

ЧЕРНІВЕЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Ім. Ю. ФЕДЬКОВИЧА

На правах рукопису

САЛІЙ
Ярослав Петрович

ДЕФЕКТОУТВОРЕННЯ В ПЛІВКАХ ХАЛЬКОГЕНІДІВ СВИНЦЮ І ОЛОВА
ПІД ВПЛИВОМ РАДІАЦІЙНОГО ОПРОМІНЕННЯ

Спеціальність 01.04.10 - фізика напівпровідників і
діелектриків

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

ЧЕРНІВЦІ - 1994



Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Прикарпатському університеті ім. В. Стефаника м. Івано-Франківськ

Науковий керівник - кандидат фізико-математичних наук, професор ГАЛУЩАК МАР'ЯН ОЛЕКСІЙОВИЧ,

Науковий консультант заслужений діяч науки і техніки України, доктор хімічних наук, професор ФРЕК ДМИТРО МИХАЙЛОВИЧ.

Офіційні опоненти: лауреат державної премії України, доктор фізико-математичних наук ДМИТРУК МИКОЛА ЛЕОНІДОВИЧ;
доктор фізико-математичних наук ЗАЯЧУК ДМИТРО МИХАЙЛОВИЧ

Провідна установа - Львівський державний університет ім. І. Франка.

Захист відбудеться "29" 04 1994 р. о 15 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 068.16.01 в Чернівецькому держуніверситеті (274012 м. Чернівці, вул. Коцюбинського, 2).

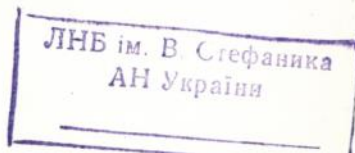
З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Чернівецького держуніверситету

(274012 м. Чернівці, вул. Л. Українки, 23).

Автореферат розісланий "21" 03 1994 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради

КУРГАНЕЦЬКИЙ М. В.



ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Найбільш важливі електронні властивості вузькощілинних напівпровідників дуже чутливі до характеру і концентрації різного роду дефектів кристалічної ґратки. З особливою гостротою це відноситься до напівпровідників групи $A^{IV}B^{VI}$, які мають ряд унікальних властивостей, що сприяє їх вастосуванню як для модельних досліджень, так і в практиці, особливо для виготовлення приямачів ІЧ-випромінювання спектрального діапазону 3-50мкм. Висока потужність джерел випромінювання на основі сполук халькогенідів свинцю і олова дозволяє використовувати їх у швидкодійчих спектрометрах для контролю складу атмосфери, в молекулярній спектроскопії, в системах космічного зв'язку і т.д.

Розвиток сучасних напівпровідникових технологія, таких як формування плівкових структур, лазерний відпал, і радіаційні методи легування (радіаційні дефекти, трансмутаційна імплантація, радіаційно стимульована дифузія) і ядерна енергетика приводять до необхідності розуміння природи і властивостей радіаційних дефектів, процесів їх утворення, а також впливу на концентрацію і рухливість вільних носіїв заряду.

Незважаючи на значну кількість літератури з теоритичного і експериментального дослідження дефектної підсистеми халькогенідів свинцю і олова, процеси генерації і кінетики радіаційних дефектів не одержали належного розгляду, а відомості про зарядовий стан і енергетичні рівні дефектів носять пошуковий характер.

Крім того, ніде раніше не проводилось системного дослідження впливу альфа-опромінення на структурні і електричні параметри плівок халькогенідів свинцю і олова з метою керування їх властивостями.

Вище викладене свідчить про актуальність вибраної теми як з точки зору розробки науково обґрунтованих методик радіаційного легування епітаксіальних шарів $A^{IV}B^{VI}$ з метою одержання необхідних параметрів, так і розуміння фізико-хімічних процесів, що відбуваються у плівковому матеріалі під впливом радіаційного опромінення.

Мета роботи. Теоретичне і експериментальне дослідження впливу технологічних факторів - умов вирощування, радіаційної і термічної обробки - на процеси утворення власних дефектів і електричні параметри епітаксіальних шарів халькогенідів свинцю і олова, одержаних з парової фази методом гарячої стінки.

Для досягнення поставленої мети розв'язані наступні задачі:

- освоєно і практично реалізовано спосіб вирощування плівок з парової фази методом гарячої стінки, їх радіаційне опромінення високоенергетичними альфа-частинками, ізохронний і ізотермічний відпал, машинне моделювання фізичних процесів, статистична обробка результатів експерименту;
- вивчено вплив технологічних факторів вирощування на структуру і електричні властивості плівок, розробка фізико-хімічного механізму процесів їх випаровування і конденсації;
- досліджено залежності електричних і структурних параметрів у напівпровідниках групи $A^{IV}B^{VI}$ від потоку опромінення альфа-частинками, встановлено механізм радіаційного дефектоутворення, змодельовано зміщення атомів у дефектних кристалах;
- встановлено закономірності зміни електричних і структурних параметрів плівок при їх ізохронному і ізотермічному відпалі.

Методика експерименту. Для виконання поставлених задач проведено комплексні дослідження з залученням наступних технологій і методик:

- вирощування епітаксіальних шарів з парової фази методом гарячої стінки;
- радіаційного опромінення плівок альфа-частинками густиною потоку $5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ і енергією ^5MeV ; - ізотермічного (до 1 року) і ізохронного (в інтервалі температур 300...450K) відпалу плівок у вакуумі і на повітрі;
- вивчення структурної досконалості епітаксіальних шарів методом двокристальної спектроскопії;
- визначення електричних параметрів плівок компенсаційним методом в постійних електричних і магнітних полях;
- статистичної обробки результатів експерименту.

Наукова новизна виконаних досліджень

1. Процеси вирощування, радіаційної і термічної обробки епітаксіальних шарів халькогенідів свинцю і олова описано єдиною моделлю френкелівських пар в катіонній і аніонній підґратках.

2. Рівняння неперервності для концентрації дефектів описано зміну в часі електричних параметрів плівки PbSe, PbTe, SnTe як при радіаційному, так і при термічному впливові.

3. Запропоновано двопроесовий механізм ізохронного і ізотермічного відпалів радіаційних дефектів, індукованих високоенергетичними електронами, протонами і альфа-частинками в плівках халькогенідів свинцю і олова.

4. Розраховано енергетичні втрати альфа-частинки і концентрацію утворених радіаційних дефектів в плівках халькогенідів свинцю і олова. Знайдено розподіл радіаційних дефектів у плівках при опроміненні їх ізотропним потоком альфа-частинок.

5. Методами молекулярної динаміки промодельовано структурні порушення, викликані власними дефектами у монокристалах халькогенідів свинцю у випадку врахування взаємодії між найближчими атомами.

Практична значимість роботи

1. Визначено температурно-часові інтервали стабільності структури і електричних параметрів плівки монохалькогенідів свинцю і олова після їх радіаційного опромінення альфа-частинками.

2. Програми для розрахунку на ЕОМ електрофізичних і структурних параметрів в залежності від складу зразка, інтегрального потоку опромінення, часових і температурних характеристик ізохронного і ізотермічного відпалів у вакуумі для епітаксіальних шарів на основі селеніду свинцю, телуриду свинцю і телуриду олова при альфа-опроміненні.

3. Спосіб визначення профілю розподілу радіаційних дефектів у плівках при опроміненні ізотропним потоком альфа-частинок.

4. Рекомендації для створення різкого р-п переходу з урахуванням профілю розподілу радіаційних дефектів індукованих альфа-частинками і інверсії типу провідності у плівках р-типу на певній глибині і при певному значенню потоку опромінення.

На захист виноситься:

1. Фізико-хімічне обґрунтування зарядового стану власних точкових дефектів халькогенідів свинцю і олова в підґратці металу (вакансія (звину) - двократний акцептор, міжвузловинний свинець - однократний донор).

2. Генераційно-рекомбінаційний механізм утворення і накопичення радіаційних дефектів у плівках халькогенідів свинцю і олова при їх опроміненні альфа-частинками.

3. Закономірності зміни електричних параметрів плівок від інтегрального потоку опромінення альфа-частинками.

4. Двопроцесовий механізм ізохронного відпаду у плівках халькогенідів свинцю та його обґрунтування.

Апробація роботи. Основні результати роботи доповідались на: 27 засіданні Всесоюзного постійного семінару "Моделирование на ЭВМ процессов в неметаллических материалах" (Одеса, 1988р.), Міжнародній конференції "The material research modeling" (Львів, 1990р.), III Всесоюзній конференції "Фізика и технология тонких полупроводниковых пленок" (Івано-Франківськ, 1990р.), III Всесоюзній конференції "Материаловедение халькогенидных полупроводников" (Чернівці, 1990р.), XXI, XXII Всесоюзних нарадах по фізиці взаємодії заряджених частинок з кристалами (Москва, 1991, 1992р.), V Українській конференції "Фізика і технологія тонких плівок складних напівпровідників" (Ужгород, 1992р.), X Науковій конференції "Планирование и автоматизация эксперимента в научных исследованиях" (Москва, 1992р.), IV Міжнародній конференції "Фізика і технологія тонких плівок" (Івано-Франківськ, 1993р.), Першій українській конференції "Структура і фізичні властивості неупорядкованих систем" (Львів, 1993р.).

Публікації. По матеріалах дисертації опубліковано 29 праць, список яких приведений у кінці автореферату.

Структура і об'єм дисертації

Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, списку літератури з ІБІ найменування. Повний об'єм роботи, який включає 38 рисунків і 25 таблиць, складає 149 сторінок машинописного тексту. Робота закінчується загальними висновками.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обумовлено актуальність теми, наукова новизна і практична значимість проведених досліджень, визначено мету дисертаційної роботи і основні положення, що виносяться до захисту.

Перший розділ присвячено огляду фізико-хімічних властивостей сполук групи $A^{IV}B^{VI}$. Особливе місце відведено характеристичні електричних і структурних властивостей плівок монохалькогенідів свинцю і олова, одержаних методом гарячої стінки.

Виконано огляд літературних даних по радіаційному опроміненню сполук $A^{IV}B^{VI}$, а саме приведено інформацію про вплив опромінення електронами, протонами, іонами різних атомів і гамма-квантами на властивості кристалів і плівок халькогенідів свинцю і олова. Відмічено, що не зважаючи на теоретичні дослідження зарядового стану власних точкових дефектів, їх результати не застосовуються для пояснення комплексу експериментальних залежностей з радіаційної і термічної обробки плівки. Також не одержано достатнього обґрунтування зміни структурних параметрів при дефектоутворенні.

На основі проведеного аналізу у кінці розділу сформульовані основні задачі, які розв'язуються у даній роботі.

У другому розділі описано спосіб вирощування плівки з парової фази методом гарячої стінки, методики опромінення їх альфа-частинками, ізотермічного і ізхронного відпалів, деталізовано методики дослідження структурних і електричних параметрів плівки; а також методику статистичної обробки результатів експерименту.

В якості вихідного матеріалу для синтезу кристалів використано свинець ОВЧ "СООО", олово ОВЧ "СООО", телур марки "Екстра", селен ОСЧ 2-4. Для вирощування плівки застосовано метод гарячої стінки, перевагою якого у порівнянні з іншими квазірівноважними методами є максимальне наближення умов росту до рівноважних. Система для реалізації цього методу складається з реактора для випаровування з резервуарами основного і легуючого матеріалу, стінки, що підігривається, нагрівника підкладки, системи автоматичного керування технологічними температурами. У якості підкладок використовувалися свіжі сколи кристалів

BaF_2 по площині (III), поліамідна стрічка шм-1. наважками служили синтезовані по методу Бріджмена^{х1} полікристалічні зливки заданого складу.

Для радіаційного опромінення плівок використовувалась установка АОТС-І7Б з радіонуклідним джерелом альфа-випромінювання ^{238}Pu . Енергія альфа-частинок складала 4,5 - 5МеВ, а густина потоку частинок - $2 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Структурні параметри плівок (розміри областей когерентного розсіювання (ОКР), неоднорідність міжплощинних відстаней - мікродеформація $\epsilon = \langle \Delta d / d \rangle$, кутова розорієнтація α) визначались з дифракційних спектрів, одержаних на двокристалічному спектрометрі, змонтованому на базі установки ДРОН-3. Сталу ґратки визначали модефікованим методом Бонда з точністю $\Delta \alpha = \pm 0,001^\circ$.

Вимірювання електричних характеристик шарів проводили потенціометричним способом у постійних електричних і магнітних полях за стандартною методикою. Експериментальні результати апроксимувались за методом найменших квадратів теоретичними залежностями. Пошук мінімуму суми квадратів відхилень здійснювався з допомогою методу багатомірної оптимізації - комплексного методу. Теоретичні розрахунки і машинне моделювання проводили на ІВМ РС/АТ.

Третій розділ присвячений викладу результатів вивчення закономірностей зміни електрофізичних і структурних властивостей епітаксіальних шарів $A^{IV}B^{VI}$ в залежності від технологічних факторів при вирощуванні з парової фази методом гарячої стінки.

Встановлено характер зміни параметрів кристалічної структури епітаксіальних шарів у залежності від температури осадження (T_{II}) і випаровування матеріалу (T_B). Показано, що підвищення температури підкладки в інтервалі $T_{II} = 420 - 580K$ приводить до збільшення розмірів монокристалічних блоків (b) і областей когерентного розсіювання, а також до зменшення величини мозаїчності (ϵ) і рівня неоднорідної мікродеформації в шарах. З високою структурною досконалістю ($b = 10^4 \mu\text{м}$, $\epsilon \sim 1,0 \cdot 10^{-4}$) одержуються шари при наступних умовах вирощування: $T_{II} = 583K$, $T_B = 823K$ для $PbSe$. Збільшення температури осадження до $T_{II} > 600K$ обумовлює

1* Автор вдячний Старіку П.М. за надані синтезовані кристали.

погіршення структурних характеристик плівкового матеріалу. При підвищенні T_B умови росту відхиляються від рівноважних, у результаті чого спостерігається погіршення структури шарів.

Досліджено вплив температури осадження і парціальних тисків парів металу і халькогену на електричні характеристики шарів селеніду і телуриду свинцю. Так, наприклад, для PtSe при збільшенні температури конденсації у діапазоні $T_{II} = 120-620\text{K}$ зменшується концентрація електронів у зразках, відбувається інверсія типу провідності з n на p (при $T_{II} \approx 500\text{K}$) і спостерігається наступний ріст концентрації дірок. Виявлено, що шари, одержані в області термодинамічної інверсії типу провідності, мають мінімальну концентрацію ($n \sim 10^{17}\text{cm}^{-3}$) і максимальну рухливість ($\mu_{\text{eff}} = 4 \cdot 10^4\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$). Застосуванням додаткового джерела халькогену і металу показана можливість ефективного керування типом провідності і електричними параметрами плівкового матеріалу.

З метою кількісного пояснення експериментальних залежностей концентрації носіїв заряду в шарах халькогенідів свинцю від температури підкладки, випаровування, а також парціального тиску пари халькогену використано модель кристалохімічних реакцій. Через константи квазіхімічних реакцій і парціальний тиск пари халькогену одержано аналітичні вирази для концентрації носіїв заряду і температури підкладки T_{II}^* , що відповідає вирощуванню плівок в області n - p - переходу.

Вперше вдалось одержати практичне співзв'язання розрахункових і експериментальних значень концентрації носіїв заряду і температур термодинамічної інверсії типу провідності T_{II}^* у випадку використання моделі дефектів у катіонній підгратці: однократних донорів - міжвузловинних атомів свинцю і двократних акцепторів - вакансій свинцю.

Як експериментальні, так і теоретичні результати підтверджують, що зі збільшенням як температури вирощування, так і парціального тиску халькогену відбувається переважające утворення дефектів у підгратці металу. Підвищення же температури випаровування приводить до зміщення n - p - переходу в сторону більших значень T_{II} . Ця обставина зумовлена тим, що високим T_B відповідає збільшення ступеня дисоціації молекул сполуки і підвищення

парціальних тисків компонент, що приводить до більш ефективного індукування міжвузловинних атомів металу у порівнянні з його вакансіями в катіонній підґратці. З ростом парціального тиску пари селену P_{Se_2} при постійних T_{II} і T_{IV} відбувається зменшення концентрації електронів, реалізація термодинамічного $n-p$ - переходу і наступне збільшення концентрації дірок. Так само, як і підвищення T_{II} , збільшення P_{Se_2} приводить до переважаючого утворення дефектів у підґратці металу. Збільшення температури випаровування наважки пр.водить до того, що інверсія типу провідності відбувається при більш високих тисках пари халькогену.

У четвертому розділі досліджено і пояснено електричні і структурні зміни в шарах селеніду свинцю, телуриду свинцю і олова опромінених, різними інтегральними потоками (до 10^{13} см^{-2}) альфа-частинок.

На основі досліджень за методом Віньярда моделі кристалу $A^{IV}B^{VI}$ з ГЦК-ґраткою одержано гістограми змінь міжплощинних відстаней для дефектних кристалів з вакансіями, міжвузловинними атомами і френкелівськими парами. Розглянуто залежності змінь максимуму розподілу міжплощинних відстаней від концентрації дефектів.

Моделювався кристаліт розміром $9 \cdot 9 \cdot 9$ половинок сталой ґратки з потенціалом міжатомної взаємодії Ленарда-Джонса з емпіричними параметрами $\epsilon = 0.02 \text{ eV}$ і $\epsilon = 3.98 \text{ \AA}$. Розраховано гістограми міжплощинних відстаней. Виявлено, що крім зміщення основного максимуму розподілу при збільшенні концентрації дефектів спостерігаються додаткові сателіти, причому при малих концентраціях дефектів обох типів вони спостерігаються з обох сторін від основного максимуму. При збільшенні концентрації дефектів по одному сателіту починає зникати. Приведено розрахункові залежності відносної зміни сталой ґратки від концентрації дефектів, які описуються степеневою функцією $\Delta a/a = (N/N_0)^{\nu}$. Виявляється, що N_0 в цій залежності дорівнює концентрації комірок розміром в одну сталу ґратки ν і не залежить від типу дефектів, а показник ν для френкелівської пари (3.8 ± 0.9) дорівнює середньому значенню показників для вакансія і міжвузловинних атомів (1.6 ± 0.2 і 1.7 ± 1 відповідно). Для вакансія і френкелівських пар приведена функ-

ція береться зі знаком мінус.

Для перевірки цього моделювання виконано порівняння з експериментальними дослідженнями структурних змін у плівках халькогенідів свинцю і олова при альфа-опроміненні. Виявилось, що зміна параметру елементарної комірки від потоку опромінення добре описується залежністю $\Delta a/a = (\Phi/\Phi_0)^\nu$, причому найбільше значення $\nu = 1.8 \pm 0.1$ відповідає PbSe, а найменше $\nu = 0.15 \pm 0.07$ - PbTe. Представляється не випадковою подібність одержаних теоретичних і експериментальних залежностей. Для доказу цього використано експериментальні дані зміни параметру сталого ґратки від концентрації, дефектів одержані іншими авторами з вирощування плівок і імплантації власними складовими.

При експериментальному дослідженні кристалічної структури приповерхневих шарів радіаційно-опромінених плівок PbTe спостерігались додаткові піки в області брегівських кутів для непорушеного кристалу при відбиванні від площини (III), як і передбачалося модельними розрахунками. Крім цього, згідно динамічної теорії дифракції рентгенівських променів, вказані осциляції обумовлені наявністю градієнту механічних напруг, викликаних радіаційними дефектами. При ізотермічному відпалі ці піки зникають. Запропоновано спосіб співставлення гістограм розподілу міжплощинних відстаней і дифракційних кривих на основі використання передавальної функції приладу (формули Вульфа-Брега).

Значна частина розділу стосується досліджень залежностей електричних параметрів плівок халькогенідів свинцю і олова від інтегрального потоку при альфа-опроміненні. У плівках PbSe р-типу провідності при збільшенні потоку опромінення спостерігається зменшення концентрації дірок, при деякому значенні потоку відбувається інверсія типу провідності і подальший ріст концентрації електронів. У плівках з початковим n-типом провідності (PbSe, PbTe) концентрація електронів при опроміненні зростає. При збільшенні потоку альфа-частинок у плівках р-SnTe збільшується концентрація дірок.

З метою уточнення природи радіаційних дефектів у плівках $A^{IV}B^{VI}$ при опроміненні альфа-частинками виконано порівняння експериментальних потокових залежностей концентрація носіїв заряду в них з результатами теоретичних розрахунків згідно ге-

нераціоно-рекомбінаційної моделі. В основі модельних припущень лежать наступні положення: зміна концентрації носіїв заряду являє собою лінійну комбінацію зміни концентрації френкелівських пар у підгратках халькогену і металу; зміни різниці концентрації дефектів френкелівської пари не відбувається.

Для знаходження зміни концентрації дефектів в плівках халькогенідів свинцю при альфа опроміненні розв'язуються наступні диференціальні рівняння, наприклад, для селеніду свинцю:

$$d[V_{Pb}^{-2}]/dt = G_{\alpha} - \mu D_{Pb} [V_{Pb}^{-2}][Pb_1^{+1}],$$

$$[Pb_1^{+1}] = [V_{Pb}^{-2}] - [V_{Pb}^{-2}]_0,$$

$$d[V_{Se}^{+2}]/dt = G_{\alpha} - \mu D_{Se} [V_{Se}^{+2}][Se_1^0],$$

$$[Se_1^0] = [V_{Se}^{+2}] - [V_{Se}^{+2}]_0,$$

де G - коефіцієнт генерації власних дефектів, ρ - густина потоку альфа-частинок, μ - коефіцієнт рекомбінації, D_{Pb} - коефіцієнти дифузії свинцю і D_{Se} - олова. Зміна концентрації дефектів у телуриді свинцю описується аналогічно, для телуриду олова зарядовий стан вакансія телуру рівний 2⁻. Одержано аналітичні вирази, що описують зміну концентрації носіїв заряду в залежності від потоку опромінення з виходом на насичення. Співставляючи табличні значення коефіцієнтів дифузії і одержані у результаті апроксимації експериментальних даних, виявили деяку розбіжність, яку узгодили через відношення часу опромінення і всього часу на одержання однієї експериментальної точки.

Для одержання первинної інформації про профіль розподілу електричноактивних дефектів у плівках халькогенідів свинцю при альфа-опроміненні вперше застосовано метод зв'язання з вимірюванням об'ємного опору плівок різної товщини. Показано, що експериментальні результати описуються гаусовим розподілом дефектів у матеріалі при плоскопаралельному потоці альфа-частинок з урахуванням ізотропності випромінювання плоского джерела. Середня глибина максимуму розподілу для плівок PbSe складає 12 мкм при стандартному відхиленні нормального розподілу $\sigma = 1.5$ мкм. З урахуванням розрахунку профілю радіаційних дефектів у плівках при опроміненні альфа-частинками розроблено рекомендації до виготовлення різких p-n - переходів.

П'яття розділ присвячений вивченню закономірностей і теоретичному обґрунтуванню зміни електричних і структурних властивостей радіаційно опромінених епітаксіальних шарів халькогенідів свинцю і олова при ізохронному і ізотермічному відпаді на повітрі і у вакуумі. Виконано моделювання ізотермічного відпаду, який відбувається шляхом рекомбінації вакансія і міжвузловинних атомів у випадку однакової і різної їх кількості для двох складових бінарної сполуки. На основі рекурентних формул одержано зручний для досліджень аналітичний вираз для ізохронного відпаду. Встановлено змінюваність температури максимальної зміни концентрації T^* від зовнішніх факторів процесу відпаду і від початкових параметрів зразків.

Важливим результатом моделювання ізохронного відпаду шляхом рекомбінації френкелівських пар в обох підґратках бінарної сполуки є одержання залежностей концентрації носіїв заряду від температури відпаду, що носять немонотонний характер. Амплітуди локальних екстремумів концентрації носіїв заряду від температури ізохронного відпаду залежать від коефіцієнтів дифузії дефектів і від розміру області їх рекомбінації.

Ці залежності застосовано для аналізу експериментальних даних ізохронного відпаду напівпровідників $Pb_{1-x}Sn_xTe$ після протонного і електронного опромінення. У результаті апроксимації експериментальних точок концентрації носіїв заряду від температури відпаду одержано значення параметрів реакції і енергії активації процесів. Середнє значення енергії активації дифузії вакансії телуру $E_1 = 1.20 \pm 0.05$ еВ, а для вакансія свинцю $E_2 = 0.35 \pm 0.05$ еВ. Ці дані близькі до значень, одержаних іншими авторами іншими методами.

Вивчався ізохронний відпад у вакуумі у межах 300-450К радіаційних дефектів у плівках халькогенідів свинцю, опромінених альфа-частинками. На деяких зразках, у яких при опроміненні відбулася інверсія типу провідності з р- на n-тип, під час відпаду при температурі ~ 400 К спостерігається інверсія з n- на р-тип. Крім цього, на залежностях концентрації носіїв заряду від температури спостерігаються екстремуми, що, як вже відзначалось пояснюються протіканням одночасно двох процесів, які дають зворотні ефекти щодо концентрації носіїв заряду. Встанов-

лено, що відпал характеризується реакціями другого порядку. Для енергія активації відпалу в телуридї олова одержано значення близькі до значень розрахованих при відпалї плївок $Pb_{1-x}Sn_xTe$, опромінених протонами і електронами. Енергії активації процесу відпалу плївок $PbSe$ наступні $E_1 = 1.03 \pm 0.05 eV$ для селену і $E_2 = 0.83 \pm 0.05 eV$ для свинцю.

Зміну величини сталої ґратки при ізотермічному відпалї ($T=300K$) на повітрі протягом одного року спостерігали на опромінених альфа-частинками плївках халькогенідів свинцю і олова. Експериментальні точки для $PbSe$ добре описуються експоненціальними залежностями з параметром характерного часу $\tau = 10^6 c$, що приблизно відповідає часу дифузії вакансії свинцю у розмірах об'єму $10^{-18} cm^3$, який припадає на один дефект. на основі цього зроблено висновок про рекомбінаційний характер відпалу радіаційних дефектів.

Кожний розділ закінчується висновками з викладеного матеріалу, а вся робота - загальними висновками. Далше слїдує список цитованої літератури.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

1. Запропоновано квазіхімічний механїзм випаровування і конденсації у вакуумі монохалькогенідів свинцю. Показано, що при випаровуванні плївок $A^{IV}B^{VI}$ з парової фази переважаючими дефектами являються вакансії металу (двозарядний акцептор) і міжвузловинний метал (однозарядний донор).
2. Методом динамічного моделювання впливу точкових дефектів на параметр елементарної комірки показано, що вакансії і френкелівські пари приводять до зменшення, а міжвузловинні атоми - до збільшення сталої ґратки. Зменшення параметра ґратки $PbSe$, $PbTe$ і $SnTe$ за умов опромінення їх альфа-частинками можна пояснити як вакансійним, так і френкелівським дефектоутворенням.
3. Вивчено вплив опромінення альфа-частинками на структуру і електричні параметри плївок селенїду свинцю n- і p-типу, а також n- $PbTe$ і p- $SnTe$. Встановлено, що в $PbSe$ і $PbTe$ опромінення приводить до переважаючого утворення донорних центрів, а в $SnTe$ - акцепторних.
4. На основі кінетичних рівнянь зміни концентрації дефектів

одержано аналітичний вираз для концентрації носіїв заряду в плівках $A^{IV}B^{VI}$ від потоку альфа-опромінення. Співставленням експериментальних і розрахункових залежностей визначено коефіцієнти генерації та дифузії точкових дефектів і розміри області їх рекомбінації.

5. Встановлено взаємовідповідність між розподілом електрично-активних радіаційних дефектів по товщині плівки. Визначено параметри розподілу дефектів в плівках р-PbSe при опроміненні їх ізотропним і потоком альфа-частинок. Показано, що профіль розподілу дефектів має немонотонний характер з різким краєм.

6. Запропоновано двопроесовий дифузійно-рекомбінаційний механізм відпаду радіаційних дефектів у плівках халькогенідів свинцю і олова. Промодельовано зміну залежностей концентрації носіїв заряду від технологічних параметрів відпаду і властивостей плівок. На основі експериментальних даних визначено енергію активації процесів відпаду дефектів.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ОПУБЛІКОВАНІ У РОБОТАХ

1. Образование радиационных дефектов в пленках PbSe при облучении альфа-частицами. / Фрейк Д.М., Салия Я.П., Межиловская Л.И., Собкович Р.И., Школьные А.К., Огородник Я.В. // Физика и техн. полупроводников. - 1989. - Т.23, №6. - С.1015-1018.

2. Электрические свойства поликристаллических пленок PbSe при облучении их альфа-частицами. / Фрейк Д.М., Школьные А.К., Салия Я.П., Остапчук А.И., Межиловская Л.И., Ткачук Р.З. // Украинский физический журнал. - 1989. - Т.34, №9. - С.1392-1393.

3. Влияние альфа-опромінення на електричні властивості монокристалічних шарів халькогенідів свинцю. / Фрейк Д.М., Остапчук А.І., Салия Я.П., Школьные А.К., Межиловська Л.И. // Вісник Львів. унт-ту. Серія Фізична. - 1989. - вип.32. - С.76-81.

4. Распределение радиационных дефектов в пленках PbSe при альфа-облучении. / Фрейк Д.М., Салия Я.П., Фрейк А.Д., Собкович Р.И. // Письма в ЖТФ. - 1989. - Т.15, №23. - С.49-53.

5. Влияние облучения альфа-частицами на структуру и электрические свойства пленок теллурида свинца. / Фрейк Д.М., Огородник Я.В., Школьные А.К., Остапчук А.И., Салия Я.П. //

Поверхность. - 1990. - №. - С.157-159.

6. Релаксация и накопление радиационных дефектов в эпитаксиальных слоях PbSe при альфа облучении. / Фреик Д.М., Миколачук А.Г., Огородник Я.В., Салия Я.П., Фреик А.Д. // Физика твердого тела. - 1990. - Т.32, №. - С.2742-2745.

7. Исследование влияния альфа-излучения на структуру и элетрические свойства пленок PbSe, PbTe, SnTe. / Фреик Д.М., Школьников А.К., Салия Я.П., Межиловская Л.И., Огородник Я.В., Павлик М.Ф. // Изв. АН СССР, Неорг. материалы. - 1990. - Т.28, №12. - С.2493-2502.

8. Профиль распределения радиационных дефектов в пленках при альфа-облучении изотропными источниками. / Фреик Д.М., Салия Я.П., Возняк О.М., Межиловская Л.И. // Украинский физический журнал. - 1991. - Т.36, №3. - С.419-421.

9. Дефектообразование в пленках PbSe при альфа-облучении. / Фреик Д.М., Салия Я.П., Соколов Р.И., Огородник Я.В. // Изв. АН СССР, Неорг. материалы. - 1992. - Т.28, №8. - С.1617-1621.

10. Образование и отжиг радиационных дефектов в пленках $p\text{-Pb}_{0.76}\text{Sn}_{0.24}\text{Te}$ при протонном облучении. / Фреик Д.М., Салия Я.П., Рувинский М.А., Горичок И.Я., Фреик А.Д., Добровольская А.М. // Физика и техн. полупроводников. - 1992. - Т.26, №12. - С.2103-2108.

11. Радіаційні дефекти в $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ при протонному і електронному опроміненні. / Фрік Д.М., Салія Я.П., Чобанюк В.М., Межиловська Л.І., Лішинський І.М. // Український фізичний журнал. - 1993. - Т.38, №3. - С.36-39.

12. Моделирование дефектов в халькогенидах свинца облученных альфа-частицами. / Фреик Д.М., Салия Я.П., Прокопьев В.В., Школьников А.К., Остапчук А.И., Кравец Е.И. // В кн.: Моделирование на ЭДМ структурных дефектов в кристаллах. Сборник научных трудов. Ленинград. - 1988. - С.159.

13. Моделирование профиля радиационных дефектов в пленках халькогенидов свинца при альфа-облучении. / Салия Я.П., Межиловская Л.И., Фреик А.Д., Соколов Р.И. // III Всесоюзная конференция по физике и технологии тонких полупроводниковых пленок. Тезисы докладов. Ивано-Франковск. - 1990. - Ч.1. - С.38.

14. Моделирование ионной имплантации в многослойные и

многокомпонентные мишени на основе метода Монте-Карло./ Зубко Е.И., Зубко Л.Р., Салия Я.П., Илжук И.Я.// III Всесоюзная конференция по физике и технологии тонких полупроводниковых пленок. Тезисы докладов. Ивано-Франковск.- 1990.- Ч.1.- С.39.

15. Салия Я.П., Школьников А.К., Межиловская Л.И. Влияние радиационного облучения альфа-частицами на электрические свойства пленок халькогенидов свинца.//III Всесоюзная конференция по физике и технологии тонких полупроводниковых пленок. Тезисы докладов. Ивано-Франковск.- 1990.- Ч.1.- С.216.

16. Radiation defects modeling in $A^{IV}B^{VI}$ epitaxial layers./ Freik D.M., Saliy Ya.P., Klanitchka V.M., Ogorodnik Ya.V.// Theses of reports of international conference Factor 90. "The material research modelling". Lvov.- 1990.- P.64.

17. Дефектообразование в пленках халькогенидов свинца при облучении альфа-частицами./ Фреик Д.М., Салия Я.П., Колесчук В.В., Лицивский И.М.// В кн. III Всесоюзная конференция по материаловедению халькогенидных полупроводников. Тезисы докладов. Черновцы.- 1991.- Ч.1.- С.101.

18. Салия Я.П., Фреик А.Д. Распределение радиационных дефектов и электрические свойства пленок $A^{IV}B^{VI}$ при альфа-облучении.// Семинар молодых ученых "Радиационная физика и химия твердого тела". Тезисы докладов. Львов.- 1991.- С.53.

19. Определение и оценивание параметров изохронного отжига полупроводников статистическими методами./ Фреик Д.М., Салия Я.П., Добросольская А.М., Межиловская Л.И.// X Научная конференция "Планирование и автоматизация эксперимента в научных исследованиях. Тезисы докладов. М.: МЭИ.- 1992.- С.42.

20. Моделювання і експериментальні дослідження радіаційних дефектів у плівках./ Фреїк Д.М., Салія Я.П., Межиловська Л.Я., Ліцивський І.М.// В кн. Фізика і технологія тонких плівок складних напівпровідників. Матеріали доповідей V і Української конференції. Ужгород.- 1992.- С.29-31.

21. Фреик Д.М., Салия Я.П. Профиль радиационных дефектов в пленках PbSe при альфа-облучении изотропными источниками.// В кн. Материалы XVI совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. М.: МГУ.- 1992.- С.151-153.

22. Радиационные дефекты и термостабильность пленок $A^{IV}B^{VI}$

при протонном облучении./ Фрейнк Д.М., Салия Я.П., Рувинский М.А., Возняк О.М., Горичок И.Я., Добровольская А.М.// В кн. Материалы XXII совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. М.:МГУ.- 1993.- С.103-104.

23. Freink D.M., Saliy Ya.P. Physical metallurgy of films based on Pb and Sn chalcogenides.// Theses of reports of Ukrainian - French Symposium "Condensed Matter: Science and Industry". Lviv.- 1993.- P.144.

24. Салия Я.П. Эффект насыщения концентрации носителей заряда в пленках халькогенидов свинца и олова при радиационном опроминенні.// В кн. IV Міжнародна конференція з фізики і технології тонких плівок. Матеріали. Івано-Франківськ.- 1993.- Ч.І.- С.110.

25. Салия Я.П. Влияние зарядового состояния собственных дефектов у пленках халькогенидов свинца на температуру p-n перехода.// В кн. IV Міжнародна конференція з фізики і технології тонких плівок. Матеріали. Івано-Франківськ.- 1993.- Ч.І.- С.302.

26. Природа радиационных дефектов у пленках селениду свинца при альфа-опроминенні./ Возняк О.М., Салия Я.П., Галушак М.А., Тесленко І.М., Запужляк Р.І.// В кн. IV Міжнародна конференція з фізики і технології тонких плівок. Матеріали. Івано-Франківськ.- 1993.- Ч.І.- С.303.

27. Аномалії залежностей концентрації носіїв заряду в радіаційно опроминених плівках халькогенидів свинцю при ізохронному відпалі./ Рувінський М.А., Чобанюк В.М., Салия Я.П., Ліщинський І.М., Куція Я.П.// В кн. IV Міжнародна конференція з фізики і технології тонких плівок. Матеріали. Івано-Франківськ.- 1993.- Ч.І.- С.305.

28. Фрейнк Д.М., Салия Я.П., Добровольська Г.М. Моделирование структурного разупорядкования в бинарных ПИК структурах.// I Українська конференція "Структура і фізичні властивості неупорядкованих систем" Тези доповідей. Львів.- 1993.- С.45.

29. Дефектоутворення і структурне впорядкування у сполуках $A^{IV}B^{VI}$ при радіаційній дії./ Фрейнк Д.М., Межиловська Л.Я., Салия Я.П., Лутчин Р.В.// I Українська конференція "Структура і фізичні властивості неупорядкованих систем" Тези доповідей. Львів.- 1993.- Ч.І.- С.52.

460932

A229.441

AB 29.441