

Чернівецький державний університет  
імені Юрія Федьковича

*На правах рукопису*

Добровольська Анна Михайлівна

**ОПТИМІЗАЦІЯ СТРУКТУРНИХ І ФІЗИЧНИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ЕПТАКСІЙНИХ ШАРІВ НА  
ОСНОВІ СПЛУК  $A^{IV}B^{VI}$  ДЛЯ  
ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ  
ІНФРАЧЕРВОНОЇ ОБЛАСТІ СПЕКТРУ**

01.04.07 — фізика твердого тіла

**А в т о р е ф е р а т**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Чернівці — 1996



Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі фізики твердого тіла  
Прикарпатського університету  
імені Василя Стефаника.

Науковий керівник: доктор хімічних наук,  
професор Фреїк Д.М..

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,  
професор Буджак Я.С.;  
доктор фізико-математичних наук,  
професор Фодчук І.М..

Провідна організація: Львівський державний університет  
імені І.Я. Франка.

Захист відбудеться « 20 » вересня 1996 р. о 15 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 07.01.06 Чернівецького державного університету імені Юрія Федьковича (274012 м. Чернівці, вул.Коцюбинського, б.2).

Зі змістом дисертації можна ознайомитись в науковій бібліотеці Чернівецького державного університету (274012 м. Чернівці, вул. Л.Українки, б.23).

Автореферат розіслано « 20 » серпня 1996 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

М.В. Курганецький

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ.

**Актуальність теми.** Напівпровідники групи  $A^{IV}B^{VI}$  мають ряд унікальних властивостей, що дозволяє застосовувати їх для виготовлення як фотоприймачів ІЧ-випромінювання, так і лазерів спектрального діапазону 3-50 мкм. Успіхи мікромініатюризації фотонної апаратури тісно пов'язані з використанням керованого епітаксійного вирощування тонких шарів. Не дивлячись на багаточисельні дослідження процесів кристалізації сполук  $A^{IV}B^{VI}$ , багато закономірностей їх росту та формування не одержали достатнього пояснення. Залишається до кінця не з'ясованим вплив технологічних факторів під час вирощування епітаксійних шарів  $A^{IV}B^{VI}$  з парової фази в методі гарячої стінки на структурні характеристики, а також електрофізичні та фотоелектричні параметри цих матеріалів. Потреба в таких даних пояснюється тим, що для цілеспрямованої розробки ефективних оптикоелектронних елементів в першу чергу необхідно забезпечити одержання тонкошарового матеріалу високої структурної досконалості з оптимальними електрофізичними параметрами, які зберігаються під час впливу зовнішніх факторів.

Крім того, не було проведено оптимізації технології вирощування з парової фази методом гарячої стінки тонких шарів халькогенідів свинцю і олова та їх твердих розчинів з метою доведення параметрів і характеристик фоторезисторів і фотодіодів, виготовлених на основі згаданих матеріалів, до значень, які близькі до теоретично розрахованих.

Не зважаючи на значну кількість літератури з теоретичного та експериментального дослідження дефектної підсистеми халькогенідів свинцю і олова, процеси генерації та кінетики радіаційних дефектів під час опромінення і відпалу кристалічних структур не одержали відповідного розвитку. Крім того, раніше не проводили дослідження протонного та  $\alpha$ -опромінення на структурні та електрофізичні параметри епітаксійних шарів та твердих розчинів групи  $A^{IV}B^{VI}$  з метою модифікації останніх для виготовлення на їх основі фотоприймальних приладів чи лазерів в ІЧ-діапазоні оптичного спектру.

Вище викладене свідчить про актуальність вибраної теми з точки зору розробки науково обґрунтованих методик одержання епітаксійних шарів групи  $A^{IV}B^{VI}$  та їх твердих розчинів з високими структурними характеристиками, оптимальними електрофізичними параметрами для виготовлення на їх основі ІЧ-фоторезисторів і фотодіодів з відтворюваними фотоелектричними параметрами і характеристиками, які близькі до розрахованих.

ІНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

**Мета роботи.** З допомогою методу математичного планування багатофакторних експериментів оптимізувати технологічні умови вирощування з парової фази методом гарячої стінки епітаксійних шарів групи  $A^{IV}B^{VI}$  та їх твердих розчинів з метою одержання матеріалу з високими структурними і електрофізичними характеристиками і параметрами, які є оптимальними для досягнення фотоелектричних параметрів і характеристик фотодіодів і фоторезисторів ІЧ-діапазону оптичного спектру, виготовлених на їх основі, значень, що якомога ближчі до теоретично досяжних. Модифікувати епітаксійні шари групи  $A^{IV}B^{VI}$  з допомогою радіаційної та термічної обробки для виготовлення на їх основі ФП ІЧ-випромінювання оптичного спектру.

**Завдання, які вирішувались** згідно з поставленою метою:

1. Дослідити закономірність зміни субструктурних параметрів епітаксійних шарів халькогенідів свинцю і олова та твердих розчинів на їх основі від технологічних факторів вирощування цих матеріалів з парової фази методом гарячої стінки.

2. З допомогою методу математичного планування багатофакторних експериментів оптимізувати технологічні умови вирощування з парової фази в методі гарячої стінки тонкошарового матеріалу на основі сполук  $A^{IV}B^{VI}$  для одержання зразків з наперед заданими електрофізичними параметрами.

3. Одержати структури для виготовлення ФП ІЧ-діапазону оптичного спектру з фотоелектричними параметрами і характеристиками, якомога більш близькими до теоретично можливих. Для цього з допомогою методу математичного планування і оптимізації багатофакторних експериментів дослідити закономірність зміни параметрів фоторезисторів і фотодіодів, виготовлених на основі тонких шарів  $PbTe$  і  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  ( $0.164 \leq x \leq 0.206$ ), в залежності від технологічних факторів вирощування даних матеріалів з парової фази методом гарячої стінки.

4. Провести радіаційну і термічну обробку епітаксійних шарів групи  $A^{IV}B^{VI}$  з метою використання їх для виготовлення ФП ІЧ-випромінювання оптичного спектру.

5. Розробити пакет програм, з допомогою яких провести розрахунок параметрів фоторезисторів і фотодіодів на основі  $PbTe$  і  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  ( $0.164 \leq x \leq 0.206$ ) в залежності від технологічних факторів вирощування даних матеріалів з парової фази методом гарячої стінки і порівняти їх з результатами експериментальних досліджень.

6. Враховуючи основні фізичні, фізико-хімічні властивості монокристалів і епітаксійних шарів групи  $A^{IV}B^{VI}$  та їх твердих розчинів, оцінити параметри

і характеристики фотоприймачів ІЧ-випромінювання, які можна досягнути, використовуючи вказані матеріали для їх виготовлення, та вимоги до них.

**Достовірність одержаних результатів** і зроблених на їх основі висновків забезпечувалась комплексним характером досліджень з використанням добре апробованих сучасних методик, машинною обробкою експериментальних даних, доброю відтворюваністю результатів та їх широким обговоренням.

### **Наукова новизна роботи.**

1. Встановлено, що для епітаксійних шарів групи  $A^{IV}B^{VI}$  і твердих розчинів на їх основі, вирощених з парової фази методом гарячої стінки, головними технологічними факторами, які впливають на їх структурну досконалість, є температура підкладок  $T_n$  і хімічний склад наважок  $x$ .

2. Одержані, з використанням методу математичного планування і оптимізації багатофакторних експериментів, поліноміальні рівняння другого порядку, які описують залежність електрофізичних параметрів епітаксійних шарів групи  $A^{IV}B^{VI}$  та їх твердих розчинів від технологічних факторів вирощування даних матеріалів з парової фази методом гарячої стінки, що визначають умови одержання тонкошарового матеріалу з наперед заданими властивостями.

3. Вперше з використанням методу математичного планування та оптимізації багатофакторних експериментів одержані поліноміальні залежності параметрів фоторезисторів і фотодіодів від технологічних факторів вирощування з парової фази методом гарячої стінки епітаксійних шарів халькогенідів свинцю і твердого розчину системи  $PbTe-SnTe$ , на основі яких виготовлені вказані фотоприймачі.

4. З допомогою одержаних поліноміальних рівнянь другого порядку досліджено вплив технологічних факторів вирощування з парової фази в методі гарячої стінки епітаксійних шарів  $PbTe$  і  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  ( $0.164 \leq x \leq 0.206$ ) на фотоелектричні параметри фоторезисторів і фотодіодів, виготовлених на основі даних матеріалів, а також знайдені оптимальні значення технологічних факторів вирощування, при яких можна одержувати такі матеріали, що параметри фотоприймачів набувають екстремальних значень.

5. Вперше, з допомогою розробленого програмного забезпечення, проведено розрахунок параметрів фотоприймачів, виготовлених на основі тонких шарів групи  $A^{IV}B^{VI}$  і їх твердих розчинів, що залежать від технологічних факторів вирощування даних матеріалів з парової фази методом гарячої стінки, та їх порівняння з результатами експериментальних вимірювань.

6. Модифікацію епітаксійних шарів PbTe і  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  для виготовлення фотоприймачів ІЧ-випромінювання оптичного спектру здійснено з допомогою радіаційної і термічної обробки.

### Практична цінність роботи полягає в наступному:

1. Показано, як з допомогою методу математичного планування багатофакторних експериментів можна знайти оптимальні значення технологічних факторів, що необхідні для вирощування епітаксійних шарів напівпровідників групи  $A^{IV}B^{VI}$  та їх твердих розчинів з парової фази методом гарячої стінки n- і р-типу з заданими фізичними параметрами. Це підтверджено на прикладі відтворюваного вирощування епітаксійних шарів  $PbTe/(111)BaF_2$ , коли при розрахованих оптимальних значеннях технологічних факторів ( $T_n=549$  К,  $T_s=818$  К,  $T_c=908$  К), одержаний матеріал з високими структурними і електрофізичними параметрами (розмір блоків мозаїки  $b \approx 10^4$  мкм, мозаїчність  $\alpha = (0.9 \dots 1.5)$  густина дислокацій  $\rho \leq 10^5$  см<sup>-2</sup>, концентрація носіїв заряду  $n \leq 10^{17}$  см<sup>-3</sup>, їх рухливість  $\mu \leq 4 \cdot 10^4$  см<sup>2</sup>·В<sup>-1</sup>·с<sup>-1</sup> при 77 К), що робить придатним їх застосування для виготовлення лінійчастих та матричних ІЧ-фотоприймачів. Ця ж методика дозволила одержати оптимізовані за параметрами тонкі шари  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  складу  $0.164 \leq x \leq 0.206$  для виготовлення ІЧ-приймачів оптичного діапазону спектру.

2. Розроблено програмне забезпечення машинного обрахунку параметрів фоторезисторів і фотодіодів, виготовлених на основі епітаксійних шарів PbTe і  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  з врахуванням їх зонного спектру та фізичних параметрів, в залежності від технологічних факторів вирощування вказаних матеріалів з парової фази методом гарячої стінки, що дало можливість використати одержані результати розрахунку для пояснення результатів експериментальних вимірювань.

3. Проведені дослідження мали б стимулювати постановку нових експериментів з метою вдосконалення технології вирощування епітаксійних шарів групи  $A^{IV}B^{VI}$  і їх твердих розчинів з парової фази методом гарячої стінки, а також модифікації одержаних зразків з допомогою радіаційної та термічної обробки для створення на їх основі приймачів випромінювання в ІЧ-діапазоні оптичного спектру з якомога вищими фотоелектричними параметрами.

### До захисту вноситься:

1. Комплексне визначення з допомогою теорії математичного планування багатофакторних експериментів оптимальних умов вирощування з парової фази методом гарячої стінки епітаксійних шарів  $PbTe/(111)BaF_2$  та

$Pb_{1-x}Sn_xTe/(111)BaF_2$  з заданими електрофізичними параметрами та їх граничні значення, яких можна досягнути застосовуючи вказаний метод.

2. Модель власних точкових атомних дефектів, яка пояснює в межах теорії квазіхімічних реакцій експериментальні залежності електричних параметрів тонких шарів телуриду свинцю від технологічних умов їх одержання з парової фази методом гарячої стінки.

3. Рівняння регресії, які визначають залежність основних параметрів фоторезисторів і фотодіодів від технологічних факторів вирощування з парової фази методом гарячої стінки епітаксійних шарів  $PbTe/(111)BaF_2$  і  $Pb_{1-x}Sn_xTe/(111)BaF_2$ , на основі яких виготовлялись фотоприймачі, та від їх фізичних і фізико-хімічних властивостей.

4. Суть процесів генерації та анігіляції власних точкових дефектів в нелегованих епітаксійних шарах  $PbTe$  і  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  під час їх опромінення потоком протонів і  $\alpha$ -частинок та відпаду.

### **Публікації та особистий внесок дисертанта.**

За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 18 наукових робіт, перелік основних з яких наведений в кінці автореферату.

### **Дисертантом виконано:**

1. Методом математичного планування багатофакторних експериментів з використанням особисто розробленого програмного забезпечення для ЕОМ оптимізовано умови вирощування епітаксійних шарів групи  $A^{IV}B^{VI}$  та їх твердих розчинів з парової фази методом гарячої стінки для одержання матеріалу з наперед заданими електрофізичними властивостями та виготовлення приймачів ІЧ-випромінювання оптичного діапазону спектру з потрібними фотоелектричними параметрами.

2. Досліджений вплив зміни технологічних факторів вирощування з парової фази методом гарячої стінки епітаксійних шарів  $PbTe$  і  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  ( $0.164 \leq x \leq 0.206$ ) на їх електрофізичні параметри, а також фотоелектричні параметри фотодіодів і фоторезисторів, виготовлених на основі вказаних матеріалів.

3. Розроблений пакет програм, згідно з яким обраховані параметри фоторезисторів і фотодіодів на основі  $PbTe$  і  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  в залежності від технологічних факторів вирощування вказаних матеріалів з парової фази методом гарячої стінки.

**Апробація роботи.** Основні результати дисертаційної роботи

доповідались і обговорювались на таких конференціях і нарадах:

1. XXI Всесоюзній нараді з фізики взаємодії заряджених частинок. Москва. 1991 р.
2. XXII Всесоюзній нараді з фізики взаємодії заряджених частинок. Москва. 1992 р.
3. X науковій конференції "Планування і автоматизація експерименту в наукових дослідженнях". Москва. 1992р.
4. V Українській конференції "Фізика і технологія тонких плівок складних напівпровідників". Ужгород. 1992 р.
5. I Українській конференції "Структура і фізичні властивості неупорядкованих систем". Львів. 1993 р.
6. IV Міжнародній конференції з фізики і технології тонких плівок. Івано-Франківськ. 1993 р.
7. V Міжнародній конференції з фізики і технології тонких плівок. Івано-Франківськ. 1995 р.
8. Міжнародній конференції "Техника и физика электронных систем". Суми. 1995 р.

**Структура та об'єм дисертації.** Дисертація складається з вступу, п'яти глав, висновків, додатку і списку цитованої літератури. Робота викладена на 300 сторінках, включає 85 малюнків, 63 таблиці і список літератури, що містить 179 джерел.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ.

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовані мета та завдання дисертаційної роботи, висвітлено її наукове і практичне значення, викладено основні положення, що виносяться до захисту, дано анотацію основних результатів.

**Перший розділ.** В ньому зроблений огляд робіт, присвячених вивченню особливостей р-Т-х діаграм рівноваги систем Sn-Te, Pb-Te, а також квазібінарної системи SnTe-PbTe. Розглянуто фізико-хімічні, термодинамічні, електричні властивості телуридів олова та свинцю і твердого розчину телурид олова — телурид свинцю. Узагальнені технології вирощування епітаксійних шарів цих матеріалів та їх властивості.

Розглянуто стан і перспективи удосконалення приймачів ГЧ-випромінювання оптичного діапазону спектру, звернуто увагу на зв'язок параметрів фотоприладу з параметрами напівпровідникового матеріалу, на основі якого

він виготовлений, і з теоретичними обмеженнями, які накладаються. Особлива увага приділена потенційним можливостям матеріалів на основі монокристалів PbTe і  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  для створення фотоприймачів та порівнянню фотогальванічного ефекту і явища фотопровідності в них. Основи теорії фотодіодів і фоторезисторів викладені в єдиній формі, яка зручна для порівняння обох ефектів в кристалах PbTe і  $Pb_{1-x}Sn_xTe$ . Зроблено деякі висновки про стан і перспективи розвитку фотодіодів і фоторезисторів на основі даних матеріалів.

Особлива увага приділена аналізу досягнень у галузі створення фотоприймачів на основі кристалів і тонких шарів групи  $A^{IV}B^{VI}$  для ІЧ-області оптичного спектру.

**Другий розділ.** В ньому описано особливості технології вирощування тонких шарів з парової фази методом гарячої стінки. Досліджено вплив технологічних факторів — температури випаровування  $T_v$ , температури стінок камери  $T_c$ , температури осадження (підкладок)  $T_n$  та парціального тиску парів халькогену  $P_{Te_2}$  на структурну досконалість та електрофізичні властивості тонких шарів монотелуридів олова та свинцю. Вивчено фазовий склад, кристалічну структуру та електричні властивості епітаксійних шарів твердого розчину телурид олова — телурид свинцю. На основі кристалохімії та термодинаміки описано механізм процесу вирощування тонких шарів групи  $A^{IV}B^{VI}$  з парової фази методом гарячої стінки.

Встановлено, що параметри реальної структури епітаксійних шарів SnTe і PbTe визначаються температурами осадження ( $T_n$ ) та випаровування ( $T_v$ ), а також родом підкладок. Виявлено, що епітаксійним шарам SnTe при всіх температурних режимах осадження, які застосовувались, характерна діркова провідність, а при температурах осадження  $T_n = 423$  К вони мали мінімальне значення концентрації дірок. Підвищення температури підкладок ( $T_n > 423$  К) шарів SnTe приводить до зростання концентрації дірок і зменшення їх холлівської рухливості, що пояснюється участю в явищах переносу носіїв заряду з різною ефективною масою: при низьких концентраціях носіїв кінетичні явища визначаються в основному легкими дірками, а при високих — переважають важкі дірки.

Також встановлено, що тонкі шари PbTe, вирощені на різних підкладках, внаслідок малого значення коефіцієнта конденсації молекулярного телуру характеризуються електронною провідністю, а зменшення концентрації електронів в них зі зниженням  $T_n$  в інтервалі 373...623 К пов'язане зі значним зменшенням коефіцієнта конденсації свинцю.

З'ясовано, що характерне для епітаксійних шарів PbTe на  $BaF_2$  початкове зростання рухливості електронів з підвищенням температури підкладок

( $T_n = 423 \dots 623$  К) обумовлене одночасним впливом двох факторів: зменшенням концентрації носіїв заряду, пов'язаних зі структурними дефектами, і підвищенням структурної досконалості тонких шарів. Встановлено, що в інтервалі температур підкладок  $T_n = 523-573$  К для  $PbTe/(111)BaF_2$  мають місце високі значення електричних параметрів цих шарів (концентрація носіїв заряду  $n \approx 10^{17}$  см<sup>-3</sup>, їх рухливість  $\mu = 3.4 \cdot 10^4$  см<sup>2</sup>·В<sup>-1</sup>·с<sup>-1</sup> при 77 К), які порівняні з такими для монокристалів, а самі шари являють собою мозаїчні кристали з величиною монокристалічних фрагментів (0.5-1.0) см та малокутовими межами (0.9 – 1.5)°.

Виявлено, що тонким шарам  $PbTe$  на підкладках з поліамідної стрічки ПМ-1, в порівнянні з тими, що осаджують на  $BaF_2$ , характерна набагато менша за значеннями (більше ніж на порядок величини) рухливість носіїв заряду, що, як і велике значення термо-е.р.с. цих шарів, пов'язана з їх сильно розвинутою міжзеренною структурою.

Досліджено, що для епітаксійних шарів системи  $SnTe-PbTe$ , вирощених на (111)  $BaF_2$  при оптимальних фіксованих  $T_n$  і  $T_c$  ( $T_n = 823$  К,  $T_c = 853$  К), початкове підвищення температури підкладок в інтервалі 423-623 К приводить до зменшення їх мозаїчності, зниженню рівня неоднорідної мікродеформації і зростанню областей когерентного розсіювання. Наступне підвищення  $T_n$  ( $T_n = 523-573$  К) обумовлює різке погіршення структурної досконалості матеріалу — розміри ОКР і блоків мозаїки зменшуються.

Виявлено, що найбільшу структурну досконалисть, в порівнянні з  $PbTe$ , мають шари  $SnTe$ , що пов'язано з добрим співпаданням коефіцієнтів термічного розширення матеріалів підкладки  $BaF_2$  і тонкого шару та мінімальною величиною кристалографічної невідповідності.

Встановлено, що при  $T_n = 423-583$  К епітаксійні шари твердого розчину  $Sn_{1-x}Pb_xTe$  складу  $0.95 \leq x \leq 1.00$  мають електронний тип провідності, а при  $T_n = 423-623$  К шари складу  $0.00 \leq x \leq 0.85$  характеризуються дірковою провідністю. З'ясовано, що початкове підвищення температури підкладок у визначеному інтервалі приводить до зменшення концентрації дірок і зростання їх холлівської рухливості. При більш високих  $T_n$  ( $T_n > 583$  К) структурна досконалисть даних епітаксійних шарів погіршується: утворюється сильно розвинута зерниста структура, яка є наслідком протікання поряд з конденсацією пари і процесів реєвипаровування, що обумовлює характерний спад значень рухливості.

Для пояснення залежностей концентрації носіїв заряду від технологічних параметрів під час епітаксії тонких шарів халькогенідів свинцю запропонована модель іонізованих дефектів у підґратці металу:  $V_{Pb}^{2-} - V_1^{+}$ .

На основі кристалохімічних рівнянь і відомих констант рівноваги

квазіхімічних реакцій одержано аналітичні вирази для залежності концентрації вільних носіїв заряду від температури підкладки, температури випарника і від додаткового тиску парів халькогену при осадженні епітаксійних шарів PbTe з парової фази методом гарячої стінки.

Виконане співставлення розрахункових і експериментальних залежностей концентрації вільних носіїв заряду в тонких шарах PbTe від технологічних параметрів дало можливість встановити, що пояснення експериментальних даних в кристалохімічній моделі якісно є достатньо добрим. Проте, завдяки тому, що константи квазіхімічних реакцій розраховані для монокристалів, і їх значення, які одержані різними авторами, значно відрізняються між собою, має місце неспівпадання у чисельних величинах концентрації електронів.

**У третьому розділі** представлені елементи теорії математичного планування та оптимізації багатофакторних експериментів. Показано, що досліджувані параметри процесу (явища) можна подати у вигляді поліноміальної матриці з незалежних факторів. Внесок кожного з них визначається величиною коефіцієнтів регресії. Останні знаходять з системи нормальних рівнянь, які одержують з використанням експериментальних результатів. Наведені матриці планування першого та другого порядку для трьох факторів в зв'язку з проведенням в наших дослідженнях трьохфакторних експериментів.

Показано, що метод математичного планування багатофакторних експериментів можна ефективно використовувати в технології вирощування тонких шарів з парової фази методом гарячої стінки. В якості параметрів оптимізації були вибрані електрофізичні параметри епітаксійних шарів групи  $A^{IV}B^{VI}$  ( $n$  — концентрація носіїв заряду,  $\mu$  — їх рухливість,  $\alpha$  — коефіцієнт термо-е.р.с.,  $\sigma$  — питома електропровідність,  $\alpha^2\sigma$  — термоефективність, а також величина

$$Z = \frac{\mu}{\mu_{\max}} + \left( \frac{n}{n_{\min}} \right)^{-1} + \frac{\alpha^2\sigma}{(\alpha^2\sigma)_{\max}}.$$

При дослідженні тонких шарів монохалькогенідів свинцю змінними факторами були температури підкладок  $T_p$ , випаровування  $T_v$  і стінок камери  $T_c$ . Технологічними факторами під час вирощування епітаксійних шарів твердих розчинів на основі  $A^{IV}B^{VI}$  при оптимальних фіксованих значеннях температур випаровування  $T_v$  та стінок камери  $T_c$  були вибрані температура підкладок  $T_p$  та хімічний склад наважок  $x$ .

З використанням методу математичного планування багатофакторних експериментів для оптимізації способу вирощування епітаксійних шарів PbTe з парової фази на підкладках зі сколів (111)  $BaF_2$  та поліаміду ПМ-1 одержані рівняння регресії, що визначають залежність електрофізичних параметрів

вказаних матеріалів від технологічних факторів їх одержання у методі гарячої стінки.

Встановлено, що у випадку  $\text{PbTe}/(111)\text{BaF}_2$  для рухливості та концентрації носіїв заряду в рівняннях регресії суттєву роль відіграють члени другого порядку, причому для рухливості коефіцієнти  $b_{ij}$ , а для концентрації носіїв заряду коефіцієнти  $b_{ij}$  — всі одного знаку. Це обумовлює існування екстремальних значень даних параметрів всередині факторного простору. Для концентрації носіїв заряду значущим виявився тільки коефіцієнт  $b_{33}$ , що є причиною того, що поверхня відгуку  $n=f(T_n, T_p)$  при  $T_c=\text{const}$  — майже площина.

Визначено, що при всіх значеннях технологічних факторів епітаксійні шари телуриду свинцю мають електронний тип провідності. З'ясовано, що початкове підвищення  $T_n$  (473...623 К), як і  $T_p$  (758...878 К) та  $T_c$  (833...983 К) приводить до зменшення концентрації електронів, а при певних їх значеннях спостерігається зміна характеру залежності параметру оптимізації  $n$  від технологічних факторів. Така залежність між  $n$  та  $T_n$ ,  $T_p$  і  $T_c$  обумовлює існування розрахованого мінімального значення параметру ( $n=8.6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) всередині факторного простору ( $T_n=567 \text{ К}$ ,  $T_p=827 \text{ К}$ ,  $T_c=939 \text{ К}$ ).

З'ясовано, що на зміну параметрів  $n$  і  $\mu$  сильний відбиток накладає ефект міжфакторної взаємодії, хоча більш суттєву роль в зміні цих параметрів відіграють  $T_n$  і  $T_c$ .

Встановлено, що  $\sigma=f(T_n, T_p, T_c)$  та  $\alpha^2\sigma=f(T_n, T_p, T_c)$  повністю визначається характером залежностей  $n=f(T_n, T_p, T_c)$  і  $\mu=f(T_n, T_p, T_c)$  для  $\sigma$  та  $\alpha=f(T_n, T_p, T_c)$  і  $\sigma=f(T_n, T_p, T_c)$  для  $\alpha^2\sigma$  при відповідно фіксованих значеннях  $T_n$ ,  $T_p$  і  $T_c$ . Тому екстремальні значення цих параметрів знайдені на межі області планування.

Зроблено припущення, що параболічний характер залежності  $\mu=f(T_n, T_p, T_c)$  значно впливає на характер залежності параметру оптимізації  $Z=f(T_n, T_p, T_c)$ . Досліджено, що при оптимальних технологічних умовах ( $T_n=549 \text{ К}$ ,  $T_p=818 \text{ К}$ ,  $T_c=908 \text{ К}$  — центр факторного простору) параметр  $Z$  набуває екстремального значення, а епітаксійні шари  $\text{PbTe}$  (враховуючи концентраційну залежність рухливості носіїв заряду) характеризуються низькими (в даному дослідженні) концентраціями ( $n \leq 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) і відповідно високими значеннями рухливості ( $\mu \leq 4 \cdot 10^4 \text{ см}^2 \text{ V}^{-1} \text{ c}^{-1}$ ) носіїв заряду.

Встановлено, що для параметрів  $\mu$ ,  $\sigma$ ,  $\alpha$  і  $\alpha^2\sigma$  епітаксійних шарів  $\text{PbTe}$  на ПМ-1 характерне існування абсолютного максимуму всередині факторного простору, а абсолютного мінімуму концентрації електронів — на межі області планування.

Пошук оптимальних умов процесу вирощування епітаксійних шарів твер-

дих розчинів  $Pb_xSn_{1-x}Te$  ( $0.0 \leq x \leq 1.0$ ) на основі  $A^{IV}B^{VI}$  здійснювали методом Бокса-Уілсона для локального опису ділянки поверхні відгуку технологічних факторів ( $x, T_n$ ). Далі дослідження проводили в напрямку градієнту лінійного наближення, що привело в область екстремальних значень параметрів. Рівняння регресії для електрофізичних параметрів тонких шарів даних твердих розчинів у всій області зміни факторів являють собою поліноміальний вираз другого порядку, згідно з яким встановлено, що зміна складу  $x$  більш вагомо впливає на параметри оптимізації, ніж температура осадження  $T_n$  (коефіцієнти  $b_2$  за модулем у всіх моделях набагато перевищують значення коефіцієнтів  $b_1$ ). Також визначено, що для концентрації та рухливості носіїв заряду ефект взаємодії факторів відсутній ( $|b_{12}| \geq \Delta b_j$ ). Для складів  $0.95 \leq x \leq 1.00$  і  $0.00 \leq x \leq 0.85$  підвищення  $T_n$  приводить до зменшення концентрації електронів (і дірок відповідно) та збільшення їх рухливості. Виявлено, що спостерігається порівняно добре узгодження графічних зображень залежностей  $\mu, n = f(T_n, x)$ , які побудовані згідно з рівняннями регресії, одержаними з допомогою теорії математичного планування та на основі експериментальних даних.

З метою використання епітаксійних шарів  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  для виготовлення фотоприймачів, які працюють в діапазоні 8-14 мкм, і оптимізації їх параметрів методами математичного планування багатофакторних експериментів розраховано рівняння регресії, що описують залежність електричних параметрів  $n$  і  $\mu$  від технологічних факторів ( $T_n = 473 \dots 623$  К,  $T_c = 823$  К,  $T_s = 853$  К) у вузькому інтервалі зміни складу  $x$  наважок ( $0.164 \leq x \leq 0.206$ ). Встановлено, що для концентрації і рухливості носіїв заряду має місце ефект взаємодії факторів ( $|b_{12}| \ll \Delta b_j$ ), але на параметри оптимізації більш вагомо впливає зміна температури осадження  $T_n$ , ніж складу наважок  $x$  (в усіх моделях  $|b_1| \gg |b_2|$ ), бо інтервал зміни  $T_n$  набагато ширший, ніж інтервал зміни  $x$ . Взаємний вплив зміни  $T_n$  і  $x$  на параметри оптимізації  $n$  і  $\mu$  обумовлює існування їх екстремальних значень всередині факторного простору.

У четвертому розділі описана технологія виготовлення фоторезисторів і фотодіодів на основі епітаксійних шарів  $n$ - $PbTe$  і  $p$ - $Pb_{1-x}Sn_xTe$  ( $0.164 \leq x \leq 0.206$ ), вирощених на сколах (111)  $VaF_2$  з парової фази методом гарячої стінки. Розглянуто методику дослідження основних фотоелектричних параметрів фотоприймачів ІЧ-випромінювання оптичного діапазону спектру. Показано, що метод математичного планування багатофакторних експериментів можна ефективно використовувати при оптимізації параметрів фотоприймачів, виготовлених на основі епітаксійних шарів  $A^{IV}B^{VI}$ , що залежать від технологічних факторів вирощування цих матеріалів з парової фази методом гарячої стінки, а саме досліджено і оптимізовано параметри фоторезисторів і фотодіодів.

дів, виготовлених на основі епітаксійних шарів n-PbTe і p-Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te. Проведено розрахунок параметрів даних фотоприймачів та їх порівняння з результатами експериментальних вимірювань.

Так, в якості параметрів оптимізації для фоторезисторів, виготовлених на основі PbTe і Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te ( $0.164 \leq x \leq 0.206$ ), було вибрано: виявну здатність  $D^*$ , вольт-ватну чутливість  $R_v$ , напругу шумів  $U_m$ , час життя носіїв заряду (сталу часу)  $\tau$ , а також довжину дрейфу  $L_{др}$  і дифузії  $L_{диф}$  носіїв заряду. Для фотодіодів, виготовлених на основі епітаксійних шарів твердого розчину Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te, параметрами оптимізації були: динамічний опір RA, струм шуму  $I_m$ , потужність, еквівалентна шуму,  $P_{неп}$  та реальна  $D^*$  виявна здатність. Змінними факторами для ФП на основі PbTe були: температури підкладок  $T_n$  ( $T_n=473...623$  К), випаровування  $T_v$  ( $T_v=758...878$  К) і стінок камери  $T_c$  ( $T_c=833...983$  К), а для ФП на основі Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te — температури підкладок  $T_n$  ( $T_n=473...613$  К) та хімічний склад наважок  $x$  ( $0.164 \leq x \leq 0.206$ ) при оптимальних фіксованих значеннях температур випаровування  $T_v$  та стінок камери  $T_c$  ( $T_v=823$  К,  $T_c=853$  К).

З використанням методу математичного планування багатофакторних експериментів одержані рівняння регресії, що визначають залежність фотоелектричних параметрів ФП від технологічних факторів вирощування з парової фази у методі гарячої стінки епітаксійних шарів PbTe/(111)BaF<sub>2</sub> і Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te/(111)BaF<sub>2</sub>, на основі яких вони виготовлені.

Згідно з одержаними рівняннями для фоторезисторів на основі PbTe/(111)BaF<sub>2</sub>, встановлено, що для всіх параметрів початкове підвищення температури стінок камери в інтервалі 833...983 К є причиною їх збільшення при зростанні  $T_v$  в інтервалі 758...878 К, коли  $T_n = \text{const}$ , хоча при високих  $T_c$  за тих же умов спостерігається зменшення параметрів оптимізації. При  $T_v=818$  К і підвищенні  $T_c$  (833...983 К) збільшення  $T_n$  на зміну параметрів оптимізації впливає по-різному. При фіксованій  $T_c$  ( $T_c=908$  К) і зміні  $T_n$  в інтервалі 473...623 К підвищення  $T_v$  є причиною зменшення напруги шумів і зростання решти параметрів оптимізації. Виявлено, що вплив технологічного фактору  $T_n$  одержання тонкошарового матеріалу PbTe на параметри фоторезисторів є переважаючим в порівнянні з впливом  $T_v$  і  $T_c$ . Так для всіх параметрів встановлено, що оптимальні  $T_n$ , при яких знайдені екстремальні значення параметрів фоторезисторів, знаходяться в тому інтервалі, коли епітаксійні шари PbTe володіють високими електрофізичними параметрами, а умови їх росту наближаються до термодинамічно рівноважних.

Виявлено, що для всіх параметрів фоторезисторів, виготовлених на основі Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te/(111)BaF<sub>2</sub> ( $0.164 \leq x \leq 0.206$ ), ефект міжфакторної взаємодії відсут-

ній, бо для коефіцієнту рівнянь регресії  $b_{12}$ , який враховує міжфакторну взаємодію, має місце нерівність  $|b_{12}| \geq \Delta b_1$ , а суттєву роль відіграють члени другого порядку. З'ясовано, що складний характер  $\tau$ ,  $U_m$ ,  $R_v$ ,  $L_{др.}$ ,  $L_{диф.}$ ,  $D' = f(T_n, x)$  пов'язаний із концентраційною залежністю і при оптимальних значеннях технологічних факторів  $T_n$  і  $x$ , яким відповідають екстремальні значення параметрів оптимізації, епітаксійні шари  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  характеризуються високими субструктурними та електрофізичними параметрами.

Для фотодіодів, виготовлених на основі  $Pb_{1-x}Sn_xTe/(111)BaF_2$  ( $0.164 \leq x \leq 0.206$ ), встановлено неспівпадання розрахованих оптимальних значень технологічних факторів  $T_n$  і  $x$  вирощування епітаксійних шарів, при яких параметри фотодіодів досягають екстремальних значень. Це пов'язано з впливом на параметри фотодіодної структури монокристалічності матеріалу  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  ( $0.164 \leq x \leq 0.206$ ) n-типу, електричні і субструктурні параметри якого значно менше залежать від технологічних факторів  $T_n$  і  $x$ . З'ясовано, що вплив останніх на параметр  $RA$  обернений до їх впливу на зміну концентрації носіїв заряду і порівняно добре співпадає за характером з впливом на зміну їх рухливості.

Добре співпадання експериментальних результатів вимірювань часу життя носіїв заряду і розрахункових даних спостерігалось тоді, коли до уваги брали як випромінювальну, так і Оже-рекомбінацію носіїв заряду.

Виявлено, що напруга розрахованих ГР шумів ( $-10^{-13}-10^{-12}$  В) фоторезисторів, виготовлених на основі  $PbTe$  і  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  ( $0.164 \leq x \leq 0.206$ ), набагато менша за напругу шуму Джонсона ( $-10^{-11}-10^{-10}$  В). Використані епітаксійні шари  $PbTe$  і  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  були порівняно високодефектними матеріалами (концентрація носіїв заряду  $\sim 6 \cdot 10^{16}-3 \cdot 10^{17}$  см $^{-3}$ ). Це дало можливість стверджувати те, що в даних матеріалах ГР шуми дійсно були досить низькими, і всі виготовлені фоторезистори не працювали в режимі ОФ.

На основі проведених розрахунків параметрів ФП встановлено, що при температурі 78 К всі виготовлені фотодіоди працювали в режимі, близькому до режиму ОФ, і струм генерації в збідненій зоні переважав над дифузійним, що є причиною того, що величина  $RA$  для даних ФД, визначена експериментально, не перевищувала 50 Ом·см $^2$ .

Порівняно добре співпадання розрахованих та експериментальних значень параметрів ФП, виготовлених на основі  $PbTe$  і  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  ( $0.164 \leq x \leq 0.206$ ), мало місце завдяки: 1) вибору механізму проходження струму через ФП, режиму їх роботи, а також механізмів рекомбінації нерівноважних носіїв, які відповідали реальним; 2) застосуванню під час розрахунків формул для електричних параметрів  $n$  і  $\mu$ , які одержані згідно з теорією математичного

планування багатфакторних експериментів.

У п'ятому розділі проведено огляд літературних даних з питань впливу радіаційного опромінення на властивості кристалів і епітаксійних шарів групи  $A^{IV}B^{VI}$ . Досліджено процеси модифікації електрофізичних параметрів епітаксійних шарів  $PbTe$  і  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  під час їх опромінення потоком  $\alpha$ -частинок і протонів відповідно. Дозові зміни концентрації носіїв заряду пояснено на основі генераційно-рекомбінаційного механізму. Показано, що відпал радіаційних дефектів підпорядковується кінетиці першого порядку.

Так, на основі експериментальних досліджень встановлено, що при збільшенні потоку  $\alpha$ -частинок концентрація носіїв заряду  $n$  і питома електропровідність  $\sigma$  епітаксійних шарів  $n$ - $PbTe$  зростають, а холлівська рухливість  $\mu$  змінюється незначно. Залежність концентрації носіїв заряду від величини потоку  $\alpha$ -частинок і її вихід на насичення при  $\Phi > 6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  пов'язані з двома конкуруючими процесами, які відбуваються з дефектами: генерацією френкелівських пар при опроміненні  $\alpha$ -частинками малої густини потоку; тепловою рекомбінацією, яка визначається дифузійними процесами дефектів.

Згідно запропонованої моделі (зважається, що в тонкому шарі  $PbTe$  під час  $\alpha$ -опромінення утворюються дефекти у підгратці металу і халькогену з такими зарядовими станами:  $V_{Pb}^{2-}$ ,  $Pb_i^+$ ,  $Te_i^0$ ,  $V_{Te}^{2+}$ .) генераційно-рекомбінаційний процес, що відбувається під час  $\alpha$ -опромінення, описується системою диференціальних рівнянь, з допомогою яких одержано аналітичний вираз для опису залежності концентрації носіїв заряду від потоку опромінення. В результаті апроксимації теоретичними залежностями експериментальних даних одержано значення коефіцієнтів генерації і дифузії точкових дефектів.

Встановлено, що при опроміненні епітаксійних шарів  $p$ - $Pb_{1-x}Sn_xTe$  ( $x=0.24$ ) потоком протонів дозою до  $7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , спостерігається зменшення концентрації носіїв, а при певних дозах (різні для зразків з різною вихідною концентрацією) — зміна провідності з  $p$ - на  $n$ -тип. При температурах відпалу 360-420 K параметри опромінених протонами епітаксійних шарів повністю відновлюються. З метою пояснення кінетики процесів відпалу, використовуючи формалізм теорії швидкостей хімічних реакцій, одержано аналітичний вираз залежності концентрації носіїв заряду в епітаксійних шарах, опромінених протонами, від часу ізохронного відпалу.

Зроблено припущення, що френкелівські пари в підгратках металу і халькогену є основними початковими дефектами під час протонного опромінення, які визначають концентрацію електронів в тонких шарах.

Виявлено, що характер залежності розрахованих значень концентрації

носіїв заряду  $n$  повністю відповідає експериментальним даним, і середня швидкість зміни концентрації носіїв заряду при протонному опроміненні співпадає зі швидкістю утворення пар Френкеля. Відновлення електричних параметрів епітаксійних шарів обумовлене розпадом міжвузлових комплексів, міграцією та взаємним знищенням вакансій і міжвузлових атомів, які утворюються в результаті опромінення.

### Основні результати і висновки.

1. В результаті проведених експериментів досліджено закономірності зміни субструктурних параметрів епітаксійних шарів халькогенідів свинцю та олова, вирощених методом гарячої стінки на різних підкладках в залежності від технологічних факторів їх одержання (температура підкладки —  $T_n = (461.5 \pm 161.5) \text{ K}$ , температура випаровування —  $T_v = (910 \pm 90) \text{ K}$ , температура стінок камери —  $T_c = (930 \pm 80) \text{ K}$ , та виявлено, що початкове підвищення температури підкладок у визначеному інтервалі ( $T_n = 300\text{-}623 \text{ K}$ ) приводить до зменшення мозаїчності, зниженню рівня неоднорідної мікродеформації. Наступне підвищення  $T_n$  обумовлює погіршення структурної досконалості зразків. Значення температур  $T_n$ , при яких осаджуються структурно досконалі шари твердих розчинів  $\text{Sn}_{1-x}\text{Pb}_x\text{Te}/(111)\text{BaF}_2$ , залежать від хімічного складу конденсату та роду підкладок.

2. З використанням алгоритмічної мови програмування Турбо Паскаль версія 6.0 розроблено пакет програм для оптимізації технології вирощування епітаксійних шарів  $\text{PbTe}$  і  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  ( $0.0 \leq x \leq 1.0$  і  $0.164 \leq x \leq 0.206$ ) з парової фази методом гарячої стінки від технологічних факторів одержання даних епітаксійних шарів, які було реалізовано на IBM PC, AT комп'ютері.

3. Методами математичного планування багатофакторних експериментів для оптимізації технології вирощування з парової фази методом гарячої стінки тонких шарів  $\text{PbTe}$  і  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  реалізовано рототабельне планування другого порядку. Проведено дослідження за схемою повного факторного експерименту  $2^k$  ( $k=2$  для  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  і  $k=3$  для  $\text{PbTe}$ ), де в якості гіпотетичної була вибрана квазіквадратична модель з врахуванням міжфакторної взаємодії. Це дозволило одержати рівняння регресії, які визначають залежність електрофізичних параметрів епітаксійних шарів  $\text{PbTe}$  і  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  від технологічних факторів їх вирощування з парової фази у методі гарячої стінки. Визначено оптимальні значення технологічних факторів, яким відповідають екстремальні значення електрофізичних параметрів досліджуваних тонких шарів.

4. Згідно з одержаними рівняннями встановлено, що на зміну параметрів  $n$  і  $\mu$  епітаксійних шарів  $\text{PbTe}$  на основі  $(111)\text{BaF}_2$  сильний відбиток накладає

ефект міжфакторної взаємодії, але більш суттєву роль в зміні цих параметрів відіграють  $T_n$  і  $T_c$ . При оптимальних технологічних умовах ( $T_n=549\text{K}$ ,  $T_n=818\text{K}$ ,  $T_c=908\text{K}$  — центр факторного простору) ці тонкі шари характеризуються низькими концентраціями ( $n \leq 10^{17}\text{ см}^{-3}$ ) і відповідно високими значеннями рухливості ( $\mu \leq 4 \cdot 10^4\text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ) носіїв заряду.

Виявлено, що для епітаксійних шарів  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}/(111)\text{BaF}_2$  ( $0.0 \leq x \leq 1.0$ ) зміна хімічного складу наважок  $x$  більш вагомо впливає на параметри оптимізації, ніж температура осадження  $T_n$ , а для параметрів  $n$  і  $\mu$  ефект взаємодії факторів відсутній.

5. Вперше показано, що методи математичного планування багатofакторних експериментів можна ефективно використовувати для оптимізації параметрів фотоприймачів, виготовлених на основі епітаксійних шарів  $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$ , через оптимізацію технологічних факторів вирощування цих матеріалів з парової фази методом гарячої стінки, якими вони визначаються.

6. Для фоторезисторів і фотодіодів одержані рівняння регресії, що визначають залежність їх фотоелектричних параметрів від технологічних факторів вирощування з парової фази у методі гарячої стінки матеріалів, на основі яких вони виготовлені.

За цими рівняннями встановлено оптимальні значення технологічних факторів одержання епітаксійних шарів  $\text{PbTe}$  і  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  ( $0.164 \leq x \leq 0.206$ ), при яких вирощується такий матеріал, що виготовлені на його основі фотоприймачі мають параметри, які досягають екстремальних значень, і для яких має місце добре співпадання результатів розрахунків та експериментальних вимірювань.

7. Для всіх параметрів фоторезисторів, виготовлених на основі  $\text{PbTe}/(111)\text{BaF}_2$ , встановлено, що вони набувають екстремальних значень при тих оптимальних  $T_n$ , які знаходяться в інтервалі  $523\text{--}583\text{K}$ , коли епітаксійні шари  $\text{PbTe}$  володіють високими електрофізичними параметрами, а умови їх росту наближаються до термодинамічно рівноважних.

8. Неспівпадання розрахованих оптимальних значень технологічних факторів  $T_n$  і  $x$  вирощування епітаксійних шарів  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  ( $0.164 \leq x \leq 0.206$ ), при яких параметри фотодіодів досягають екстремальних значень, пов'язане з впливом на фотодіодні структури монокристалічності матеріалу  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  ( $0.164 \leq x \leq 0.206$ )  $n$ -типу, електрофізичні і субструктурні параметри якого значно менше залежать від технологічних факторів  $T_n$  і  $x$ .

9. Застосовуючи алгоритмічну мову програмування Турбо Паскаль версія 6.0 для ІВМ РС, АТ комп'ютера з використанням значень електрофізичних параметрів, одержаних з допомогою методів математичного планування

багатофакторних експериментів, розроблено пакет програм для розрахунку параметрів фотоприймачів, які виготовлені на основі епітаксійних шарів РвТе і  $P_{1-x}Sn_xTe$  ( $0.164 \leq x \leq 0.206$ ), вирощених з парової фази методом гарячої стінки.

10. На підставі співпадання розрахованих з допомогою розробленої програми та експериментально визначених параметрів фотоприймачів зроблено висновок, що під час ІЧ-опромінення з області власного поглинання час життя носіїв заряду ( $\sim 10^{-8}$  с) в обох матеріалах був обмежений як випромінювальною, так і Оже-рекомбінацією; всі виготовлені фоторезистори не працювали в режимі ОФ, бо напруга розрахованих ГР шумів ( $\sim 10^{-13}$ - $10^{-12}$  В) (в міру порівняно високої дефектності матеріалу) набагато менша за напругу шуму Джонсона ( $\sim 10^{-11}$ - $10^{-10}$  В); всі виготовлені фотодіоди працювали в режимі, близькому до режиму ОФ, а струм генерації в збідненій зоні був переважаючим, що обумовило порівняно низькі ( $< 50 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ ) значення RA, які спостерігались на експерименті.

11. Встановлено, що:

1) при збільшенні потоку  $\alpha$ -частинок до  $\Phi=8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  концентрація носіїв заряду  $n$  і питома електропровідність  $\sigma$  епітаксійних шарів  $n$ -РвТе зростають, а холлівська рухливість  $\mu$  змінюється незначно;

2) при опроміненні епітаксійних шарів  $p$ -Рв $_{1-x}$ Sn $_x$ Te ( $x=0.24$ ) протонами спостерігається зменшення концентрації носіїв заряду, а при певних дозах (різних для зразків з різною вихідною концентрацією носіїв заряду) — зміна провідності з  $p$ - на  $n$ -тип. При температурах відпалу 360-420 К параметри опромінених протонами зразків повністю відновлюються.

Опромінення зразків епітаксійних шарів  $n$ -РвТе  $\alpha$ -частинками дозами до  $\Phi=8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  погіршує їх електричні параметри, а, отже, не може бути використане для обробки зразків з метою створення на їх основі фоторезисторів.

Опромінення зразків  $p$ -Рв $_{1-x}$ Sn $_x$ Te ( $x=0.24$ ) потоком протонів дозою до  $\Phi=7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , при якому спостерігається зміна типу провідності даного матеріалу, та їх ізохронний відпал при температурі 360-420 К ведуть до покращення електричних параметрів цих епітаксійних шарів і можуть бути використані для створення зразків, на основі яких виготовлятимуться фотоприймачі ІЧ-діапазону оптичного спектру. -

## СПИСОК ОСНОВНИХ ПУБЛІКАЦІЙ.

1. Д.М. Фрейк, Я.П. Салий, А.М. Добровольская. Определение профиля распределения радиационных дефектов в пленках  $A^{IV}B^{VI}$  в результате прохождения  $\alpha$ -частиц. В кн.: Фізика взаємодія

заряженных частиц с кристаллами. Тезисы докладов XXI Всесоюзного совещания. М.. МГУ. 1991. - с.131.

2. Д.М. Фрейк, Я.П. Салий, М.А. Рувинский, О.М. Возняк, И.Я. Горичок, А.М. Добровольская. Радиационные дефекты и термостабильность пленок  $A^{IV}B^{VI}$  при протонном облучении. В кн.: XXII совещание по физике взаимодействия заряженных частиц. Тезисы докладов. М.. МГУ. 1992. - с.102.

3. Д.М. Фрейк, Я.П. Салий, А.М. Добровольская, Л.И. Межиловская. Определение и оценивание параметров изохронного отжига полупроводников статистическими методами. В кн.: Планирование и автоматизация эксперимента в научных исследованиях. X научная конференция. М.. Антал. 1992. - с.42-43.

4. В.В. Прокопів, О.В. Рашкевич, А.М. Добровольська, С.Д. Кирста.. Управління власними дефектами і електричними властивостями плівок  $A^{IV}B^{VI}$  в процесі їх вирощування. В кн.: Фізика і технологія тонких плівок складних напівпровідників. Матеріали V-ої Української конференції. Ужгород. 1992. - с.91-93.

5. Фрейк Д.М., Салий Я.П., Рувинский М.А., Горичок М.Я., Фрейк А.Д., Добровольская А.М.. Образование и отжиг радиационных дефектов в пленках  $p\text{-Pb}_{0.76}\text{Sn}_{0.24}\text{Te}$  при протонном облучении. ФТП. 1992. т.26. вып.12. - с.2103-2106.

6. Р.І. Собкович, М.А. Лоп'яно, В.В. Прокопів, М.Я. Галушак, А.М. Добровольська. Математичне планування та моделювання процесу випаровування з парової фази плівок селеніду свинцю та телуриду олова. IV Міжнародна конференція з фізики і технології тонких плівок. Матеріали. ч.1. Івано-Франківськ. 1993. - с.49.

7. Фрейк Д.М., Чобанюк В.М., Собкович Р.І., Салий Я.П., Лоп'яно М.А., Добровольська А.М.. Моделювання ізохронного та ізотермічного відпалів радіаційних дефектів у бінарних сполуках  $A^{IV}B^{VI}$ . Фізика і хімія твердих тіл. Вісник ІФКВ ІФТ Прикарпатського університету. 1994. N2. - с.13-24.

8. Фрейк Д.М., Собкович Р.І., Поплавський О.П., Прокопів В.В., Лоп'яно М.А., Добровольська А.М.. Зміна типу провідності у тонких плівках  $PbSe$  і зарядовий стан власних точкових дефектів. Фізика і хімія твердих тіл. Вісник ІФКВ ІФТ Прикарпатського університету. 1994. N2. - с.25-34.

9. Фрейк Д.М., Чобанюк В.М., Лисак А.В., Лоп'яно М.А., Добровольська А.М., Шепетюк В.А.. Математичне планування і оптимізація технології вирощування з парової фази епітаксійних шарів монохалькогенідів свинцю і твердих розчинів на їх основі. В кн.: Техника и физика электронных систем и устройств. Тезисы докладов.

Сумы. 1995. - с.271.

10. Чобанюк В.М., Лоп'янко М.А., Добровольська А.М., Белей М.І., Шепетюк В.А.. Особливості вольт-фарадних характеристик діодів Шоттки Pb(In)-p-PbSe-Sn з інверсійною p-областю. В кн.: Техника и физика электронных систем и устройств. Тезисы докладов. Сумы. 1995. - с.272.

11. Павлюк М.Ф., Рувінський М.А., Лоп'янко М.А., Добровольська А.М., Кирста С.Д., Шепетюк В.А.. Математичне планування і технологічні діаграми епітаксійних шарів твердих розчинів на основі халькогенідів свинцю і олова. V Міжнародна конференція з фізики і технології тонких плівок. Тези доповідей. ч.1. Івано-Франківськ. 1995. - с.49.

12. Фреїк Д.М., Чобанюк В.М., Шепетюк В.А., Добровольська А.М., Дем'янчук М.В.. Вплив технологічних факторів вирощування епітаксійних шарів телуриду свинцю на характеристики фотомагнітних приймачів. V Міжнародна конференція з фізики і технології тонких плівок. Тези доповідей. ч.1. Івано-Франківськ. 1995. - с.50.

13. Фреїк Д.М., Галушак М.О., Добровольська А.М., Шепетюк В.А.. Оптимізація параметрів активних елементів на основі епітаксійних шарів  $A^{IV}B^{VI}$ . V Міжнародна конференція з фізики і технології тонких плівок. Тези доповідей. ч.2. Івано-Франківськ. 1995. - с.207.

14. Фреїк Д.М., Чобанюк В.М., Добровольська А.М., Шепетюк В.А.. Оптимізація параметрів фоторезисторів на основі епітаксійних шарів  $A^{IV}B^{VI}$ . V Міжнародна конференція з фізики і технології тонких плівок. Тези доповідей. ч.2. Івано-Франківськ. 1995. - с.209.

15. Д.М. Фреик, В.В. Прокопів, Я.П. Салий, Г.Д. Материк, И.М. Лищинский, А.М. Добровольская. Зарядовое состояние собственных атомных дефектов и термодинамический p-p-переход в пленках селенида свинца. Изв. АН России. Неорган. материалы. 1996. т.32. N4. - с.1-5.

### Abstract:

**Dobrovolskaya A.M. Optimization of structural and physical characteristics of epitaxial layers based on  $A^{IV}B^{IV}$  combinations for photoelectric elements of infrared spectrum.**

15 basic scientific works are defended, an author certificate. Optimal conditions of growing from steam phase by "hot wall" method using theory of mathematic planning of multifactor experiments were investigated:

1) with defined electrophysical parameters and limits, which can be obtained

using abovementioned method;

- 2) with photoelectric parameters, which reach maximums under these conditions.

Obtained regression equations, which describe dependence of electrophysical parameters of specified layers and photoelectrical parameters photosensitive diodes and photosensitive resistors, made from this basic materials, from technologic factors of growing these materials from steam phase by "hot wall" method.

Processes of modification thin layers  $PbTe$  and  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  when they are radiated by protons and  $\alpha$ -parts were investigated and model intrinsic pointed atomic defects for  $PbTe$  was considered using quasichemical reactions theory.

## Резюме:

**Добровольская А.М.. Оптимизация структурных и физических характеристик эпитаксиальных слоев на основе соединений  $A^{IV}B^{VI}$  для фотоэлектрических элементов инфракрасной области спектра.**

Защищается 15 основных научных работ, в которых исследовались с помощью теории математического планирования многофакторных экспериментов оптимальные условия выращивания из паровой фазы методом горячей стенки эпитаксиальных слоев  $PbTe/(111)BaF_2$  и  $Pb_{1-x}Sn_xTe/(111)BaF_2$ :

- 1) с заданными электрофизическими параметрами и их граничные значения, которые можно получить, применяя указанный метод;
- 2) с фотоэлектрическими параметрами, которые достигают при этих условиях максимально возможные значения.

Получены уравнения регрессии, которые описывают зависимость электрофизических параметров указанных слоев, а также фотоэлектрических параметров фотодиодов и фоторезисторов, изготовленных на их основе, от технологических факторов выращивания данных материалов из паровой фазы методом горячей стенки.

Исследованы процессы модификации нелегированных слоев  $PbTe$  и  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  во время их протонного и  $\alpha$ -облучения, а также рассмотрена модель собственных точечных атомных дефектов для  $PbTe$  в рамках теории квази-химических реакций.

**Ключові слова:** епітаксійні шари групи  $A^{IV}B^{VI}$ , твердий розчин, метод гарячої стінки, технологічні фактори вирощування, метод математичного планування багатфакторних експериментів, оптимізація, електрофізичні і фотоелектричні параметри.

*Добровольська Анна Михайлівна*

Оптимізація структурних і фізичних характеристик  
епітаксійних шарів на основі сполук  $A^{IV}B^{VI}$   
для фотоелектричних елементів інфрачервоної області спектру

Підписано до друку 25.07.1996р.

Формат А4. Тираж 100 екз.

СТ "Маслосоюз" м.Тисмениця, вул.Вірменська,15

Віддруковано на різнографі.

438878

AB 35.460

**AB 35.460**