детально і є компонентами фоточутливих і люмінесцентних приладів, що працюють у видимій та далекій ІЧ-областях спектру.

Сульфід свинцю - вузькозонний матеріал з класу сполук $A4B6$ ($E_g = 0.41$ еВ). Як показали сучасні дослідження, полі- та монокристалічні плівки сульфїду свинцю володіють високою фоточутливістю у близькій ІЧ-області спектру, що зумовило їх застосування у якості активних елементів різноманітних охолоджуваних пристроїв.

Проте у сучасній вітчизняній і зарубіжній літературі відсутні відомості про дослідження гетероструктур на основі сполук $A2B6$ і $A4B6$, зокрема, гетероструктур PbS - $ZnSe$, PbS - $ZnTe$, PbS - $HgCdTe$.

Актуальність отримання і дослідження даних гетероструктур пов'язана із перспективністю їх використання у системах прийому і обробки інформації у широкому спектральному інтервалі і при від-

носно високих (аж до кімнатної) температурах. Одним із суттєвих переваг цих гетероструктур є можливість використання шару просторового заряду, який виникає між гетерокомпонентами, у якості накопичувача і перетворювача оптичної інформації. Враховуючи всі ці аспекти, сформульована мета роботи і основні завдання дисертації.

Мета роботи. Виявлення основних фізичних закономірностей, які мають місце у гетероструктурах на основі сульфїду свинцю і сполук А2В6 типу монокристал-шар, які одержано методом молекулярно-преневої епітаксії сульфїду свинцю на кристалічні підкладки ZnSe, ZnTe, Hg_{1-x}Cd_xTe (x=0.2; 0.4) з метою покращення існуючих і створення нових мікроелектронних і оптичних ІЧ приладів на їх основі.

Звідси основні завдання наукового дослідження:

- провести комплексне дослідження електрофізичних (вольт-амперних (ВАХ) і вольт-фарадних (ВФХ) характеристик гетероструктур PbS-ZnSe, PbS-ZnTe, PbS-HgCdTe у температурному інтервалі 77-293 К, на їх основі оцінити робочі параметри і виявити механізми струмопроходження;

- вивчити випромінювальні і фотоелектричні властивості вказаних гетероструктур в області температур 77-293 К і дослідити вплив довгочасового зберігання зразків у нормальних умовах на основні електричні і випромінювальні характеристики вказаних гетероструктур;

- розрахувати параметри зонних діаграм досліджуваних гетероструктур і на їх основі дати інтерпретації фізичних процесів.

На захист виносяться:

1. Різні ізотипні і анізотипні гетероструктури на основі плівок сульфїду свинцю і монокристалів n-ZnSe, p-ZnTe, p-Hg_{1-x}Cd_xTe (x=0.2, 0.4).

2. Визначені по температурних залежностях ВАХ і ВФХ процеси струмопроходження у гетеропереходах на основі сульфїду свинцю і селенїду і телуриду цинку (n-PbS-n-ZnSe, p-PbS-n-ZnSe, n-PbS-p-ZnTe).

3. Визначені по температурних залежностях ВАХ і ВФХ процеси струмопроходження в ізотипних гетеропереходах p-PbS-p-Hg_{1-x}Cd_xTe (x=0.2, 0.4).

4. Випромінювальні і фотоелектричні властивості досліджуваних

гетероструктур на основі сульфідів свинцю і сполук As_2S_3 .

Теоретична і практична цінність дослідження.

По температурних залежностях вольт-амперних і вольт-Фарадних характеристик розраховано основні параметри області просторового заряду досліджуваних гетероструктур: ширина N , емісія C_{ss} , повний заряд Q_{ss} і густина N_{ss} електронних поверхневих станів.

На основі моделі Харрісона - Френсі - Крекера розраховано параметри і побудовано енергетичні зонні діаграми досліджуваних гетероструктур.

У рамках теорії різких гетеропереходів розраховано вольт-амперні характеристики досліджуваних структур.

Показано можливість використання досліджуваних гетероструктур для створення мікроелектронних приладів, які можуть працювати в залежності від типу провідності епітаксialного шару сульфідів свинцю і другого контактуючого матеріалу у видимій та близькій ІЧ-областях спектру у широкому температурному інтервалі.

Нацкова новизна роботи. При виконанні дисертації: - вперше методом низькотемпературної молекулярно-променевої епітаксії отримані гетероструктури типу монокристал-шар на основі кристалів селеніду і телуриду цинку, твердого розчину телуриду кадмію-ртуті і епітаксialних шарів сульфідів свинцю n- і p-типів провідності;

- показано, що гетероструктури на основі сульфідів свинцю і селеніду цинку володіють випромінювальними властивостями у спектральній області 0.4 - 0.9 мкм;

- встановлено, що всі досліджувані гетероструктури є фоточутливими в області довжин хвиль 2 - 5 мкм у температурному інтервалі 77-293 К;

- на основі комплексних досліджень в області температур 77-293 К проведено аналіз фізичних процесів переносу носіїв заряду у досліджуваних гетероструктурах і розраховано їх вольт-амперні характеристики.

Апробація роботи. Матеріали дисертації доповідались і обговорювались на окремих стадіях її виконання на 10 конференціях і симпозіумах. Основні з них: 1 та 2 Українські міжвузівські конференції з матеріалознавства напівпровідників і фізики фаз змінного складу (Київ, 1991, 1993), конференції молодих вчених (Ярославль, 1990-1992), IV Міжнародна конференція з фізики і тех-

нології тонких плівок (Івано-Франківськ, 1993), Міжнародна конференція "Фізика в Україні" (Київ, 1993), Міжнародний симпозіум з фізики напівпровідників ISDRS'93 (Нарлотсвіль, США, 1993).

Публікації. Основні матеріали дисертації опубліковані у 13 роботах. (Список основних статей приведений у кінці автореферату.

Конкретний особистий внесок дисертанта у розробку наукових результатів, що виносяться на захист.

Дисертанткою розроблені важливі елементи апаратури для електрофізичних вимірювань. Приймала участь у дослідженні структурної досконалості плівок сульфїду свинцю. Провела розрахунки ВАХ досліджуваних структур. Була ініціатором експериментів і опрацювала результати вимірювань вольт-фарадних залежностей. Ініціатор досліджень випромінювальних і фотоелектричних властивостей гетероструктур $n\text{-PbS-p-ZnSe}$, $p\text{-PbS-p-HgCdTe}$. Приймала участь у підготовці експериментів, написанні наукових статей. Приймала участь у НДР по промислово-придатних технологіях і конструкціях мікроелектронних приладів.

Характеристика методології, методи дослідження предмету і об'єкта. Вирощування плівок сульфїду свинцю на монокристалічних підкладках ZnSe , ZnTe і HgCdTe проводилося методом молекулярно-променевої епітаксії. Для дослідження структурної досконалості плівок застосовані добре випробувані методи рентгеноструктурного аналізу, електронної мікроскопії та електронного Оже-аналізу. Для теоретичних досліджень фізичних параметрів отриманих гетероструктур застосовані засоби сучасної фізики поверхні і теоретичної фізики, зокрема, метод Мотта-Костянтінова. Для дослідження випромінювальних і фотоелектричних властивостей використана криостатна техніка ЯрдУ і ДДПІ.

Структура і об'єм дисертації.

Дисертація складається з вступу, де подані актуальність, мета, обґрунтування та постановка задач, наукова і практична цінність, положення, що захищаються, апробація; п'яти розділів, основних результатів і висновків, додатку та списку літератури. Загальний об'єм роботи 133 сторінок, вклаваччи 60 рисунків, 7 таблиць. Список літератури складається з 80 найменувань.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність вибраної теми, сформульовані мета і основні завдання роботи, її наукова новизна, практична цінність дослідження, представлені положення, що виносяться на захист, короткий зміст розділів та відомості про апробація.

В першому розділі на базі літературних даних проведений аналіз фізико-хімічних властивостей сульфїду свинцю і сполук А2В6, а також характеристики гетероструктур, де вони є складовими компонентами.

Показано, що в даний час інтенсивно досліджуються гетероструктури на основі селенїду і телуриду цинку ($ZnTe-CdTe$, $ZnSe-GaAs$, $ZnSe-ZnTe$, $ZnSe-CdTe$, $ZnTe-Zn(1-x)Cd(x)Te$) з метою їх застосування у якості активних елементів оптоелектронних приладів для спектральної області 0.4 - 2.1 мкм у температурному інтервалі 180 - 293 К, а також гетероструктури на основі твердого розчину $Hg(1-x)Cd(x)Te$ ($Hg(1-x)Cd(x)Te-CdTe$, $Hg(1-x)Cd(x)Te-HgTe$), отримані різними технологічними методами.

З'ясовано, що на момент постановки основних задач дисертаційної роботи найбільш вивченими структурами на основі сульфїду свинцю є наступні: $PbS-Ge$, $PbS-Si$, $PbS-GaAs$.

У той же час відсутні відомості про одержання і властивості гетероструктур, компонентами яких є матеріали класів А2В6 і А4В6, їх електрофізичні, фотоелектричні та випромінювальні властивості. Тому дослідження гетероструктур на основі плівок сульфїду свинцю, селенїду і телуриду цинку і твердого розчину $HgCdTe$ викликає особливий інтерес.

У другому розділі викладено методику постановки експерименту. Для дослідження відбиралися зразки ізотипних ($n-PbS-n-ZnSe$, $p-PbS-p-Hg(1-x)Cd(x)Te$ ($x=0.2; 0.4$)) та анізотипних ($p-PbS-i-ZnSe$, $n-PbS-p-ZnTe$) гетероструктур, одержаних молекулярно-променевою епітаксією сульфїду свинцю на відповідні підкладки при наступних умовах: $t=380^{\circ}C$, $P=10^{-4}Torr$. Безпосередньо після закінчення процесу епітаксії визначалися тип провідності і основні електричні параметри плівок сульфїду свинцю. Тип провідності плівок визначався як на зразку-свідку, так і безпосередньо на підкладці. Основні параметри одержаних гетероструктур наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Параметри гетероструктур на основі сульфідів свинцю і сполук А2В6

Сполука	Питомий опір, Ом·см	Концентрація основних носіїв заряду, см ⁻³
PbS	$(1 \div 2) \cdot 10^{-2}$	$(2.8 \div 4.5) \cdot 10^{17}$
ZnSe	$3 \cdot 10^{-1}$	$3.0 \cdot 10^{16} \div 2.8 \cdot 10^{17}$
ZnTe	10	$(3.5 \div 6.3) \cdot 10^{16}$
Hg, Cd, VTe	10	$(1.5 \div 1.8) \cdot 10^{16}$

Товщина плівок сульфідів свинцю складала 1-3 мкм, товщина монокрystalічних підкладок становила 2-4 мм, електрично активна площа гетеропереходів знаходилася в межах 3-8 мм².

У якості вимірвальних контактів для дослідження електрофізичних характеристик використовувалися індій і сплави індій-олово, індій-кадмій. ВАХ контактів носили лінійний характер, їх питомий опір знаходився в межах $(2 - 4) \cdot 10^{-5}$ Ом·см.

Описано установки для дослідження електрофізичних, фотоелектричних і випромінювальних властивостей вквзаних гетероструктур з виводом експериментальних результатів на ЕОМ. Експеримент провадився у температурному інтервалі 77-293 К.

Для збудження люмінесценції і фотовідклику використовувалися джерела світла з довжинами хвиль 0.28 - 0.34 мкм.

У третьому розділі наведено результати досліджень електрофізичних властивостей гетероструктур на основі сульфідів свинцю і сполук А2В6.

Встановлено, що ВАХ всіх досліджуваних гетероструктур є різко несиметричними з коефіцієнтом нелінійності порядку $10^2 - 10^6$ одиниць у діапазоні прикладених зміщень $0 < U_a < 4,0$ В і температурному інтервалі 77-293 К.

За експериментальними ВАХ і за допомогою метода еквівалент-

них схем визначено основні параметри досліджуваних гетероструктур, а саме: опір базової області R_b і дифузійний потенціал U_d . Отримано наступні результати: опір базової області гетероструктур $n\text{-PbS}-p\text{-ZnSe}$ і $p\text{-PbS}-n\text{-ZnSe}$ складає $(1.3-1.5) \cdot 10^4$ Ом і $4.0 \cdot 10^5$ Ом, відповідно, і від температури практично не залежить. R_b гетероструктури $n\text{-PbS}-p\text{-ZnTe}$ зростає від $5.0 \cdot 10^5$ Ом при 293 К до $1.3 \cdot 10^6$ Ом при 200 К. Для гетероструктури $p\text{-PbS}-p\text{-Hg}_6\text{Cd}_4\text{Te}$ величина R_b збільшується від $5.4 \cdot 10^3$ Ом при 77 К до $6.5 \cdot 10^4$ Ом при 293 К.

Величина дифузійного потенціалу U_d для всіх досліджуваних гетероструктур знаходиться в інтервалі 0.7 - 1.7 В при віштаній температурі і зростає при зниженні температури до азотної.

При дослідженні ВАХ встановлено, що всі одержані гетероструктури є різкими гетеропереходами, про що свідчить вигляд залежності $C^{-2} = f(U_a)$ (пряма лінія) в усій області температур і зміцень. Значення дифузійного потенціалу U_{di} , отримані за екстраполяцією залежностей $C^{-2} = f(U_a)$ до осі напруг, для всіх досліджуваних гетероструктур є відмінними від величин U_d , одержаних за експериментальними ВАХ, що свідчить про наявність значної кількості електронних поверхневих станів на гетерограниці.

За допомогою моделі Андерсона - Червені, розробленої для різних гетеропереходів, оцінено електричні параметри області просторового заряду досліджуваних гетероструктур (табл.2).

Аналіз отриманих даних показав, що просторовий заряд зміщений в область широкозонного матеріалу. Число поверхневих станів співпадає з величиною N_{ss} , розрахованою за теорією Олдхема-Мілиса, згідно якої визначається число поверхневих дефектів, що виникають за рахунок розбіжності параметрів кристалічної ґратки контактних матеріалів.

Таблиця 2.

Електричні параметри області просторового заряду.

Гетероперехід	Повний заряд поверхневих електронних станів Q_{SS} , Кл · см ⁻²	Густина поверхневих електронних станів N_{SS} , еВ · см ⁻²	Видна область просторового заряду W , мкм	Ємність області просторового заряду C_{SS} , Ф · см ⁻²
T=293 K				
n-PbS-n-ZnSe	$7.1 \cdot 10^{-7}$	$4.4 \cdot 10^{12}$	0.07	$6.7 \cdot 10^{-8}$
p-PbS-n-ZnSe	$2.1 \cdot 10^{-6}$	$1.3 \cdot 10^{13}$	0.11	$1.1 \cdot 10^{-8}$
n-PbS-p-ZnTe	$1.4 \cdot 10^{-6}$	$8.8 \cdot 10^{11}$	0.13	$1.3 \cdot 10^{-8}$
p-PbS-p-Hg.6Cd.4Te	$1.4 \cdot 10^{-7}$	$8.8 \cdot 10^{14}$	0.10	$3.19 \cdot 10^{-8}$

У цьому ж розділі описано вплив зберігання зразків у нормальних умовах на протязі 2,5 - 3,0 років на електрофізичні властивості досліджуваних гетероструктур. Встановлено, що для окремих зразків ізотипних n-n-гетеропереходів PbS-ZnSe з концентрацією носіїв заряду у підкладці $7.8 \cdot 10^{18}$ см⁻³ відбувається зміна вигляду ВАХ: якщо безпосередньо після виготовлення гетероструктури ВАХ були лінійними в області змічень 0 - 20 В і температурному інтервалі 77-293 К, то після зберігання зразків на протязі 2,5 року вигляд ВАХ суттєво змінився: вони стали різко несиметричними з коефіцієнтом нелінійності $\sim 10^5$ в області напруг 0 - 3 В в тому ж самому температурному інтервалі. Вигляд ВФХ не змінився, значення ємнісного дифузійного потенціалу U_{dL} при кімнатній температурі зменшуються приблизно в 2 рази.

При дослідженні зразків інших гетероструктур (p-PbS-n-ZnSe,

$n\text{-PbS-p-ZnTe}$, $p\text{-PbS-p-Hg1-xCdxE}$) подібне явище не виявлено.

У четвертому розділі розглянуто випромінювальні і фотоелектричні властивості досліджуваних гетероструктур.

Встановлено, що випромінювальними властивостями володіють лише гетеропереходи на основі сульфиду свинцю і селеніду цинку, як при збудженні електричним полем, так і при взаємодії структур із світлом з довжиною хвилі $0.28 - 0.40$ мкм при температурі рідкого азоту, із збільшенням температури до 110 К інтенсивність свічення різко падала.

Електролюмінесценція рееструвалася на зразках при прикладанні прямиго і оберненого змідень величиною $2 - 6$ і $12 - 18$ В, відповідно. Незалежно від напрямку прикладеної до зразків напруги спектри електролюмінесценції охоплювали широку область $0.47 - 0.80$ мкм.

Фотолімінесценція збуджувалась підсвіткою джерелом світла довжиною хвилі 0.38 мкм як з боку підкладки ZnSe , так і з боку плівки PbS перпендикулярно площині гетеропереходу. Спектральна область співпадала із спектром електролюмінесценції.

Аналіз спектрів фотолімінесценції гетеропереходів PbS-ZnSe , проведений за методом Аленцева - Фока, показав, що спектри складаються з кількох елементарних смуг з наступними положеннями максимумів: $\lambda_1 = 0.52$ мкм, $\lambda_2 = 0.56$ мкм, $\lambda_3 = 0.64$ мкм. Це свідчить про те, що випромінювальні процеси відбуваються, в основному, у матеріалі підкладки. Оскільки спектр являє собою досить широку смугу випромінювання, то у цьому процесі задіяно велику кількість дефектних рекомбінаційних центрів широкозонного матеріалу.

При вивченні фотоелектричних властивостей встановлено, що fotocутливість володіють всі досліджувані гетероструктури (зарєстровано фотовідклик в області довжин хвиль $2 - 5$ мкм і температурному інтервалі $77 - 293$ К). Максимальне значення фототоку холостого ходу не перевищувало 23 мкА. Співставлення положень максимумів спектрального розподілу фототоків і фотолімінесценції у випадку анізотипного гетеропереходу $p\text{-PbS-n-ZnSe}$ з величинами заброньову зони компонентів гетероструктури дозволяє зробити висновок, що дані максимуми відповідають фундаментальному поглинанню у сульфіді свинцю.

При дослідженні впливу природнього старіння на фотоелектрич-

ні властивості встановлено, що фотовідклик гетеропереходів суттєво змінюється, що є характерним як для ізотипних, так і анізотипних гетероструктур. Таке явище пояснюється взаємодією кисню з мікростаятними бар'єрами у плівках сульфиду свинцю, при якій утворення оксидної плівки $PbO \cdot PbSO_4$ спричиняє виникнення потенціального рельєфу, який, в свою чергу, зумовлює зменшення величини фотовідклик на декілька порядків.

У п'ятому розділі обговорено результати комплексних експериментальних досліджень гетероструктур $n\text{-PbS}-n\text{-ZnSe}$, $p\text{-PbS}-n\text{-ZnSe}$, $n\text{-PbS}-p\text{-ZnTe}$, $p\text{-PbS}-p\text{-AgI-xCdхTe}$, представлено їх зонні діаграми з урахуванням поверхневих електронних станів на певні поділу.

Встановлено, що ВАХ (прямі вітки) всіх досліджуваних гетероструктур описується виразом вигляду $I = I_s \exp(eU_a/nkT)$, де I_s - струм насичення, n -фактор неідеальності прямої вітки ВАХ. Його величина знаходиться в межах 2 - 4 одиниць і практично не залежить від температури. Прямі вітки набуває лінійного вигляду у координатах $\ln I - T$ при $U_a = \text{const}$, $\ln I \sim U_a$ при $T = \text{const}$. Виявлені залежності характерні для тунельно-рекомбінаційного механізму Райбена-Фойхта і генераційно-рекомбінаційного механізму Реджера.

Для визначення механізмів струмопроходження було проведено теоретичний розрахунок прямих віток ВАХ усіх гетеропереходів на основі вищевказаних моделей. Порівняння теоретичних і експериментальних прямих віток ВАХ дозволило встановити, що струм крізь гетеропереходи $PbS\text{-}ZnSe$, $PbS\text{-}ZnTe$ зумовлений тунельно-рекомбінаційним процесом. Цей струм виникає наступним чином. Поверхневий рівень завжди обмінюється електронами з контактними напівпровідниками внаслідок переходів рівень-зона, рівень-напівпровідник 1 (або 2) і зворотніх переходів. При відсутності прикладеного до гетероструктури зміщення кожен з переходів є збалансованим, оскільки в силу принципу детальної рівноваги протилежні переходи рівні один одному. Коли до гетероструктури прикладається напруга, цей баланс порушується, і через рівні протікає струм.

ВАХ вказаних гетеропереходів описується виразом

$$J = 0.25 e V_{th} N P_n \exp[-(\Delta E_c + E_{SS})/2 kT] \exp(eU_a/nkT), \quad (1)$$

де U_{th} і N - відповідно теплова швидкість і концентрація носіїв заряду у широкзонній підкладці, P_n - коефіцієнт тунельної прозорості бар'єру, ΔE_c - розрив зон провідності у гетеропереході, E_{SS} - енергія електронних поверхневих станів, локалізованих в області просторового заряду, U_a - прикладене знічення.

У гетероструктурах р-PbS-р-Hg_{1-x}Cd_xTe (x=0.2, 0.4) механізм струмопроходження є генераційно-рекомбінаційним. Їх ВАХ описуються наступним чином:

$$J = J_s \left[\frac{kT}{e(U_a - U_a)} \exp\left(\frac{eU_a + E_{SS}}{n_1 kT}\right) + \left(\frac{kT}{eU_a - E_{SS}}\right)^{1/2} \exp\left(\frac{eU_a}{n_2 kT}\right) \right] \quad (2)$$

Обернені вітки ВАХ всіх досліджуваних гетероструктур підпорядковуються степеневому закону $I \sim U_a^m$, де $m=2-4$, що пояснюється тунелюванням носіїв заряду з вузькозонного матеріалу у широкзонний.

Для гетеропереходів на основі сульфїду свинцю і селенїду і телуриду цинку обернені ВАХ мають вид

$$J = J_s P_n U_a (k_1 + k_2 - eU_a)^2, \quad (3)$$

де k_1, k_2 - рівні Фермі у контактних матеріалах. Обернені ВАХ гетероструктур р-PbS-р-Hg_{1-x}Cd_xTe (x=0.2, 0.4) описуються виразом

$$J = J_s \exp(eU_a/mkT)^m. \quad (4)$$

Для побудови зонних енергетичних діаграм досліджуваних гетероструктур використовувалась теорія Харрісона-Френслі-Кремера, згідно якої основні зонні параметри ΔE_c (розрив валентних зон), ΔE_c (розрив зон провідності), ΔE_i (положення власних рівнів Фермі

у контактних напівпровідниках пов'язані між собою наступними співвідношеннями:

$$\Delta E_V = \epsilon_p^{B_1} - \epsilon_p^{B_2} + \sum_{i=1}^2 (-1)^i \left[\left(\frac{1}{4} (\epsilon_p^{A_i} - \epsilon_s^{B_i})^2 + \left(\frac{4.24 \pi^2}{a_i^2} \right)^{1/2} - \frac{1}{2} (\epsilon_p^{A_i} - \epsilon_p^{B_i}) \right) \right] \pm \frac{1}{8 \epsilon_0 a_i} [e^*(A) +$$

$$+ e^*(B) - e^*(C) - e^*(D)] \pm \epsilon_{SS} \pm \frac{kT}{e} \ln (v_{th} (\tau/\sigma))^{1/2} \sigma \frac{\Delta a}{a^3},$$

$$\Delta E_C = \Delta E_g - \Delta E_V; \quad (8)$$

$$\Delta E_g = E_{g1} - E_{g2}; \quad (7)$$

$$\Delta E_i = \Delta E_C + \frac{1}{2} \Delta E_g + \frac{1}{2} \frac{kT}{e} \ln (N_{c1} N_{v2} / N_{v1} N_{c2}), \quad (8)$$

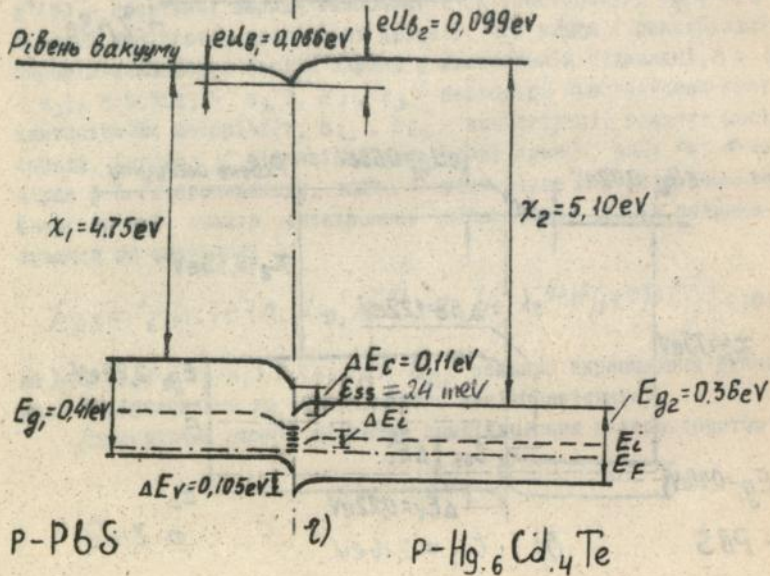
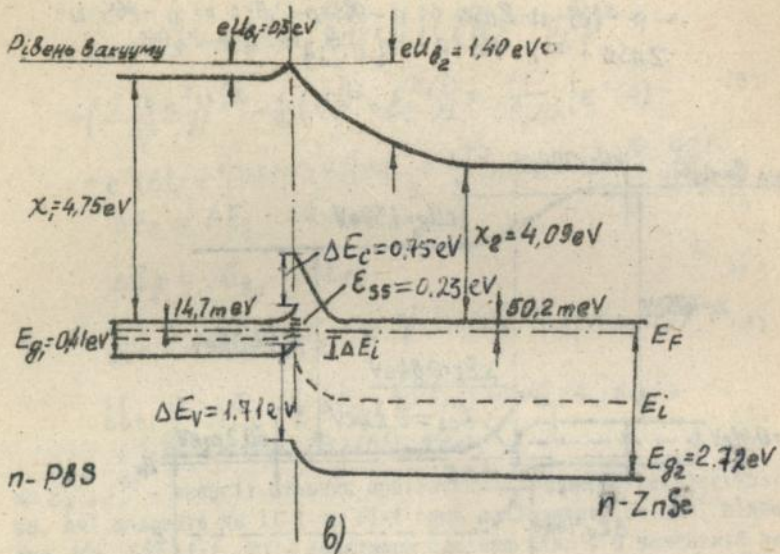
$$U_{bi} = -\Delta E_C - \frac{1}{2} \Delta E_g + \frac{kT}{e} \ln (N_1 N_2 / n_i n_{i2}) + \frac{1}{2} \frac{kT}{e} \ln (N_{c2} N_{v1} / N_{v2} N_{c1}), \quad (9)$$

де $\epsilon_p^{A_i}, \epsilon_p^{B_i}$ - енергії атомних орбіталей компонентів гетероструктури, які належать до II-ї та VI-ї груп періодичної системи, відповідно, N_{v_i}, N_{c_i} ($i=1, 2$) - ефективна густина станів у валентній зоні I зони провідності контактних матеріалів, $e^*(A), e^*(B), e^*(C), e^*(D)$ - ефективні заряди компонентів гетероструктур, v_{th}, D, τ, σ - теплова швидкість, коефіцієнт дифузії, час життя і рекомбінаційний період захоплення носіїв заряду у широкозонній підкладці, $\Delta a = |a_1 - a_2|$, $a = 0.5(a_1 + a_2)$, a_1, a_2 - параметри кристалічних ґраток контактних матеріалів, n_{i1}, n_{i2} - концентрації власних носіїв заряду, індекс "1" відповідає сульфідові свинцю, знак "+" відповідає р-п-гетеропереходу, знак "-" відповідає н-р-гетеропереходу. Енергетичний спектр електронних поверхневих станів розраховувався за формулою:

$$\epsilon_{SS} = \frac{kT}{e} \ln [e^4 (n_{i1} L_{D1} \lambda_1^{-1/2} + n_{i2} L_{D2} \lambda_2^{-1/2})^2 / (kT)^2 C_{SS}^2], \quad (10)$$

де λ_i ($i=1, 2$) = $(p/n_i) = (n_i/n)$, L_{D1} - довжина екранування Дебая (індекс 1 відноситься до вузькозонного напівпровідника).

Енергетичні зони діаграми досліджуваних гетероструктур на-



ведено на рис.1.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

1. Методом низькотемпературної молекулярно-променевої епітаксії ($T=540\text{ K}$, $P=10^{-9}\text{ Тор}$) сформовано різкі анізотипні та ізотипні гетероструктури $n\text{-PbS-n-ZnSe}$, $p\text{-PbS-n-ZnSe}$, $n\text{-PbS-p-ZnTe}$, $p\text{-PbS-p-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x=0.2, 0.4$) з числом дефектів у контактній області $N_{ss} \sim 10^{11} - 10^{13}\text{ см}^{-2}$, зумовлених 3-5% розбіжністю параметрів кристалічних ґраток контактуючих матеріалів.

2. При прямому зміщенні в області температур 77-293 K у гетероструктурах на основі плівок сульфїду свинцю і кристалів селенїду і телуриду цинку струмопроходження характеризується тунельно-рекомбінаційним механізмом з участю поверхневих електронних станів, локалізованих в області об'ємного заряду.

3. У структурах сульфїд свинцю - телурид кадмїв-ртутї при зміщенні у з'ятому напрямі спостерїгавться генераційно-рекомбінаційні процеси. В оберненозміщених гетеропереходах всіх типів "м'який" пробїй, що спостерїгається, зумовлений тунельними переходами.

4. На гетеропереходах на основі сульфїду свинцю і селенїду цинку виявлено електро- і фотолумїнесценції. Інжекційна електролюмїнесценція при азотних температурах спостерїгалася у спектральній області 0.43-0.79 мкм, що зумовлено рекомбінаційними процесами у матеріалі підкладки. Спектри фотолумїнесценції є аналогічними, їх обробка за методом Алєнцева-Фока дозволила виявити бїльш вузькі смуги при $\lambda_1=0.52\text{ мкм}$, $\lambda_2=0.56\text{ мкм}$, $\lambda_3=0.64\text{ мкм}$, які пов'язані з наявністю неконтрольованих домішок у матеріалі підкладки.

5. Досліджувані гетероструктури в області низьких температур володіють фоточутливістю в спектральному діапазоні 2 - 5 мкм, що пов'язано з фотоелектричними процесами в епітакціальних шарах сульфїду свинцю. Виявлено вплив процесів природнього старіння на величину фотоерс і область спектральної чутливості досліджуваних структур.

6. Комплексне дослідження електрофізичних властивостей гетероструктур, що випалилися, дозволило запропонувати їх зонні енер-

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

гетичні діаграми і дати інтерпретація виявлених особливостей.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ВИКЛАДЕНО У РОБОТАХ

1. Андрухив М.Г., Бочкарева Л.В., Хляп Г.М., Шкумбатов П.С. Некоторые свойства гетеропереходов ZnSe-PbS // Неорган. матер. - 1992. - Т.28, №1. - С.170-171.
2. Андрухив М.Г., Григорович Г.М., Бочкарева Л.В., Хляп Г.М., Шкумбатов П.С. Гетеропереходы ZnTe-PbS // Физ. и техн. полупровод. - 1992. - Т.26, вып.4. - С. 761-763.
3. Хляп Г.М., Андрухив М.Г., Бочкарьова Л.В., Шкумбатов П.С. Електрофізичні властивості гетероструктури ZnTe-PbS // Укр. фіз. ж. - 1992. - Т.37, №7. - С. 1050-1052.
4. Хляп Г.М., Андрухив М.Г., Бочкарева Л.В., Вирт И.С., Шкумбатов П.С. Физические свойства гетероструктуры PbS-Hg_{0.6}Cd_{0.4}Te // Неорган. матер. - 1993. - Т.29, №5 - С. 721-722.
5. Khlyar G.M., Andrukhiv M.G., Bockariyova L.V., Shkumbatiuk P.S. Heterostructure Hg_{0.6}Cd_{0.4}Te-PbS // J. Appl. Phys. - 1993. - Vol.74, №8. - P. 5238-5289.
6. Хляп Г.М., Андрухив М.Г., Блашків В.С., Бочкарева Л.В., Німецький В.П. Фотоелектрические и излучательные свойства гетероструктур на основе сульфида свинца и соединений А2В6 // Неорган. матер. - 1994. - Т.30, №5. - С. 616-618.
7. Хляп Г.М., Бочкарева Л.В., Шкумбатов П.С. Процессы старения гетероструктур на основе сульфида свинца и соединений А2В6 // Неорган. матер. - 1994. - Т.30, №5. - С. 704-705.

Khlyar G.M. The investigation of electrophysical, luminescent and photoelectrical properties of heterostructures based on lead sulphide and A₂B₆ materials.

Thesis for a Candidate of Physics and Mathematics in 01.04.10 - Semiconductor and Insulator Physics, Drogobych Pedagogical Institute, Drogobych, 1995. The dissertation submitted 13 research works which contain the results of: a) the investigation of electrophysical characteristics of heterostructures based on

ZnSe, ZnTe, Hg_{1-x}Cd_xTe ($x=0.2;0.4$); b) the investigation of luminescent and photoelectrical properties of these heterostructures; c) the I-V-characteristics calculation, theoretical and experimental determination of current mechanisms; d) the calculation of band energy diagrams of these heterostructures with surface electron states account.

Хляп Г.М. Исследование электрофизических, излучательных и фотоэлектрических свойств гетеропереходов на основе сульфида свинца и соединений А²В⁶.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников и диэлектриков.

Защищается 13 научных работ, которые содержат результаты: а) исследований электрофизических характеристик гетероструктур на основе пленок сульфида свинца и соединений А²В⁶ (ZnSe, ZnTe, Hg_{1-x}Cd_xTe ($x=0.2;0.4$); б) исследований излучательных и фотоэлектрических свойств указанных гетероструктур; в) теоретический расчет вольтамперных характеристик, теоретическое и экспериментальное исследование механизмов токопрохождения; г) расчет и построение энергетических зонных диаграмм указанных гетероструктур с учетом влияния поверхностных электронных состояний на границе раздела.

Ключові слова: гетероперехід, механізми струмопроходження, поверхневі електронні стани, зонна діаграма, сульфід свинцю.

Хляп

Підписано до друку 11.09.95
Формат 60 x 84/16
Папір друкарський
Друк офсетний. Ум. друк. арк. 1,1
Обл.- вид. арк. 1,1. Тираж 100 прим.
Зам. 029

Друкарня видавництва "Рута" Чернівецького держуніверситету
274012, Чернівці, вул. Коцюбинського, 2.

443571

AB 33.083