

ВОЛИНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ім. ЛЕСІ УКРАЇНКИ

Федосов Сергій Анатолійович

УДК 621.315.592

Вплив структурних дефектів радіаційного походження на фотоелектричні властивості антимоніду
і сульфіді кадмію

01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

ЛУЦЬК – 1999

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Волинському державному університеті
ім. Лесі Українки, Міністерство освіти України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук,
професор
Давидюк Георгій Євlampійович
Волинський державний університет,
завідувач кафедрою фізики твердого тіла.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Беляєв Олександр Євgenович
провідний науковий співробітник Інституту фізики напівпровідників
НАН України (м. Київ);

кандидат фізико-математичних наук,
Хіврич Володимир Ількович
старший науковий співробітник відділу радіаційної фізики Наукового
центру “Інститут ядерних досліджень НАН України” (м. Київ).

Провідна установа: Чернівецький державний університет ім. Ю.Федьковича,
м. Чернівці.

Захист відбудеться 22 червня 1999 року о 15 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради
К.32.051.01 при Волинському державному університеті ім. Лесі Українки за адресою: 263021,
м. Луцьк, вул.Потапова,9.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Волинського державного університету.

Автореферат розісланий 20 травня 1999 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

Божко В.В.

ЗАГАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОБОТИ

Актуальність теми. Напівпровідники антимоніду і сульфід кадмію є перспективними матеріалами для різних областей науки і техніки. Вони знайшли широке застосування в оптоелектроніці, нелінійній оптиці і інших областях електронної техніки. Часто корисні для практичного використання фізичні властивості бінарних сполук визначаються дефектами їх структури.

Є певні успіхи у вивченні впливу дефектів на властивості напівпровідників A^2B^6 . Менш вивченими в цьому відношенні залишаються напівпровідники типу A^2B^5 . В літературі практично відсутні дані про вплив γ - і нейтронного опромінення на фізичні властивості антимоніду кадмію, за виключенням досліджень впливу порівняно невеликих інтегральних потоків γ - квантів ^{60}Co (до 10^{18}см^{-2}) на p -зоопір $n\text{-CdSb}$ і швидких нейтронів (10^{15}н/см^2) на явища переносу.

Незважаючи на те, що типи дефектів у CdS і їх вплив на основні параметри цих кристалів вивчаються порівняно давно, в публікаціях зустрічаються суперечливі відомості про моделі структурних пошкоджень, відповідальних за важливі оптичні параметри CdS та інших бінарних сполук групи A^2B^6 .

Особливістю власних дефектів ґратки бінарних напівпровідників є активна взаємодія їх з легуючими і неконтрольованими домішками. Оскільки технологія вирощування напівпровідникових сполук допускає утворення помітної концентрації неконтрольованих дефектів, то при невеликих дозах опромінення введені радіацією дефекти будуть створювати з неконтрольованими дефектами і домішками різні комплекси, що значно ускладнює одержання інформації про роль власних дефектів ґратки у формуванні фізичних властивостей напівпровідників.

При великих дозах опромінення концентрація радіаційних дефектів перевищує концентрацію неконтрольованих домішок і роль радіаційних дефектів у формуванні фізичних властивостей кристалів стає домінуючою, що визначає актуальність досліджень з використанням великих доз опромінення.

Саме дослідженню структурних дефектів, механізмів їх утворення в опромінених великими дозами γ -квантів ^{60}Co , швидких електронів ($E=1,2\text{MeV}$) і нейтронів ($E=2\text{MeV}$) монокристалах антимоніду і сульфід кадмію, а також вивченню впливу радіаційних пошкоджень на фізичні властивості цих бінарних матеріалів присвячена дисертаційна робота. Радіаційна фізика бінарних сполук відкриває перспективи впровадження технологій, які дозволяють у широких межах змінювати фізичні властивості напівпровідників для створення матеріалу з наперед заданими фізичними властивостями.

Зв'язок роботи з науковими програмами та плануванням. Робота виконувалась у рамках галузевої програми “Фізико-хімічні основи матеріалознавства складних напівпровідникових фаз багатокомпонентних систем $\text{Me-B}^{\text{IV}}\text{-(C}^{\text{V}}\text{)-X(Г)}$, комплексне дослідження їх властивостей та впливу на них зовнішніх факторів (№0194 И 038208)”.

Мета дисертаційної роботи полягає у встановленні природи основних структурних дефектів в опромінених великими дозами ядерних частинок монокристалах антимоніду і сульфїду кадмію, та вивченні їх впливу на гальваномагнітні, оптичні та фотоелектричні властивості досліджуваних матеріалів.

Для досягнення поставленої мети розв'язувалися такі задачі:

- ☐ ☐ експериментальні дослідження впливу радіаційних дефектів створених великими дозами γ - і нейтронного опромінення на електричні, оптичні та фотоелектричні властивості CdSb;
- ☐ ☐ вивчення кінетики і встановлення механізмів відпалу радіаційних дефектів в монокристалах антимоніду і сульфїду кадмію;
- ☐ ☐ дослідження особливостей фотопровідності легованих міддю електронно опромінених монокристалів CdS при неоднорідному розподілі структурних дефектів;
- ☐ ☐ встановлення природи центрів швидкої рекомбінації в електронно опромінених спеціально нелегованих та легованих міддю кристалах CdS.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що:

1. Вперше досліджено вплив великих доз γ - ($\Phi=10^{19}\text{см}^{-2}$) та нейтронної радіації ($\Phi=2\cdot 10^{18}\text{н/см}^2$) на електричні, оптичні та фотоелектричні властивості монокристалів CdSb.
 - ☐ ☐ ☐ Запропонована модель деяких дефектів радіаційного походження в монокристалах CdSb.
3. На основі феноменологічної теорії, яка базується на моделі неоднорідного розподілу радіаційних дефектів, пояснено особливості фотопровідності в електронно опромінених ($E=1,2\text{MeV}$) монокристалах CdS легованих міддю ($N_{\text{Cu}}=10^{18}\text{см}^{-3}$).
4. Досліджено кінетику утворення центрів швидкої рекомбінації при електронному опроміненні нелегованих та легованих міддю монокристалів CdS;
5. На основі аналізу відпалу опромінених кристалів встановлено основні стадії високо температурного відпалу ($T>290\text{K}$) радіаційних пошкоджень в CdSb і CdS. Визначено енергію активації відпалу деяких дефектів.

Практична цінність роботи.

1. Експериментально встановлений факт зміни типу провідності в CdSb при практично незмінній рухливості носіїв струму (в області кімнатних температур) після нейтронного опромінення, розширює можливості радіаційної технології управління властивостями CdSb.

2. Велика енергія активації темної електропровідності $E=0,16\text{eV}$ в опромінені швидкими нейтронами CdSb-монокристалах ($\Phi=2\cdot 10^{18}\text{н/см}^2$) може бути основою для розробки на базі даного матеріалу чутливих терморезисторів в області $T<300\text{K}$, в якій радіаційні дефекти термостабільні.

3. Розширення спектральної області фоточутливості при порівняно невеликому зменшенні (приблизно в 10-80 раз) її абсолютної величини в CdSb і CdS опромінені великими дозами γ -, електронної і нейтронної радіації відкриває можливості виготовлення, на базі даних матеріалів, радіаційно стійких в широкій спектральній області фотодатчиків, дозиметрів і інших реєструючих елементів електромагнітного випромінювання і іонізуючих частинок.

4. Одержані в роботі результати можуть виявитися корисними в інтерпретації основних механізмів радіаційного дефектоутворення і моделей радіаційних пошкоджень в інших бінарних напівпровідниках.

Ступінь достовірності. Достовірність одержаних експериментальних результатів і висновків, зроблених на їх основі забезпечувалась застосуванням добре апробованих стандартних методик електричних, оптичних і фотоелектричних вимірювань, виконанням достатньої кількості експериментів та відтворюваністю одержаних результатів, використанням у вимірювальних установках приладів і вузлів, що пройшли метрологічну атестацію, а також коректністю розрахунків досліджуваних величин.

Особистий внесок автора. У роботі узагальнені результати досліджень, виконаних авторами та співробітниками науково-дослідної лабораторії фізики і хімії твердого тіла ВДУ ім. Лесі Українки по дослідженню фізичних властивостей бінарних сполук. Автору належить основний обсяг робіт, пов'язаних з експериментальними дослідженнями та обробкою їх результатів, участь у розробці моделей фізичних процесів, їх обґрунтування.

Апробація роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на Міжнародній конференції “The First International Conference on Material Science of Chalkogenide and Diamond – Structure Semiconductors” (Чернівці, 1994); на міжнародній конференції “IV-th NEXUSPAN Workshop on Sensors for Control of Irradiation” (Одеса, 1997); на семінарах

кафедри термоелектрики та фізичної метрології Чернівецького державного університету ім. Ю.Федьковича; на об'єднаному науковому семінарі “Фізика напівпровідників та діелектриків” Волинського державного університету ім. Лесі Українки та Луцького державного технічного університету; на науковій конференції професорсько–викладацького складу Луцького індустріального інституту (Луцьк, 1994); на щорічних звітних наукових конференціях професорсько–викладацького складу Волинського державного університету ім. Лесі Українки (1994-1999).

Публікації. Результати роботи виконаних досліджень відображені у 13 друкованих роботах, з них 5 у фахових журналах.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів з висновками до третього і четвертого, загальних висновків та списку використаної літератури з 178 найменувань, в тому числі 32 рисунка, 6 таблиць (всього *** стор.).

ЗМІСТ РОБОТИ.

У **вступі** обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, визначена мета і основні завдання роботи, її наукова новизна та практичне значення отриманих результатів. Дані відомості про апробацію роботи, особистий внесок дисертанта, публікації, об'єм та структуру дисертації.

Перший розділ вміщує огляд літературних даних. Описані фізичні властивості монокристалів CdSb та вплив на них власних дефектів структури, домішок та радіаційних дефектів. Приведено літературні дані про загальні властивості спеціально нелегованих та легованих міддю монокристалів CdS. Розглянута теорія виникнення дефектів в напівпровідниках під дією високо енергетичних електронів, швидких нейтронів та γ - опромінення і робляться висновки про механізми дефектоутворення в цих кристалах. Зроблено аналіз природи радіаційних дефектів та їх впливу на властивості сульфіду кадмію.

Другий розділ дисертації присвячений опису та аналізу технічних характеристик обладнання, на яких проведена експериментальна частина роботи. Приводиться методика підготовки зразків до вимірювань і умови опромінення їх високо енергетичними частинками. Для вимірювання концентрації носіїв заряду і холлівської рухливості спеціально нелегованих монокристалів CdSb до і після опромінення використовувалась холлівська установка. Напруга на зразку реєструвалась універсальним вольтметром В7-16, а холлівська напруга U_x – цифровими вольтметрами В7-

21А. Вимірювальна установка дозволяла також проводити автоматичний запис температурних залежностей питомої провідності та холлівської різниці потенціалів з допомогою двохкоординатного самописця "XY-recorder" ПДА1.

Спектри поглинання, в залежності від досліджуваної спектральної області, вимірювались диспергуючими приладами: ИКС-12, ДМР-4. Коефіцієнт поглинання визначався двома методами: з використанням двох зразків різної товщини та одного зразка з врахуванням виміряного нами значення $R \approx 10\%$.

Дослідження спектрального розподілу фотопровідності проводили за стандартною методикою з синхронним детектуванням. Висока чутливість такої методики забезпечувалась відсіканням шумів і сторонніх впливів, частота яких не співпадала з частотою модульованого сигналу.

Приведено блок-схему установки, яка використовувалась для дослідження спектрів люмінесценції і їх поляризаційних характеристик.

Третій розділ присвячено вивченню впливу опромінення великими дозами γ -квантів і швидкими реакторними нейтронами на електричні, оптичні і фотоелектричні властивості спеціально нелегованих монокристалів антимоніду кадмію.

До опромінення нелеговані кристали CdSb, за рахунок мілких акцепторів з $E_1=3,65 \cdot 10^{-3}$ eV і $E_2=6,2 \cdot 10^{-3}$ eV, зв'язаних з вакансіями кадмію, мали р-тип провідності. Нейтронне опромінення досліджуваних зразків дозою $2 \cdot 10^{18}$ н/см² приводить до конверсії типу провідності, що, очевидно, зумовлено більшою швидкістю введення донорних центрів в порівнянні з дефектами акцепторного типу.

На рис. 1 наведені температурні залежності концентрації вільних носіїв заряду і сталої Холла в неопромінених і опромінених зразках CdSb.

Експоненціальний характер залежності (крива 2) $n=f(1/T)$ при високих температурах в опроміненому кристалі свідчить про те, що при нейтронному опроміненні утворюються дефекти донорного типу з енергією іонізації рівною $E=E_C-(0,16 \pm 0,02)$ eV. Такими дефектами можуть бути міжвузлові атоми кадмію, вакансії сурми або комплекси з неконтрольованих домішок і вакансій.

γ -опромінення нелегованих кристалів р-CdSb ($\Phi=10^{19}$ см⁻²) не веде при $T=291$ K до конверсії типу провідності (крива 3), але концентрація дірок при цьому зменшується майже на порядок і досягає значення $7 \cdot 10^{15}$ см⁻³. При такій концентрації вільних носіїв питома провідність кристалів мало відрізняється від власної. Очевидно, як і при нейтронному опроміненні, опромінення γ -квантами приводить до утворення донорів, котрі компенсують вихідні та новоутворені акцептори і, відповідно, зменшують концентрацію дірок. Але концентрації радіаційно утворених донорів недостатньо, щоб змінити тип провідності, як це мало місце при нейтронному

опроміненні. В області $T=140$ К відбувається зміна знаку сталої Холла в γ -опромінених зразках (крива 3). Відмітимо, що в цих кристалах інверсія типу провідності спостерігалась незалежно від виду обробки поверхні зразка. Відомо, що у випадку невідродженого напівпровідника в слабких магнітних полях постійна Холла визначається формулою:

$$R_x = r \frac{1}{e} \cdot \frac{p - b^2 n}{(p + bn)^2}, \quad (1)$$

де r залежить від механізму розсіювання і за порядком величини рівна 1;

n і p - концентрації електронів і дірок відповідно;

$b = \mu_n / \mu_p$ (μ_n і μ_p - рухливості електронів і дірок).

В умовах наших експериментів, $\mu_p < \mu_n$ і $b^2 > 1$. В даному випадку R_x змінює знак, коли:

$$p < b^2 n, \quad (2)$$

хоча при цьому концентрація дірок p може бути більшою концентрації електронів. Достатньо незначного зменшення концентрації дірок при зниженні температури, щоб змогла виконуватись умова (2), при якій відбувається інверсія знаку R_x . Можливо також, що зі зниженням температури, внаслідок різної температурної залежності рухливостей електронів і дірок, може зростати значення b у рівнянні (1), тобто виконання при певних температурах умови (2). Характерно, що рухливість електронів в опромінених нейтронами монокристалах CdSb при високих температурах помітно менша рухливості дірок в цих же зразках до опромінення, тому, очевидно, в області високих і тим більше низьких температур вона визначається розсіюванням електронів на компенсованих акцепторах (N_a^-) і іонізованих донорах (N_d^+), концентрація яких після опромінення сильно зростає. При цьому рухливість електронів залежить від концентрації розсіюючих заряджених центрів і визначається формулою:

$$\mu_n \sim \frac{T^{3/2}}{2N_a + n}. \quad (3)$$

При зниженні температури концентрація електронів в нейтронно опромінених зразках зменшується за експоненціальним законом, що і пояснює збільшення рухливості електронів в таких кристалах.

Подібність радіаційних дефектів в нейтронно і γ -опромінених кристалах підтверджується нашими оптичними вимірюваннями. На рис. 2 наведено спектральну залежність коефіцієнту поглинання біля краю власного поглинання (**КП**) неопроміненого і опроміненого великими дозами γ -квантів та швидких нейтронів монокристалів CdSb. Як видно з рисунка, коефіцієнт поглинання після опромінення зазнає значних змін.

При γ -опроміненні вводяться точкові дефекти з рівномірним розподілом по об'єму кристалу, тоді як нейтронне опромінення веде до утворення дефектних областей в місці взаємодії ґратки з швидким нейтроном, які, перекриваючись, наповнюють ґратку радіаційними дефектами. Нейтронно і γ -опромінені кристали відрізняються концентрацією радіаційних дефектів в об'ємі кристалу, яка значно більша в нейтронно опроміненних зразках, про що свідчить зміна σ в області КП (рис. 2). Сильна зміна σ після опромінення, особливо нейтронного, не пояснюється, на нашу думку, впливом тільки одних хвостів густин станів, які виникають внаслідок флуктуацій випадкового електричного поля заряджених дефектів, а впливом внутрішніх механічних напруг, які виникають при утворенні радіаційних дефектів.

На рис. 3 представлені криві спектрального розподілу фотопровідності неопроміненого і опромінених CdSb-монокристалів.

Видно, що в неопроміненних монокристалах p-CdSb (крива 1) максимум фотопровідності (пік I) знаходиться при $\hbar\omega = 0,65$ eV.

γ -опромінення CdSb-монокристалів веде до сильного розмиття максимуму фотопровідності в області піку I, до зменшення його інтенсивності (крива 2), що пояснюється утворенням енергетичних рівнів дефектів радіаційного походження, а також деформацією країв зон внутрішніми механічними напруженнями, зв'язаними з радіаційними дефектами.

Нейтронне опромінення CdSb приводить до зменшення фоточутливості у всій спектральній області довжин хвиль (крива 3), особливо сильно в області непрямих переходів. При цьому більш чітко проявляється максимум фотопровідності в області піку II з $\hbar\omega \cong 0,9$ eV. Деяке зменшення фотопровідності можна пояснити зменшенням рухливості електронів в опроміненних зразках, а також, введенням структурних дефектів, які є додатковими центрами рекомбінації. Ми вважаємо, що глибокий донорний рівень $E = E_C - 0,16$ eV, який вводиться нейтронною радіацією є ефективним центром рекомбінації. Із збільшенням концентрації дефектів змінюється спектральний розподіл фотопровідності в сторону збільшення вкладу у фотопровідність прямих переходів, які ми вважаємо відповідальними за пік II. При збільшенні структурних дефектів радіаційного походження відбувається розупорядкування періодичності кристалічної ґратки напівпровідника. Що, очевидно, змінює фонний спектр і зменшує ймовірність непрямих переходів в піці I.

Таким чином за фотопровідність з максимумом в $\hbar\omega \cong 0,9$ eV можуть бути відповідальними прямі переходи із валентної зони в зону провідності.

Нами зафіксовано, що при зберіганні нейтронно опромінених зразків їх опір, вимірюваний при азотній температурі, з часом зменшувався, тоді як при кімнатній температурі його зміни практично непомітні. Це пояснюється тим, що при $T = 300$ K, внаслідок іонізації глибоких донорів ($E_C - 0,16$ eV) зразок переходить у низькоомний стан, що маскує ефекти, зв'язані з мілкими донорами

при низьких температурах. Вивчення просторового розподілу мілких донорів, які утворюються при зберіганні нейтронно опромінених кристалів показало, що вони, в основному, концентруються в приповерхневому шарі зразка товщиною 60-80 мкм.

Зміна опору поверхневого шару при зберіганні опромінених зразків не залежить від атмосфери, в якій знаходився опромінений зразок. Таке явище можна пояснити дифузією радіаційних дефектів із об'єму нейтронно опроміненого зразка до поверхні.

З графіку залежності часу, за який опір свіжообробленої поверхні зменшувався в $e=2,7$ раз, від температури зберігання опромінених зразків, визначена енергія активації процесу, вона виявилася рівною $E=(0,36 \pm 0,03)\text{eV}$.

При ізохронному відпалі нейтронно опромінених зразків їх опір, виміряний при $T=77\text{K}$, повільно зменшується в широкій температурній області (до 100°C). Ми вважаємо, що на даній стадії відпалу відбувається розпад скупчень дефектів – кластерів, утворених нейтронною радіацією. В результаті цього гратка збагачується мілкими (іонізованими при $T=77\text{K}$) дефектами донорного типу, які зменшують опір кристалу при низьких температурах. Частина цих дефектів виходить з об'єму на поверхню кристалу (з енергією міграції $E=0,36\text{eV}$) створюючи низькоомний приповерхневий шар. Найбільш ймовірно вважати, що скупченнями дефектів, які утворюються при нейтронному опроміненні є скупчення міжвузлових атомів кадмію.

Починаючи з температури відпалу 80°C в нейтронно опромінених кристалах відбувається відпал глибоких донорів з $E_C=0,16\text{eV}$. При відпалі їх утворюються мілкі акцептори іонізовані при $T=77\text{K}$, що веде до зменшення опору кристалу і зміни типу його провідності. Після відпалу при 130°C опромінені кристали конвертували з n в p-тип провідності, як до опромінення. Відпалені при температурі 200°C нейтронно опромінені кристали за електричними і оптичними властивостями практично не відрізнялися від неопромінених зразків CdSb.

Відносно природи глибокого донора з $E_C=0,16\text{eV}$, який утворюється при опроміненні, ми вважаємо, що за такий донор може відповідати комплекс до складу якого входить вакансія кадмію (V_{Cd}) і неконтрольована домішка. При розпаді такого комплексу вивільнюється V_{Cd} , яка, як відомо, є мілким акцептором.

Відмітимо, що одночасно із відпалом центрів з $E_C=0,16\text{eV}$ зростає фоточутливість зразків при низьких температурах. Цей факт підтверджує раніше висловлену гіпотезу, що дані глибокі донори виконують роль швидких центрів рекомбінації.

Четвертий розділ присвячено висвітленню результатів впливу неоднорідного розподілу структурних дефектів на фотопровідність опромінених електронами монокристалів CdS і CdS:Cu, кінетики утворення центрів швидкої рекомбінації та їх природи і відпалу.

Характерною особливістю спектрального розподілу фотопровідності (СРФ) електронно опромінених дозою $\Phi > 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ($E = 1.2 \text{ MeV}$) монокристалів $\text{CdS}:\text{Cu}$ з концентрацією легуючої домішки $N_{\text{Cu}} = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ є домінування, при кімнатній температурі ($T = 300 \text{ K}$), домішкової фотопровідності ($\lambda = 0,62\text{-}0,7 \text{ мкм}$) над власною (рис. 4). Видно, що зниження температури веде до "виморожування" домішкових максимумів фотопровідності (криві 3 і 5). Велику домішкову фотопровідність можна пояснити зростанням фоточутливості кристалу при переході до збудження в домішковій області.

Дослідження оптичного гашення власної і домішкової фотопровідності (ОГФ) показало, що рекомбінаційний потік в обох випадках контролюється одними і тими ж повільними r -центрами рекомбінації.

При зона-зонному збудженні (власна фотопровідність) рекомбінаційні потоки дірок із валентної зони перерозподіляються між повільними і швидкими S -центрами рекомбінації. При значній концентрації S -центрів (N_{S}), які вводяться опроміненням, частка потоку через r -центри може бути невеликою, що зумовлює зниження фоточутливості таких зразків при зона-зонному збудженні

. Велику домішкову фоточутливість (при $T = 300 \text{ K}$) опромінених $\text{CdS}:\text{Cu}$ -монокристалів можна пояснити перелокалізацією значної концентрації дірок (обминаючи S -центри) з домішкових центрів (ДЦ), на яких вони утворились при фотозбудженні електронів, на r -центри, що збільшує їх рекомбінаційний потік через центри повільної рекомбінації і, відповідно, фоточутливість.

При кімнатній температурі дірки утворені на ДЦ термічно збуджуються у валентну зону і пере захоплюються, в основному, тільки на r -центри. Такий механізм може мати місце у випадку просторового розділення областей з підвищеною концентрацією ДЦ, r -центрів і областей в яких існують S -центри. Просторовий розподіл дефектів може відбуватися в деформаційних полях і полях просторового заряду великих структурних дефектів (дислокацій (Д) і кластерів дефектів (КД)). Леговані великою концентрацією міді монокристали сульфіду кадмію, порівняно з "чистими" зразками мають підвищену концентрацію дислокацій, мікропустот, включень другої фази (Cu_2S), що впливає при електронному опроміненні на збільшення швидкості введення дефектів в легованих зразках в порівнянні з "чистими". Точкові дефекти радіаційного походження, які відіграють роль центрів повільної рекомбінації, можуть бути достатньо рухливими в збудженій ґратці під час опромінення і, мігруючи по кристалу, утворюють підвищену концентрацію скупчень поблизу дислокацій чи інших великих структурних пошкоджень, які для них стають ефективними стоками. В цих же місцях може існувати підвищена концентрація ДЦ відповідальних за домішкову фотопровідність ($\lambda = 0,62\text{-}0,7 \text{ мкм}$), що зв'язані з атомами міді, для яких структурні пошкодження є хорошим стоком.

Для теоретичного опису рекомбінаційних процесів з участю ДЦ (концентрацією N) і g -центрів (концентрацією N_r), глибоко розміщених в забороненій зоні, використовуємо дворівневу модель.

Було показано, що при слабкому рівні збудження і великій концентрації N і N_r (що реалізується в нашому випадку), концентрація електронів у зоні провідності визначається:

$$n = \frac{(R + \sigma_{pr} p N_r) \omega_0}{(\sigma_e v_e \sigma_p N + \sigma_{pr} v_e \sigma_e N_r) p} e^{-\frac{E_v}{kT}}, \quad (4)$$

де R – темп фотозбудження електронів з ДЦ у C -зону;

σ_e , σ_p , σ_{pr} – перерізи захоплення електронів і дірок ДЦ і g -центрами відповідно;

p – концентрація дірок у V -зоні;

v_e – теплова швидкість електронів;

$\omega_0 e^{-\frac{E_v}{kT}}$ – ймовірність збудження дірки з ДЦ у V -зону.

Можна показати, що у випадку високих температур із формули (4) слідує:

$$n \sim e^{-\frac{E_v}{kT}}. \quad (5)$$

Проведені нами вимірювання температурної залежності фотопровідності в області 270–360К добре підтверджують висновок (5). При цьому експериментально визначене значення $E_v = 0,52 \pm 0,02 \text{ eV}$ (термічне), що задовільно узгоджується зі значенням $E_{v_0} = 0,68 \text{ eV}$ (оптичне), визначеним за різницею ширини забороненої зони і положенням максимуму домішкової фотопровідності.

При зниженні температури зменшується ймовірність збудження дірок з ДЦ у V -зону, що веде до зменшення їх рекомбінаційного потоку через центри повільної рекомбінації і, відповідно, до збільшення його через ДЦ, які внаслідок великого значення σ_e , можуть виконувати роль швидкого каналу рекомбінації. Крім того, насичення ДЦ дірками може привести до зменшення значення R , що тим більше веде до зменшення домішкової фоточутливості при зниженні температури зразка. Слід відмітити, що при опроміненні CdS:Cu вводяться різні центри прилипання носіїв заряду, які необхідно враховувати для опису процесів рекомбінації. Це ускладнює розглянуту вище дворівневу модель. Однак, при високих температурах більшість центрів прилипання іонізовано і практично не впливає на заповнення центрів рекомбінації при зміні температури, що виправдовує в нашому випадку використання дворівневої моделі в цих умовах.

Квантовий вихід люмінесценції в напівпровідникових кристалах і їх фотопровідність визначається не тільки параметрами і концентрацією центрів випромінювальної рекомбінації, але і центрами швидкої або, як їх називають безвипромінювальної рекомбінації (S -центри). Дуже часто

домінуючу роль при утворенні рекомбінаційних центрів в напівпровідниках відіграють дефекти структури.

Концентрацію структурних дефектів в досліджуваних кристалах варіювали, опромінюючи їх при кімнатній температурі електронами з енергією $E \approx 1,2 \text{ MeV}$.

На рис. 5 приведені температурні залежності власної фоточутливості (яка відповідає максимуму фотопровідності $\lambda_m \approx 510 \text{ nm}$) неопромінених і опромінених електронами монокристалів CdS.

Як видно, в неопромінених, і, опромінених кристалах при $T > 210 \text{ K}$ спостерігається температурне гашення фоточутливості (ТГФ). Аналіз залежності положення початку ТГФ від інтенсивності фотозбудження, проведений нами в неопромінених CdS, показав, що рекомбінаційний потік в досліджуваних зразках контролюється центрами повільної рекомбінації (г-центрами) з $E_v + 0,71 \text{ eV}$. Такими центрами є центри червоної люмінесценції з $\lambda_m = 720 \text{ nm}$, яка найбільш інтенсивна в неопромінених зразках. Додатковим підтвердженням даного висновку є температурне гашення червоної люмінесценції, яке одночасно відбувається з гашенням фоточутливості.

Після опромінення фоточутливість зразків зменшується, хоча ТГФ, зв'язане з г-центрами зберігається (криві 2 і 3). Це свідчить, що частина рекомбінаційного потоку в опромінених кристалах проходить через центри червоної люмінесценції, але зі збільшенням дози опромінення доля цього потоку зменшується (із-за зростання концентрації S-центрів).

Особливістю опромінених кристалів є поява в області $T > 105 \text{ K}$ додаткового гашення фоточутливості (криві 2 і 3), що супроводжується гашенням зеленої люмінесценції, $\lambda_m \approx 514 \text{ nm}$ (яка в опромінених зразках стає домінуючою). Показано, що інтенсивність 3-люмінесценції в досліджуваних кристалах при порівняно невеликих дозах опромінення ($\Phi < 10^{17} \text{ cm}^{-2}$) пропорційна концентрації центрів цієї люмінесценції.

$$I_3 = AN_3, \quad (6)$$

$$\text{де} \quad A = \frac{\beta_3 L C_{p3}}{\sum_j C_{pj} N_j} \approx \text{const}. \quad (7)$$

β_3 – ймовірність випромінювального захоплення електрона на 3-центр,

L – темп генерації електронно-діркових пар,

C_{pj} – коефіцієнт захоплення дірок на всі існуючі в кристалі центри рекомбінації (крім центрів 3-люмінесценції і S-центрів);

C_{p3} – коефіцієнт захоплення дірок на 3-центри;

N_j – концентрація центрів рекомбінації.

Найбільша швидкість введення центрів зеленої люмінесценції (при $\Phi < 10^{17} \text{ см}^{-2}$), однакове її значення в чистих і легованих зразках (рис. 6) свідчить про те, що цими центрами 3-люмінесценції в CdS є первинні точкові дефекти в підгратці сірки, а саме, міжвузлові атоми сірки (S_i) або розподілені ДА-пари (V_S-S_i). Із збільшенням дози опромінення, внаслідок зростання концентрації центрів 3-люмінесценції (N_3) та S-центрів (N_S), зменшуватиметься швидкість зростання інтенсивності зеленої люмінесценції з дозою опромінення при Φ близьких до 10^{17} см^{-2} .

Як видно з рис. 6, при збільшенні дози опромінення ($\Phi > 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ для CdS, крива 1 і $\Phi > 10^{17} \text{ см}^{-2}$ для CdS:Cu, крива 2) відбувається швидке зменшення інтенсивності 3-люмінесценції. При цьому зменшується фоточутливість зразка і інтенсивність всіх інших смуг люмінесценції, що зв'язано із збільшенням концентрації S-центрів і перерозподілом частини рекомбінаційного потоку на швидкий канал. При великих дозах опромінення (близьких або більших 10^{18} см^{-2}) домінуючими дефектами в CdS монокристалах будуть дефекти в кадмієвій підгратці, які відіграють роль швидких центрів рекомбінації. В легованих зразках CdS:Cu, внаслідок більшої швидкості введення структурних пошкоджень в кадмієвій підгратці, така ситуація настає при дозах на порядок менших (10^{17} см^{-2}), ніж в чистих кристалах. Цим пояснюється більш інтенсивне гашення зеленої люмінесценції, яке починається при значно менших дозах в CdS:Cu порівняно з чистими кристалами (рис. 6).

Різна швидкість введення пар Френкеля в обох підгратках монокристала CdS зумовлена різними значеннями перерізів зміщення швидкими електронами атомів кадмію і сірки з вузлів ґратки.

Внаслідок більшої швидкості введення пар Френкеля в кадмієвій підгратці, дефекти даного типу стають домінуючими при великих дозах опромінення. Вони фіксують положення рівня Фермі в забороненій зоні і виконують роль швидкого каналу безвипромінювальної рекомбінації електронно-діркових пар при фотозбудженні опромінених зразків.

Найбільш ймовірно, що роль S-центрів в електронно опромінених CdS-монокристалах грають зв'язані пари Френкеля (ПФ) в підгратці кадмію $(V_{Cd}^- - Cd_i^{2+})^+$. При опроміненні, крім зв'язаних ПФ утворюються розділені пари з великими відстанями між компонентами V_{Cd}^- і Cd_i^{2+} . Міжвузлові атоми кадмію (Cd_i), які вважаються рухливими при кімнатній температурі зв'язуються з вакансіями кадмію (V_{Cd}), утворюючи зв'язані ПФ.

На рис. 7 приведено ізохронний відпал темнового струму (крива 1), фоточутливості (крива 3) і холлівської рухливості електронів (крива 5) в електронно опромінених кристалах CdS. Для

більш точної ідентифікації стадій відпалу, разом з опроміненими кристалами відпалювалися і неопромінені зразки.

Відпал неопромінених зразків CdS до температур 250°C (рис.4.7, криві 2 і 4) практично не впливав на фоточутливість і темнову провідність цих кристалів. Значні зміни параметрів опромінених зразків з їх відпалом свідчать про заліковування структурних пошкоджень наведених електронною радіацією. Як видно з рис. 7, незначна стадія відпалу дефектів існує і при температурах $t \approx 60^{\circ}\text{C}$, але в основному дефекти інтенсивно відпалюються при $t \approx 80^{\circ}\text{C}$. Поряд із зменшенням темнового струму при відпалі (крива 1), зростає фоточутливість зразків (крива 3). Це можна пояснити, якщо вважати, що зв'язані ПФ в кадмієвій підгратці є центрами швидкої рекомбінації.

Дослідження температурної залежності темної провідності і спектрів ТСП в опромінених і відпалених зразках показало, що основними дефектами, які відпалюються до $t \approx 250^{\circ}\text{C}$ є центри з енергією іонізації електронів $E_C - 0,8 \text{ eV}$. За ці центри відповідальні ПФ в кадмієвій підгратці. Відпал дефектів веде до зменшення розсіювання вільних електронів і, відповідно, до зростання їх рухливості (крива 5). Велика ширина стадії відпалу дефектів ($60-200^{\circ}\text{C}$) може бути зв'язана з різним типом ПФ, які відрізняються відстанню між компонентами пари. Найбільш тісно зв'язані пари (з малою відстанню між $V_{\text{Cd}}^{\text{ef}}$ і Cd_i^{2+}) відпалюються при нижчих температурах, пари з більш віддаленими компонентами - при вищих температурах.

При вимірюванні температурної залежності темної провідності опромінених зразків нахил кривої зростав (з підвищенням температури) від значення $\sim 0.6 \text{ eV}$ до значення (яке наступало при $T \approx 300\text{K}$) $0,8 \text{ eV}$, що додатково свідчить про існування ПФ з різною енергією іонізації. Найбільш тісно зв'язаним парам відповідає $E_a = E_C - 0,8 \text{ eV}$, які починають інтенсивно відпалюватись на початку стадії відпалу і при цьому спостерігається незначне зростання рухливості електронів при значному зростанні фоточутливості (крива 3). Це підтверджує висновок про відпал (на початку стадії) близьких ПФ, які, очевидно, створюють найбільш ефективний канал швидкої рекомбінації. Як слідує з рис. 7, основні точкові радіаційні дефекти, наведені електронною радіацією, відпалюються до $t \approx 200^{\circ}\text{C}$.

Таким чином, ПФ в кадмієвій підгратці (відповідальні за граничне положення E_F і швидкий канал рекомбінації) відпалюються в температурному інтервалі $\sim 60-200^{\circ}\text{C}$. Велика ширина інтервалу відпалу зумовлена різним типом ПФ, які відрізняються між собою відстанями між складовими компонентами пар. На початку стадії відпалу "анігілюють" ПФ з найбільш близьким розміщенням компонент, ці ж пари є найбільш ефективним швидким каналом безвипромінювальної рекомбінації.

Основні висновки роботи.

1. Вперше комплексно досліджено вплив опромінення великими дозами γ -квантів ^{60}Co (10^{19}см^{-2}) і швидких нейтронів ($E=2\text{ Мев}$ і $\Phi=2\cdot 10^{18}\text{н/см}^2$) на електричні, оптичні і фотоелектричні властивості спеціально нелегованих монокристалів CdSb . Показано, що швидкість введення радіаційних дефектів при нейтронному опроміненні вища ніж при γ -опроміненні і основними радіаційними дефектами, які вводяться при нейтронному опроміненні є глибокі донори з $E=E_C-0.16\text{ eV}$, що грають роль швидких центрів рекомбінації.

2. Встановлено вплив структурних дефектів в нейтронно опромінених кристалах CdSb на стан поверхні зразка. Запропонована модель, згідно якої при зберіганні опроміненого кристала розпадаються скупчення міжвузлових атомів кадмію, утворенні нейтронною радіацією. Експериментально визначені енергія міграції Cd_i ($E=(0.36\pm 0.03)\text{eV}$), значення коефіцієнтів дифузії цих атомів до поверхні кристалу при різних температурах.

3. Досліджено відпал радіаційних дефектів в нейтронно опромінених монокристалах CdSb і виявлено, що мілкі дефекти, відповідальні за провідність при $T=77\text{K}$ відпалюються в широкій температурній області до $\sim 130^\circ\text{C}$. Центри з $E_C-0.16\text{eV}$ починають відпалюватись при температурі 80°C . На стадії відпалу $100-130^\circ\text{C}$ відбувається інверсія типу провідності ($n\rightarrow p$). Зроблено припущення, що за глибокі донори відповідальні комплекси до складу яких входять вакансії кадмію і неконтрольовані домішки.

4. На основі запропонованої двохрівневої моделі центрів рекомбінації пояснено особливості домішкової фотопровідності в опромінених монокристалах CdS з неоднорідним розподілом структурних дефектів і визначено термічну енергію іонізації дірок з домішкових дефектних станів у валентну зону $E_V+(0.52\pm 0.02)\text{eV}$.

5. Показано, що при електронному опроміненні CdS - монокристалів швидкість введення первинних дефектів різна в обох його підгратках. Внаслідок більшої швидкості введення пар Френкеля в кадмієвій підгратці, дефекти даного типу стають домінуючими при великих дозах опромінення. Вони фіксують положення рівня Фермі в забороненій зоні і відіграють роль швидкого каналу безвипромінювальної рекомбінації електронно-діркових пар при фотозбудженні опромінених зразків.

6. Встановлено основні високо температурні стадії відпалу точкових дефектів в електронно опромінених монокристалах CdS . Великий температурний інтервал ($60-200^\circ\text{C}$) відпалу пар Френкеля в кадмієвій підгратці зумовлений різними відстанями між компонентами в них. На початковій стадії відпалу "анігілюють" ПФ з найбільш близьким розміщенням компонент.

Список основних друкованих праць за темою дисертації:

1. Федосов С.А., Давидюк Г.Е., Божко В.В., Раренко А.И., Доскоч В.П., Богданюк Н.С.. Влияние радиационных дефектов на некоторые электрические и оптические свойства монокристаллов антимонида кадмия // Неорганические материалы. - 1996. - Т.32, №11. - С. 1333-1337.
2. Давидюк Г.Е., Божко В.В., Мак В.Т., Федосов С.А. Особенности фотопроводимости облученных быстрыми электронами с $E=1,2$ МэВ монокристаллов сульфида кадмия, легированных медью // Фотоэлектроника. - 1998. - №7. - С. 29-33.
3. Божко В.В, Галян В.В., Федосов С.А., Троцюк В.М. Фотопровідність опромінених електронами монокристалів сульфід кадмію, легованих міддю // Науковий вісник ВДУ. Серія фізичних, хімічних, математичних наук, інформатика. - Луцьк: Волин. держ. ун-т ім. Лесі Українки. - 1997. - №4. - С. 8-13.
4. Давидюк Г.Є., Богданюк М.С., Шаварова Г.П., Федосов С.А., Войтович В.А. Утворення швидких центрів рекомбінації при електронному опроміненні спеціально нелегованих і легованих міддю монокристалів сульфід кадмію // Науковий вісник ВДУ. Серія фізичних, хімічних, математичних наук, інформатика. - Луцьк: Волин. держ. ун-т ім. Лесі Українки. - 1998. - №5. - С. 22-27.
5. Давидюк Г.Є., Доскоч В.П., Божко В.В., Шаварова Г.П., Федосов С.А., Войтович В.А. Природа і відпал центрів швидкої рекомбінації в опромінених електронами з $E=1,2$ МеВ монокристалах сульфід кадмію // Науковий вісник ВДУ. Серія фізичних, хімічних, математичних наук, інформатика. - Луцьк: Волин. держ. ун-т ім. Лесі Українки. - 1998. - №5. - С. 27-32.
6. Федосов С.А., Божко В.В., Доскоч В.П., Давидюк Г.Є., Богданюк М.С. Вплив радіаційних дефектів на деякі електричні і оптичні властивості монокристалів антимоніду кадмію // The First International Conference on Material Science of Chalkogenide and Diamond – Structure Semiconductors, Abstract Booklet. - V.II. Chernivtsi (Ukraine). - 1994. - P.132 .
7. Федосов С.А., Доскоч В.П., Федосов А.В. Вплив пружної деформації на фоточутливість □- опроміненого n-Ge // Proc. IV-th NEXUSPAN Workshop on Sensors for Control of Irradiation. – Odessa (Ukraine). – 1997. – P. 22-23.
8. Давидюк Г.Є., Божко В.В., Федосов С.А., Богданюк М.С., Доскоч В.П., Савош В.О. Вплив радіаційних дефектів на електричні властивості CdSb - монокристалів // Матер. XL наук. конф. проф.-виклад. складу і студентів ун-ту. Серія фізична. - Луцьк: Волин. держ. ун-т. - 1994. - С.13.
9. Доскоч В.П., Богданюк М.С., Божко В.В., Федосов С.А., Давидюк Г.Є. Температурно - електрична нестійкість в монокристалах CdSb, опромінених швидкими нейтронами // Наукові нотатки. Сер. фіз. - мат. наук. – Луцьк: Луцький індустріальний ін-т. – 1994. – Вип.2. – С. 91-92.

10. Доскоч В.П., Богданюк М.С., Божко В.В., Давидюк Г.Є., Федосов С.А. Вольтамперні характеристики антимоніду кадмію, опромінених швидкими нейтронами // Матер. XL наук. конф. проф.-виклад. складу і студентів ун-ту. Серія фізична. - Луцьк: Волин. держ. ун-т. - 1994. - С.15.

11. Божко В.В., Федосов С.А., Богданюк М.С., Доскоч В.П., Давидюк Г.Є. Вплив γ - і нейтронної радіації на оптичні властивості монокристалів CdSb // Матер. XL наук. конф. проф.-виклад. складу і студентів ун-ту. - Серія фізична. - Луцьк: Волин. держ. ун-т. - 1994. - С.12.

12. Божко В.В., Федосов С.А., Доскоч В.П., Давидюк Г.Є., Богданюк М.С. Фотоелектричні властивості CdSb - монокристалів опромінених γ -квантами ^{60}Co і швидкими реакторними нейтронами // Матер. XL наук. конф. проф.-виклад. складу ун-ту. Серія фізична. - Луцьк: Волин. держ. ун-т. - 1994. - С.14.

13. Доскоч В.П., Назарчук П.Ф., Божко В.В., Давидюк Г.Є., Богданюк М.С., Федосов С.А. Вплив поверхні на електричні властивості монокристалів CdSb, опромінених нейтронами // Матер. XLI наук. конф. проф.-виклад. складу і студентів ун-ту. Серія фізична. - Луцьк: Волин. держ. ун-т. - 1995. - С.10.

Федосов С.А. Вплив структурних дефектів радіаційного походження на фотоелектричні властивості антимоніду і сульфід кадмію. – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків. – Волинський державний університет ім. Лесі Українки, Луцьк, 1999.

Дисертація присвячена комплексному дослідженню впливу опромінення великими дозами γ квантів і швидких нейтронів на електричні, оптичні і фотоелектричні властивості спеціально нелегованих монокристалів CdSb. Встановлено вплив структурних дефектів в нейтронно опромінених кристалах CdSb на стан поверхні зразків і досліджено відпал радіаційних дефектів в них. Виявлено, що дефекти відповідальні за провідність при $T=77\text{K}$ відпалюються в широкій температурній області (до 130°C), а центри з рівнем $E_{\text{C}}=0,16\text{ eV}$ починають відпалюватися при $t=80^{\circ}\text{C}$.

На основі запропонованої моделі пояснено особливості домішкової фотопровідності в монокристалах CdS з неоднорідним розподілом структурних дефектів. Показано, що при електронному опроміненні CdS – монокристалів швидкість введення первинних дефектів різна в обох його

підґратках і експериментально встановлено основні високо температурні стадії відпалу цих дефектів.

Fedosov S.A. Вплив структурних дефектів радіаційного походження на фотоелектричні властивості антимоніду і сульфїду кадмію. – Manuscript.

Thesis for the Candidate of science degree by speciality 01.04.10 – physics of the semiconductors and dielectrics. – Lesya Ukrainka Volyn State University, Lutsk, 1999.

Дисертація присвячена комплексному дослідженню впливу опромінення великими дозами γ -квантів і швидких нейтронів на електричні, оптичні і фотоелектричні властивості спеціально нелегованих монокристалів CdSb. Встановлено вплив структурних дефектів в нейтронно опроміненних кристалах CdSb на стан поверхні зразків і досліджено відпал радіаційних дефектів в них. Виявлено, що дефекти відповідальні за провідність при $T=77\text{K}$ відпалюються в широкій температурній області (до 130°C), а центри з рівнем $E_{\text{C}}-0,16\text{ eV}$ починають відпалюватися при $t=80^{\circ}\text{C}$.

На основі запропонованої моделі пояснено особливості домішкової фотопровідності в монокристалах CdS з неоднорідним розподілом структурних дефектів. Показано, що при електронному опроміненні CdS – монокристалів швидкість введення первинних дефектів різна в обох його підґратках і експериментально встановлено основні високо температурні стадії відпалу цих дефектів.

Федосов С.А. Влияние структурных дефектов радиационного происхождения на фотоэлектрические свойства антимонида и сульфида кадмия. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников и диэлектриков. – Волынский государственный университет им. Леси Украинки, Луцк, 1999.

Впервые комплексно исследовалось влияние излучения большими дозами γ -квантів ^{60}Co (10^{19}cm^{-2}) и быстрых нейтронов ($E=2\text{ Мэв}$ і $\Phi=2\cdot 10^{18}\text{н/см}^2$) на электрические, оптические і фотоэлектрические свойства специально нелегированных монокристаллов CdSb. Показано, что скорость введения радиационных дефектов при нейтронном облучении выше чем при γ -облучении и основными радиационными дефектами, которые вводятся при нейтронном облучении есть глубокие доноры с $E=E_{\text{C}}-0.16\text{ эВ}$, что играют роль быстрых центров рекомбинации.

Установлено влияние структурных дефектов в нейтронно облученных кристаллах CdSb на стан поверхность кристалла. Предложена модель, исходя с которой при хранении облученного кристалла распадаются скопления междоузельных атомов кадмия, образованные нейтронной ра-

диацией. Экспериментально определены энергия миграции Cd_i ($E=(0.36\pm0.03)\text{эВ}$), значения коэффициентов диффузии этих атомов к поверхности кристалла при разных температурах.

Исследовано отжиг радиационных дефектов в нейтронно облученных монокристаллах $CdSb$ и обнаружено, что мелкие дефекты, ответственные за проводимость при $T=77\text{К}$ отжигаются в широкой температурной области до $\sim 130^\circ\text{С}$. Центры с $E_C=0,16\text{эВ}$ начинают отжигаться при температуре 80°С . На стадии отжига $100-130^\circ\text{С}$ происходит инверсия типа проводимости ($n\rightarrow p$). Сделано предположение, что за глубокие доноры ответственны комплексы, в состав которых входят вакансии кадмия и неконтролируемые примеси.

На основании предложенной двухуровневой модели центров рекомбинации объяснено особенности примесной фотопроводимости в облученных монокристаллах CdS с неоднородным распределением структурных дефектов и определена термическая энергия ионизации дырок с примесных дефектных состояний в валентную зону $E_V+(0,52\pm0,02)\text{эВ}$.

Показано, что при электронном облучении CdS - монокристаллов скорость введения первичных дефектов разная в обеих его подрешетках. Вследствии большей скорости введения пар Френкеля в кадмиевую подрешетку, дефекты данного типа становятся доминирующими при больших дозах облучения. Они фиксируют положение уровня Ферми в запрещенной зоне и отыгрывают роль быстрого канала безизлучательной рекомбинации электронно-дырочных пар при фотовозбуждении облученных кристаллов.

Установлено основные высоко температурные стадии отжига точечных дефектов в электронно облученных монокристаллах CdS . Большой температурный интервал ($60-200^\circ\text{С}$) отжига пар Френкеля в кадмиевой подрешетке обусловленный разными расстояниями между компонентами в них. На начальной стадии отжига "анигилируют" ПФ с наиболее близким размещением компонент.