

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВОЛИНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ЛЕСІ УКРАЇНКИ

Мирончук Галина Леонідівна

УДК 621.315.592

**Дефектоутворення в монокристалах CdS і CdS:Cu
при опроміненні частинками підпорогової енергії**

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

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі фізики твердого тіла Волинського національного університету імені Лесі Українки Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Давидюк Георгій Євlampійович,
Волинський національний університет імені Лесі Українки,
завідувач кафедри фізики твердого тіла

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Тартачник Володимир Петрович,
Інститут ядерних досліджень НАН України
провідний науковий співробітник

доктор фізико-математичних наук, професор
Головацький Володимир Анатолійович,
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича
професор кафедри теоретичної фізики

Захист відбудеться „16” січня 2009 року о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 32.051.01 при Волинському національному університеті імені Лесі Українки за адресою: 43025, м. Луцьк, вул. Потапова, 9, ауд. № 101.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Волинського національного університету імені Лесі Українки за адресою: 43025, м. Луцьк, вул. Винниченка, 30.

Автореферат розісланий „8” грудня 2008 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради

Божко В.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток ядерної енергетики та космічних технологій, широке використання оптоелектронних систем передачі інформації, потужних джерел електромагнітного випромінювання робить актуальним дослідження впливу електромагнітних квантів на дефектну структуру матеріалів, які експлуатуються в інтенсивних полях електромагнітного випромінювання.

У науковій літературі є багато інформації щодо впливу частинок із надпороговою енергією на утворення дефектів і перебудову дефектних комплексів у напівпровідниках групи $A^{II}B^{VI}$. Дослідженню ж впливу опромінення частинками з підпороговою енергією на процеси дефектоутворення в бінарних халькогенідних напівпровідниках присвячено невелику кількість робіт, в основному, зв'язаних з лазерним опроміненням. Тому в представленій роботі наводяться результати дослідження природи, механізмів утворення дефектів, а також перебудови дефектних комплексів під дією радіації, зумовленої частинками з підпороговою енергією (електронами, квантами рентгенівських і лазерних променів).

В силу ряду своїх особливостей, зокрема, добре розробленій технології одержання, зручності вимірювання багатьох параметрів монокристали CdS часто вибирають, як модельний матеріал при дослідженні фізичних властивостей інших напівпровідникових бінарних халькогенідних матеріалів.

До складу багатьох оптично-активних центрів напівпровідникових сполук входить мідь, вона часто присутня в халькогенідних напівпровідниках як неконтрольована домішка, тому в цій роботі досліджувались як нелеговані монокристали сульфід кадмію, так і монокристали сульфід кадмію, леговані міддю, концентрація якої, згідно з паспортними даними, становила 10^{18} см^{-3} .

Дослідження особливостей дефектоутворення в монокристалах CdS через залежність від їх вихідного дефектного стану є важливим для визначення умов збільшення радіаційної стійкості матеріалів, які функціонують в полях підвищеної радіації.

Практичне використання CdS обмежується наявністю в цих кристалах після опромінення метастабільних дефектів, еволюція яких призводить до часової зміни властивостей виготовлених на їх основі приладів. Тому поряд з утворенням і перебудовою дефектних комплексів досліджувались деградаційні процеси, які відбуваються в напівпровідниках після опромінення.

Тематика дисертації відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки в Україні і орієнтована на розробку фоточутливих радіаційностійких матеріалів електронної і оптоелектронної техніки з параметрами, які можна корегувати методами радіаційної технології.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Представлені в роботі дослідження виконувались відповідно до наукових планів роботи лабораторії фізики і хімії твердого тіла Волинського національного університету імені Лесі Українки, а також відповідно до планів держбюджетної теми "Вплив дефектів радіаційного походження на параметри фотоактивних центрів у бінарних халькогенідних напівпровідниках" (номер державної реєстрації: 0107U000738) та спільної Українсько – Литовської науково-дослідної роботи

“Природа дефектів радіаційного походження і їх вплив на електричні, оптичні і фотоелектричні властивості бінарних халькогенідних напівпровідників групи $A^{II}B^{VI}$ ” (договір № М/216-2007). Автор дисертаційної роботи брав участь у всіх вищевказаних роботах як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи було встановити механізми підпорогового дефектоутворення в нелегованих і легованих міддю монокристалах сульфіду кадмію в залежності від природи бомбардуючих частинок (електронів, квантів рентгенівських і лазерних променів) і вихідного дефектного стану зразків, з'ясувати роль іонізаційних процесів в утворенні і перебудові дефектних комплексів, та дослідити релаксаційні процеси в опромінених монокристалах.

Для реалізації поставленої мети в роботі проводилися:

1. Дослідження впливу опромінення електронами з підпороговою $E=230\text{keV}$ і надпороговою енергіями $E=1,2\text{MeV}$ та 10MeV на електричні, фотоелектричні властивості нелегованих і легованих Cu монокристалів CdS .
2. Дослідження спектрів фотолюмінесценції, фотопровідності, оптичного гашення фотопровідності і темної електропровідності в опромінених рентгенівськими квантами (з енергією $E=8,06\text{keV}$ і $17,5\text{keV}$) нелегованих і легованих Cu монокристалах CdS .
3. Дослідження особливостей впливу термодфектів утворених загартуванням зразків і ізохронного відпалу опромінених кристалів на електричні і фотоелектричні властивості нелегованих і легованих Cu монокристалів CdS .
4. Вивчення впливу опромінення імпульсами рубінового лазера на спектральний розподіл фотопровідності, оптичного гашення фотопровідності і темнову електропровідність монокристалів CdS і CdS:Cu .
5. Аналіз енергетичної залежності коефіцієнта поглинання світла на краю смуги власного поглинання і спектрів екситонної люмінесценції в монокристалах CdS і CdS:Cu опромінених високоіонізуючими зарядженими частинками: електронами (з $E=1,2\text{MeV}$ і $\Phi=10^{17}\text{ел./см}^2$), протонами (з $E=46\text{MeV}$ і $\Phi=1,6\cdot 10^{15}\text{пр./см}^2$), а також нейтральними частинками – нейтронами (з $E=2\text{MeV}$ і $\Phi=10^{18}\text{н./см}^2$).
6. Дослідження впливу вихідного дефектного стану зразків CdS на особливості дефектоутворення під впливом високоіонізуючого випромінювання і дії квантів рентгенівських променів.
7. Дослідження часових залежностей електричних і фотоелектричних параметрів електронно опромінених нелегованих і легованих Cu монокристалів CdS .

Об'єктом дослідження є вирощені методом зонної сублімації в атмосфері інертного газу під тиском 180атм. монокристали CdS і леговані в процесі росту монокристали CdS:Cu ($N_{\text{Cu}}=10^{18}\text{см}^{-3}$).

Предмет дослідження. Електричні, оптичні і фотоелектричні параметри та кінетика їх зміни в монокристалах CdS , CdS:Cu , опромінених квантами

рентгенівських променів і рубінового лазера та опромінених високоіонізуючими кристалічну ґратку легкими і важкими зарядженими частинками (електронами і протонами).

Методи дослідження. При виконанні роботи використовувалися стандартні, добре апробовані методи вимірювання електричних, оптичних і фотоелектричних параметрів напівпровідників, основна частина яких базувалась на сучасних багатофункціональних приладах із використанням комп'ютерних програм обробки результатів експерименту та оцінки похибки вимірювання.

Наукова новизна одержаних результатів визначається сукупністю результатів, сформульованих у висновках до дисертації. Основні з них наводяться нижче:

1. Вперше показано, що при опроміненні рентгенівськими променями монокристалів сульфід кадмію має місце підпорогове дефектоутворення центрів повільної рекомбінації (V_{Cd} або Cu_{Cd}) в «слабких місцях» із спотвореними і напруженими міжатомними зв'язками, які локалізуються біля великих структурних дефектів кристалічної ґратки (дислокацій, скупчень дефектів тощо).
2. Суттєвий вплив на збільшення швидкості введення радіаційних дефектів у монокристалах сульфід кадмію при підпороговому дефектоутворенні спричиняють легуючі атоми Cu, які, взаємодіючи з вакансіями кадмію, утворюють центри повільної рекомбінації (Cu_{Cd}), а також відповідальні за більшу концентрацію великих структурних пошкоджень вихідних зразків.
3. Фоточутливість нелегованих монокристалів CdS у широкому спектральному діапазоні $\sim 0,5\text{-}1,0$ мкм зменшується при рентгенівському опроміненні тоді, коли в легованих зразках при тих самих дозах рентгенівських квантів вона зростає за рахунок утворених дефектних комплексів з участю Cu в області $\sim 0,55\text{--}0,7$ мкм і зменшується в ближній інфрачервоній області $\sim 0,85\text{-}1,0$ мкм внаслідок розпаду преципітатів атомів Cd.
4. Опромінення монокристалів CdS:Cu зарядженими високоіонізуючими частинками (електронами, протонами) веде до утворення поряд з дефектами ударної природи дефектів, утворених підпороговим домішковим іонізаційним механізмом.
5. На основі теоретичного обґрунтування моделі лазерного дефектоутворення було показано, що під дією наносекундних імпульсів рубінового лазера з густиною потужності $\sim 7 \cdot 10^7 \text{ Вт/см}^2$ в монокристалах CdS утворюється приповерхневий низькоомний шар ($\sim 0,5\text{-}1,0$ мкм), зумовлений власними точковими дефектами донорної природи. Встановлена кінетика його зміни з часом. Дослідження лазерного відпалу опромінених електронами (з $E=1,2$ MeV) і нейтронами (з $E \approx 2$ MeV) зразків засвідчує про вихід на поверхню і випаровування міжвузлових атомів сірки, утворених радіацією, а також суттєву роль теплових ефектів у відпалі центрів повільної рекомбінації, створених точковими дефектами в кадмієвій підґратці CdS і CdS:Cu.

6. Встановлено, що швидкість введення радіаційних дефектів у кадмієвій підгратці (V_{Cd} і Cd_i) при опроміненні монокристалів CdS високоіонізуючими частинками (електронами з $E=1,2$ MeV) зростає із збільшенням концентрації великих структурних пошкоджень (кластерів дефектів) у вихідних зразках. На основі розрахунків, зроблених з використанням комп'ютерної програми (CASINO V2.42 - A. Canada, 2002), показано, що за введення радіаційних дефектів відповідальні, крім ударних механізмів, механізми підпорогового дефектоутворення, зв'язані із збудженням K - електронної оболонки атомів кадмію. Пропонується модель домішково-іонізаційного механізму підпорогового дефектоутворення, в основу якої покладено іонізацію внутрішніх оболонок атомів Cd і наявності близько розміщених структурних дефектів.
7. На основі експериментальних даних і відповідних теоретичних розрахунків вперше показано, що відповідальними за деградацію фоточутливості електронно опромінених монокристалів CdS:Cu є утворення комплексів, що складаються з двох міжвузлових атомів кадмію (двохатомні преципітати Cd_i). Визначена енергія активації міграції Cd_i при $T=292$ K ($U=2\pm0,06$ eV).

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечена застосуванням добре апробованих стандартних методик вимірювання параметрів напівпровідників і характером комплексних досліджень, а також застосуванням сучасних оптичних приладів з використанням комп'ютерних програм обробки результатів вимірювань і похибок одержаних величин. Результати наших робіт не суперечать загальним науковим принципам в галузі напівпровідникової науки, що стосується напрямку наших досліджень. Достовірність результатів підтверджується позитивними рецензіями на опубліковані статті і доповіді, які представлялись на різних конференціях.

Практичне значення отриманих результатів

1. Встановлено, що більш радіаційно стійкими за своїми оптичними властивостями стосовно рентгенівського опромінення є нелеговані, малодфектні монокристали CdS, що відкриває перспективу їх використання як базових матеріалів, стійких до рентгенівської радіації електронних і оптоелектронних приладів, датчиків і дозиметрів рентгенівського випромінювання.
2. Встановлення механізму деградації власної фоточутливості електронно опромінених монокристалів CdS:Cu відкриває можливість прогнозувати залежність фотоелектричних параметрів приладів, виготовлених на основі CdS:Cu від часу їх експлуатації.
3. Виявлення ефекту збільшення фоточутливості монокристалів CdS:Cu у видимій області спектрального розподілу фотопровідності при їх опроміненні рентгенівськими квантами відкриває можливість розробки технології відновлення фотоелектричних параметрів, деградованих в процесі тривалої експлуатації напівпровідникових фотодатчиків, що виготовлені на базі кристалів CdS:Cu.
4. Обґрунтовані в роботі механізми підпорогового дефектоутворення і фізичні моделі процесів їх реалізації можуть бути використані технологіями для

одержання рентгено- і променевостійких матеріалів електронної техніки, яка функціонує на базі бінарних халькогенідних напівпровідників групи $A^{II}B^{VI}$.

5. Ряд одержаних у роботі результатів можуть бути введені в програму університетських спецкурсів з радіаційної фізики твердого тіла.

Особистий внесок здобувача. Мета та цілі дисертаційного дослідження визначались автором спільно з науковим керівником. Експериментальні результати, представлені в роботі, отримані автором особисто або за його безпосередньою участю. Зокрема, авторові належить монтаж установки рентгенівського опромінення зразків, підготовка і опромінення зразків.

Автором проведено вимірювання спектрів фотопровідності, оптичного гашення фотопровідності, опромінених електронами, квантами рентгенівських і лазерних променів зразків CdS і $CdS:Cu$; дослідження відпалу опромінених кристалів, кінетики деградації зразків; вимірювання фотолюмінесценції опромінених рентгенівськими променями кристалів CdS і $CdS:Cu$.

Спільно із співавторами В. В. Божком, Л. В. Булатецькою, А. Г. Кевшином досліджувались спектри фотолюмінесценції і поглинання електронно опромінених зразків. М. С. Богданюку належить вимірювання спектрів поглинання електронно і протонно опромінених зразків при низьких температурах. В. З. Панкевичу і Н. А. Головіній належить обробка і нанесення омичних контактів на деякі зразки, вимірювання температурних залежностей питомої електропровідності $CdS:Cu$.

Авторові належить ідея і теоретичне обґрунтування моделі виникнення структурних пошкоджень при лазерному опроміненні кристалів CdS . П. П. Трохимчуку - консультації щодо виникнення кінетично-динамічних ланцюжків релаксаційної оптики. Авторові разом з Г. Є. Давидюком належить розробка і фізичне обґрунтування моделі деградації фоточутливості опромінених кристалів $CdS:Cu$. В. Кажукаускасу (Вільнюський університет, Литва) - консультації щодо кінетики деяких деградаційних процесів в напівпровідниках. М. Ю. Барабаненкову (Інститут проблем технології мікроелектроніки і особливо чистих матеріалів РАН) - консультації щодо використання комп'ютерних програм з моделювання процесів дефектоутворення в напівпровідниках. Магістрантам М. Пушкарчук і Ю. Цьось - загальна допомога в проведенні експериментальних досліджень.

Автору роботи у всіх спільних дослідженнях належить домінуюча частина експериментальних вимірювань, обробка результатів і активна участь в їх обговоренні, побудові фізичних моделей та їх обґрунтування. Керівнику роботи Г. Є. Давидюку належить загальне керівництво і координація наукових досліджень з тематики дисертації, висунення деяких ідей і моделей, які описують процеси дефектоутворення в CdS і $CdS:Cu$, та їх обговорення з автором роботи.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались на II Міжнародній конференції молодих науковців з прикладної фізики (Київ, 2002), III Міжнародній конференції молодих науковців з прикладної фізики (Київ, 2003), Міжнародній конференції молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики „Еврика 2004” (Львів, 2004), II-й Міжнародній науково-технічній конференції “Релаксаційні, нелінійні і

акустооптичні процеси та матеріали” (Луцьк, 2005 р.), III-й Міжнародній науково-технічній конференції “Релаксаційні, нелінійні і акустооптичні процеси та матеріали” (Луцьк, 2006 р.), VI Міжнародній науково-технічній конференції „Квантова електроніка” (Мінськ, 2006), I-й Міжнародній науково-практичній конференції студентів і аспірантів “Волинь очима молодих науковців: минуле, сучасне, майбутнє” (Луцьк, 2007 р.), XI Міжнародній конференції „Фізика і технологія тонких плівок та наносистем” (Івано Франківськ, 2007), 8-й Міжнародній конференції “Фізичні явища в твердих тілах” (Харків, 2007 р.), III Українській науковій конференції з фізики напівпровідників (Одеса, 2007), міжрегіональному науковому семінарі “Сучасні проблеми електроніки” (Львів, 2008 р.), II-й Міжнародній науково-практичній конференції студентів і аспірантів “Волинь очима молодих науковців: минуле, сучасне, майбутнє” (Луцьк, 2008 р.), III-й Міжнародній науково-практичній конференції „Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології” (Кременчук, 2008 р.), XXXVIII Міжнародній конференції із взаємодії заряджених частинок з речовиною (Москва, 2008р.), IV-й Міжнародній науково-технічній конференції “Релаксаційні, нелінійні і акустооптичні процеси та матеріали” (Луцьк, 2008 р.), VI міжнародній школі-конференції „Актуальні проблеми фізики напівпровідників” (Дрогобич, 2008 р.), а також на наукових конференціях професорсько-викладацького складу Волинського національного університету імені Лесі Українки (2006-2008), на засіданнях кафедри фізики твердого тіла Волинського національного університету імені Лесі Українки.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 29 друкованих праць, з яких 12 статей у наукових фахових журналах та 17 тез конференцій [1-29].

Структура дисертації. Дисертація складається із вступу, 5 розділів, висновків та списку використаної літератури. Вона викладена на 140 сторінках, містить 28 рисунків, 5 таблиць. Список використаної літератури складає 143 найменування.

ЗМІСТ РОБОТИ

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

Перший розділ містить огляд літературних даних, який стосується загальних властивостей монокристалів CdS і впливу на їх параметри опромінення високоенергетичними частинками. Аналізуються механізми дефектоутворення і природи радіаційних дефектів, утворених частинками надпорогових і підпорогових енергій в монокристалах CdS.

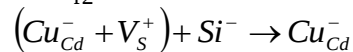
Другий розділ дисертації присвячений аналізу технічних характеристик обладнання, на якому проведена експериментальна частина роботи, і методиці вимірювання параметрів зразків.

Третій розділ присвячено експериментальним дослідженням впливу радіації, зумовленої частинками з підпороговою енергією, на фотоелектричні параметри спеціально нелегованих і легованих міддю монокристалів сульфіду кадмію.

Для більш точної ідентифікації механізмів підпорогового дефектоутворення і перебудови дефектного спектра зразка при опроміненні проводилось порівняння

впливу радіації, зумовленої частинками з надпороговою і підпороговою енергіями на оптичні і фотоелектричні параметри однотипних зразків. Було встановлено, що при опроміненні електронами надпорогової енергії $E=1,2$ MeV легованих монокристалів CdS:Cu відбувається зменшення інтенсивності червоної смуги люмінесценції з максимумом $\lambda_{r1} \approx 0,80$ мкм і поява двох нових смуг люмінесценції, які не спостерігались до опромінення інфрачервоної з $\lambda_{r1} \approx 1,0$ мкм (за яку відповідальні центри Cu_{Cd}) і червоної з $\lambda_{r2} \approx 0,72$ мкм (зв'язаної з комплексами $(Cu_{Cd}^- - V_S^+)^0$). Показано, що за люмінесценцію з λ_{r1} відповідальні комплекси $(Cu_{Cd}^- - Cu_i^+)$, які розпадаються при збудженні електронної системи кристала під дією електронної радіації. Дефекти, що утворюються при цьому, взаємодіють із радіаційно введеними вакансіями кадмію (V_{Cd}) і сірки (V_S).

Опромінення таких же кристалів частинками підпорогової енергії - квантами рентгенівських променів з $E_1=8,6$ кеВ і $E_2=17,5$ кеВ, які, будучи нейтральними, мають слабку іонізуючу дію, веде до зменшення люмінесценції з $\lambda_{r2} \approx 0,72$ мкм, що пояснюється збільшенням рухливості міжвузлових атомів сірки (Si) при збудженні кристалічної ґратки рентгенівськими променями і взаємодією їх з комплексами, відповідальними за люмінесценцію з λ_{r2} .



Встановлено, що при опроміненні монокристалів сульфїду кадмію рентгенівськими квантами з підпороговою енергією має місце утворення центрів повільної рекомбінації (V_{Cd} і Cu_{Cd}) в „слабких місцях”, а саме біля великих структурних пошкоджень (СП) кристалічної ґратки, в області яких існує найбільше послаблення міжатомних зв'язків. При цьому внаслідок збурення зв'язаного з полями просторового заряду і пружної деформації ґратки біля великих СП відбувається зміна параметрів центрів повільної рекомбінації, що зумовлює розмиття і зсув максимумів оптичного гашення фотопровідності (ОГФ) в довгохвильову область ($1 \text{ мкм} < \lambda < 1,7 \text{ мкм}$).

Відсутність гашення фотопровідності в області з $\lambda \approx 0,95-0,98$ мкм в опромінених рентгенівськими променями CdS:Cu – монокристалах свідчить про малу швидкість введення рентгенівськими квантами вільних V_{Cd} і Cu_{Cd} (рис.1).

Значно більша при рентгенівському опроміненні швидкість введення центрів рекомбінації в монокристалах CdS:Cu, порівняно з нелегованими зразками (рис. 1 б, криві 3, 4, 5) може бути пояснена таким механізмом дефектоутворення. Леговані монокристали є більш дефектними зразками, які мають більшу концентрацію дислокацій, пор, включень іншої фази (Cu_2S), скупчень точкових дефектів тощо. Рентгенівські кванти, в основному, руйнують послаблені міжатомні зв'язки в області великих структурних пошкоджень, яка в CdS:Cu монокристалах збагачена атомами міді. Вакансії кадмію, утворені внаслідок руйнування послаблених зв'язків, заповнюються атомами міді, які утворюють центри Cu_{Cd} , при цьому менш рухливі Cd_i втрачають частину своїх stokів – V_{Cd} , взаємодія з якими веде до зникнення радіаційних дефектів.

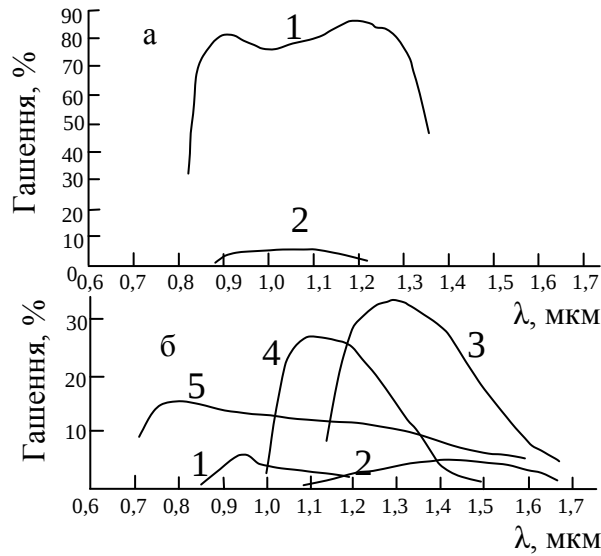


Рис.1. Спектральний розподіл оптичного гашення фотопровідності CdS, CdS:Cu при $T=300\text{ K}$. ($N_{\text{Cu}} = 10^{18}\text{ см}^{-3}$)

а) Електронно опромінені кристали: 1 – CdS:Cu, $E=1,2\text{ MeV}$, $\Phi=0,8\cdot 10^{17}\text{ ел/см}^2$; 2 – CdS:Cu, $E=230\text{ кеВ}$, $\Phi=0,4\cdot 10^{17}\text{ ел/см}^2$

б) Неопромінені і опромінені рентгенівськими променями: 1 – CdS – неопромінений; 2 – CdS:Cu – неопромінений; 3 – CdS:Cu – опромінений рентгенівськими квантами 150 год. (мідна трубка, $E=8,6\text{ кеВ}$), 4 – CdS:Cu – опромінений рентгенівськими квантами 150 год (молібденова трубка, $E=17,5\text{ кеВ}$), 5 – CdS – опромінений рентгенівськими квантами 150 год. (мідна трубка $E=8,6\text{ кеВ}$).

Найбільш ймовірним механізмом, який пояснює виникнення V_{Cd} при рентгенівському опроміненні кристалів CdS, є домішково-іонізаційний механізм. Він ґрунтується на моделі Варлі і передбачає багаторазову іонізацію атомів кристалічної ґратки за рахунок Оже процесу при переході електронів на глибокі атомні оболонки (K , L , ...), попередньо іонізовані рентгенівськими квантами. Ефективність такого процесу збільшується, коли нестійка конфігурація атомів поруч з багатократно іонізованим атомом стає несиметричною, наприклад, за рахунок розміщення поряд структурного спотворення кристалічної ґратки.

Для підтвердження сказаного в однакових умовах опромінювали рентгенівськими променями монокристали CdS:Cu (з концентрацією структурних дефектів, яка визначалася технологічними умовами одержання зразків) і кристали того самого типу, але попередньо опромінені електронами (з більшою концентрацією великих структурних пошкоджень на величину дефектних скупчень, утворених електронною радіацією при великих дозах опромінення $\geq 10^{18}\text{ ел./см}^2$). Виявилося, що швидкість введення радіаційних дефектів при рентгенівському опроміненні в монокристалах CdS:Cu майже в 6 разів менша, ніж в однотипних зразках, але попередньо опроміненних електронами. Це підтверджує раніше зроблений нами висновок про утворення дефектів частинками підпорогової енергії в області послаблених міжатомних зв'язків, а саме біля великих СП кристалічної ґратки напівпровідника. Такі дефекти, зокрема V_{Cd} , взаємодіючи з міжвузловими атомами міді, що знаходяться біля великих СП, створюють центри рекомбінації - Cu_{Cd}^- , при цьому зменшується концентрація Cu_i в області КСП, для яких вони є стоками, що підтверджується експериментально.

Максимум оптичного гашення фотопровідності (ОГФ) в легованих зразках зміщується в короткохвильову область при збільшенні енергії квантів рентгенівських променів, якими опромінювались зразки (рис.1 б, криві 3 і 4). Це пов'язано із просторовим розподілом радіаційних дефектів в області великих структурних спотворень кристалічної ґратки. Більш високоенергетичні кванти

молібденової трубки можуть руйнувати більш міцні міжатомні зв'язки і, відповідно, створювати дефекти на більшій відстані від ядра великих СП.

Характерною особливістю впливу рентгенівських променів на фоточутливість зразків є її зменшення в CdS-монокристалах і зростання в кристалах CdS:Cu із збільшенням дози рентгенівських квантів. При цьому зміна фоточутливостей в короткохвильовій і довгохвильовій областях спектральної кривої фотопровідності дещо різна (рис.2).

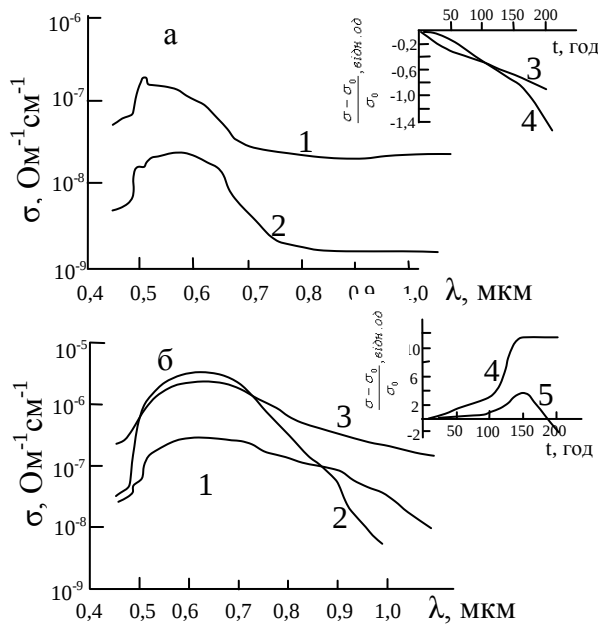


Рис. 2. Спектральний розподіл фотопровідності монокристалів CdS і CdS:Cu опромінені рентгенівськими променями ($E=8,6\text{keV}$) при $T=300\text{K}$. а) CdS: 1 - не опромінений; 2 - опромінений 200год, 3, 4 - відносна зміна фотопровідності, в області з $\lambda=0,51\text{мкм}$ і $1,0\text{мкм}$ відповідно з дозою опромінення. б) CdS:Cu ($N_{\text{Cu}}=10^{18}\text{см}^{-3}$): 1 - не опромінений; 2 - опромінений 200год; 3 - через місяць після опромінення; 4, 5 - відносна зміна фотопровідності, в області з $\lambda=0,62\text{мкм}$ і $1,0\text{мкм}$ відповідно, з дозою опромінення; σ_0 і σ - фотопровідності неопроміненіх і опроміненіх кристалів.

Фотопровідність в області довжин хвиль збуджуючого світла $\sim 0,51$ і $0,62\text{мкм}$ відповідає максимумам фотопровідності при $T=300\text{K}$ в зразках CdS і CdS:Cu відповідно.

В нелегованих монокристалах CdS відносно зменшення фоточутливості з

дозою опромінення в області ($\sim 1,0\text{мкм}$) більше, ніж в короткохвильовій ($\sim 0,51\text{мкм}$), особливо при великих дозах рентгенівських променів (рис.2, криві 3 і 4). В кристалах CdS:Cu зростання відносної фоточутливості зразків у короткохвильовій ($\sim 0,62\text{мкм}$) більше від такого в довгохвильовій частині спектрального розподілу фотопровідності ($\sim 1,0\text{мкм}$). Зменшення фоточутливості опроміненіх монокристалів CdS при практично незмінній концентрації центрів повільної рекомбінації зумовлено перебудовою в процесі опромінення існуючих в кристалі дефектних центрів, внаслідок якої відбувається збільшення долі рекомбінаційного потоку електронів і дірок через безвипромінювальні центри швидкої рекомбінації.

В легованих зразках вакансії кадмію, які виникають при рентгенівському опроміненні біля КСП, взаємодіють з атомами Cu, утворюючи центри Cu_{Cd} , які є центрами повільної рекомбінації. Збагачення великих СП повільними центрами рекомбінації (Cu_{Cd}) веде до зменшення ефективності швидкого каналу рекомбінації електронно-діркових пар і, відповідно, до зростання фоточутливості зразків у короткохвильовій області спектрального розподілу $\sim 620\text{нм}$ (рис.2 б, криві 1 і 2).

Зменшення фотопровідності в довгохвильовій області з $\lambda \geq 1,0\text{мкм}$ зумовлене розпадом при рентгенівському опроміненні центрів, відповідальних за фотопровідність в цій області. Аналогічне явище спостерігається і в нелегованих зразках. Як відомо з літературних джерел, роль таких центрів можуть грати преципітати міжвузлових атомів кадмію Cd_i . Для підтвердження сказаного

підбиралися дефектні зразки з помітною fotocутливістю в довгохвильовій області спектрального розподілу фотопровідності. Опромінення таких зразків рентгенівськими квантами 200 год веде до зменшення довгохвильової фотопровідності майже на 4 порядки по відношенню до її вихідного значення (рис.3).

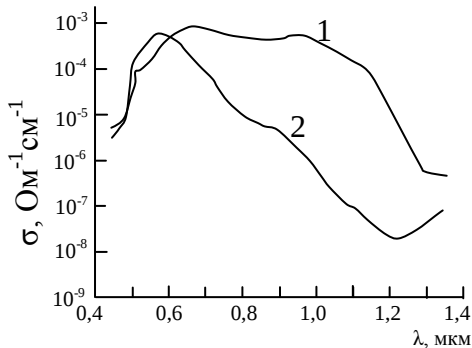


Рис. 3. Спектральний розподіл фотопровідності монокристалів CdS:Cu при $T=300$ K. 1 – до опромінення; 2 – після опромінення рентгенівськими квантами протягом 200 год. ($E=8,6$ кеВ)

Міжвузлові атоми кадмію після розпаду преципітатів можуть виходити на різні стоки, включаючи поверхню, або розсіюватись по решітці опромінених зразків. Очевидно, що з часом при зберіганні зразків розсіяні Cd_i можуть знову об'єднуватись і збільшувати фотопровідність кристалів в інфрачервоній області (2 б, крива 3).

Як відомо, концентрацію V_{Cd} в CdS – монокристалах можна збільшувати, відпалюючи або загартовуючи зразки CdS при температурах $t \geq 200^\circ\text{C}$. Для порівняння особливостей термодфектів (V_{Cd}) з дефектами утвореними частинками з підпороговою енергією (квантами рентгенівських променів), досліджувались спектри ОГФ монокристалів CdS:Cu, відпалених при різних температурах з наступним загартуванням. Результати дослідження представлені на рис.4. Як видно із рисунка, при наведених температурах відпалу V_{Cd} утворюється в області великих СП (з максимумами гашення $\lambda \geq 1,2$ мкм), як і при рентгенівському опроміненні і тільки при $t \geq 240^\circ\text{C}$ спостерігається утворення вільної вакансії з максимумом ОГФ в області $\lambda \approx 0,95-1$ мкм (рис.4, криві 3 і 4).

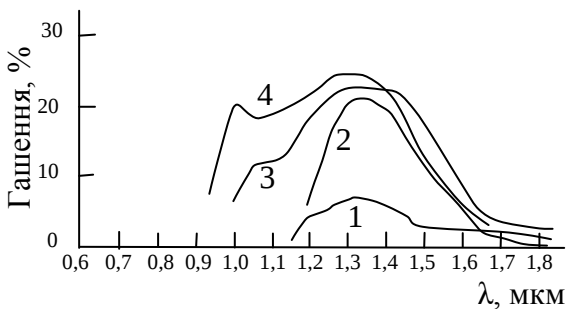


Рис.4. Спектральний розподіл оптичного гашення фотопровідності

1 - CdS:Cu – невідпалений, 2 - CdS:Cu відпалений і загартований при $t=170^\circ\text{C}$; 3 - CdS:Cu відпалений і загартований при $t=200^\circ\text{C}$; 4 - CdS:Cu відпалений і загартований при $t=250^\circ\text{C}$.

Дослідження ізохронного відпалу темної питомої електропровідності (σ_T) при різних температурах з наступним загартуванням зразків CdS:Cu показало, що при $t \sim 150-170^\circ\text{C}$ при яких концентрація термічно утворених V_{Cd} незначна, відбувається зростання σ_T . Таке зростання темної провідності пояснюється розпадом преципітатів Cd_i , відповідальних за інфрачервону фотопровідність, як при опроміненні рентгенівськими квантами. При цьому кристалічна ґратка зразка збагачується мілкими донорами, якими є окремі міжвузлові атоми кадмію.

Взаємодія Cu_i з термічно введеними V_{Cd} веде до утворення акцепторів – Cu_{Cd} , відповідальних за зменшення σ_T , відпалених з наступним загартуванням зразків CdS:Cu, що спостерігається експериментально при температурах відпалу $t > 170^\circ\text{C}$.

При цьому залежність σ_T від величини, оберненої температурі відпалу, має експоненціальний характер з енергією активації $E_A=(1,0\pm 0,1)\text{eV}$, яка близька до термічної енергії утворення V_{Cd} в CdS-монокристалах.

В четвертому розділі представлені результати дослідження впливу іонізаційних процесів, які супроводжують опромінення кристалів високоенергетичними зарядженими частинками на механізми підпорогового дефектоутворення. Проводився розрахунок концентрації введених іонізуючою радіацією дефектів. Показано, що енергетична залежність коефіцієнта поглинання світла ($K(h\nu)$) на краю смуги власного поглинання (КП) як в неопромінених, так і опромінених зразках CdS і CdS:Cu (при температурах вимірювання 5, 77, 300 К) добре описується правилом Урбаха, що свідчить про участь „хвостів” щільності станів, зумовлених дефектністю кристалів у формуванні власних оптичних переходів. На основі експериментально встановленого (із залежності $K(h\nu)$) параметра Δ_0 , який є мірою розупорядкування (дефектності) кристалічної ґратки, ми визначили концентрацію дефектів n_t , що зумовлюють формування $K(h\nu)$. При цьому використовувалися формули, вперше запропоновані в роботах А.С. Давидова, В.Л.Бонч-Бруєвича:

$$\Delta_0 = 2,2(n_t a_B^3)^{2/5} E_B$$

$$\text{де } a_B = \frac{\varepsilon \hbar^2}{m e^2} \text{ і } E_B = \frac{m_e e^4}{2 \varepsilon^2 \hbar^2}.$$

Результати розрахунків представлені в таблиці.

Таблиця

Параметри краю смуги власного поглинання і концентрація дефектів у неопромінених і опромінених іонізуючими частинками монокристалах CdS і CdS:Cu

Тип зразка	CdS			CdS:Cu ($N_{Cu} \approx 10^{18} \text{см}^{-3}$)		
Вид опромінення	Не опром.	Опром. електронами	Опром. протонами	Не опром.	Опром. електронами	Опром. протонами
Доза і енергія опромінення.		$E=1,2 \text{ MeV}$ $\Phi \approx 10^{17} \text{ел./см}^2$	$E=46 \text{ MeV}$ $\Phi \approx 1,6 \cdot 10^{15} \text{пр./см}^2$		$E=1,2 \text{ MeV}$ $\Phi \approx 10^{17} \text{ел./см}^2$	$E=46 \text{ MeV}$ $\Phi \approx 1,6 \cdot 10^{15} \text{пр./см}^2$
Δ_0, eV	$\sim 0,02-0,03$	$\sim 0,03$	$\sim 0,06$	$\sim 0,05$	$\sim 0,085$	$\sim 0,095-0,098$
$n_t, \text{см}^{-3}$	$\sim 10^{19}$	$\sim 10^{19}$	$\sim 6 \cdot 10^{19}$	$\sim 5 \cdot 10^{19}$	$\sim 1,5 \cdot 10^{20}$	$\sim 2,5 \cdot 10^{20}$

Опромінення слабоіонізуючими нейтральними частинками (нейтронами) веде практично до утворення однакової концентрації дефектів в обох типах зразків CdS і CdS:Cu. Це свідчить, що при опроміненні високоіонізуючими частинками, крім дефектів, утворених при прямих зіткненнях (надпорогові механізми), в легованих Cu кристалах додатково утворюються дефекти, зумовлені іонізацією кристалічної ґратки напівпровідника (підпорогові ефекти). Атоми Cu, які сприяють підпороговим процесам, відіграють роль подібну до „каталізатора”, активізуючи підпорогове дефектоутворення, але при цьому самі не входять (за винятком центрів Cu_{Cd}) у склад

утворених нових дефектів, концентрація яких в багато разів більша за концентрацію легуючих атомів Cu (табл.).

В роботі досліджувався вплив лазерного випромінювання на електричні, оптичні і фотоелектричні параметри не легованих і легованих атомами Cu монокристалів сульфиду кадмію. Опромінювання здійснювалося імпульсами рубінового лазера із густиною потужності світлового потоку $\sim 7 \cdot 10^7 \text{ Вт/см}^2$. Тривалість одного імпульсу становила $\tau_i = 20 \text{ нс}$, довжина хвилі випромінювання – $\lambda = 0,69 \text{ мкм}$.

Експериментально було показано і теоретично обґрунтовано, що під дією лазерного опромінення монокристалів сульфиду кадмію утворюється неоднорідний розподіл донорних центрів (за припущенням Cd_i) із максимумом на відстані 0,5–1 мкм від поверхні, на яку падає лазерне світло.

Під дією лазерної радіації спостерігається утворення центрів повільної рекомбінації з характерними для кристалів CdS спектрами оптичного гашення фотопровідності.

Уперше досліджувався лазерний відпал дефектів, утворених у кристалах CdS і CdS:Cu електронною і нейтронною радіацією. При цьому встановлено, що під час лазерного відпалу та перебудови центрів повільної рекомбінації існує тепловий ефект, зумовлений нагріванням зразків при збудженні кристалічної ґратки зразків імпульсами світла рубінового лазера, та випаровування міжвузлових атомів сірки, утворених радіацією із приповерхневої області зразка.

П'ятий розділ присвячений дослідженню механізмів, відповідальних за деградацію власної фоточутливості електронно опромінених монокристалів і впливу вихідних структурних дефектів на процеси підпорогового дефектоутворення в монокристалах сульфиду кадмію. Експериментально було встановлено, що повільне зменшення з часом ($\tau \approx 0,5$ місяця) питомої фотопровідності (σ_ϕ) при $T = 292 \text{ К}$ монокристалів CdS:Cu добре описується гіперболічним законом. Запропонована фізична модель, згідно з якою деградація фотопровідності відбувається за рахунок утворення центрів швидкої рекомбінації, якими є комплекси з двох атомів (мілких донорів). Теоретичне обґрунтування моделі дало можливість отримати формулу яка описує гіперболічну кінетику деградації σ_ϕ опромінених зразків CdS:Cu:

$$\sqrt{\frac{\sigma_{\phi M}}{\sigma_\phi}} - 1 = Q \cdot t; \quad Q = I_0 z \nu_0 \exp\left(-\frac{U}{kT}\right),$$

де $\sigma_{\phi M}$ - власна фотопровідність зразків зразу після опромінення, I_0 - початкова концентрація мілких донорних атомів, U – їх енергія активації дифузії, $\nu_0 \approx kT/\hbar$ - частотний фактор, z – число еквівалентних положень одного атома відносно другого в комплексі.

З літературних джерел, присвячених роботам з міченими атомами, відомо, що в зразках CdS з надлишком кадмію самодифузія атомів кадмію відбувається за рахунок їх переміщення по міжвузлових положеннях з обміном між атомами Cd, які перебувають у вузлах кристалічної ґратки. Енергія активації такого процесу становить $U \approx 2 \text{ еВ}$, що добре збігається з нашим теоретично визначеним значенням. Тому деградація фоточутливості опромінених CdS:Cu – монокристалів пов'язана з

утворенням з часом міжвузлових атомів кадмію, введених радіацією преципітатів, які складаються із двох атомів Cd_i .

Досліджуючи спектри люмінесценції монокристалів CdS , було показано, що швидкість введення радіаційних дефектів за рахунок іонізаційних процесів залежить від вихідного дефектного стану зразків. Вважається, що найбільш ефективним механізмом підпорогового дефектоутворення в цьому випадку є домішково-іонізаційний механізм. Для встановлення природи атома, який має найбільшу ймовірність багаторазової іонізації при опроміненні високоіонізуючим пучком електронів, було використано машинне моделювання процесів передачі енергії високоіонізуючими частинками електронам внутрішніх оболонок атомів. При цьому використовувалась комп'ютерна програма: CASINO V.2.42 – A, Universite de Sherbrooke, Quebec, Canada, 2002. Було показано, що за підпорогове дефектоутворення відповідальний домішково-іонізаційний механізм, пов'язаний із збудженням K -електронної оболонки атома Cd .

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

1. Вперше показано, що при опроміненні рентгенівськими променями монокристалів CdS , енергія квантів яких менша порогової енергії зміщення атомів кристалічної ґратки ($h\nu_1=8,06\text{keV}$ і $h\nu_2=17,5\text{keV}$), має місце підпорогове дефектоутворення центрів повільної рекомбінації, відповідальних за оптичне гашення фотопровідності в інтервалі довжин хвиль $1\text{мкм} \leq \lambda \leq 1,8\text{мкм}$.

2. Утворення дефектів рентгенівськими квантами зумовлене руйнуванням послаблених міжатомних зв'язків в великих крупних структурних пошкодженнях кристалічної ґратки напівпровідникових кристалів.

3. Суттєвий вплив на швидкість введення дефектів в CdS – монокристалах при підпороговому дефектоутворенні спричиняють атоми легуючих домішок і вихідні крупномасштабні структурні дефекти

4. Опромінення монокристалів CdS і $\text{CdS}:\text{Cu}$ рентгенівськими квантами веде до суттєвих змін фоточутливості зразків. Фоточутливість спеціально нелегованих монокристалів CdS без помітних змін в спектральному розподілі фотопровідності зменшується із збільшенням дози опромінення. В легованих Cu зразках фоточутливість зростає у видимій частині спектральної кривої з розмитим максимумом біля $\sim 0,62\text{-}0,64\text{ мкм}$, що пояснюється зменшенням ефективності швидкого каналу рекомбінації і утворенням структурних дефектів з участю Cu , відповідальних за домішкову фотопровідність.

5. Вважається, що за інфрачервону фотопровідність у спектральній області $0,9\text{-}1,0\text{ мкм}$ відповідальні преципітати міжвузлових атомів кадмію, які розпадаються під дією квантів рентгенівських променів або при відпалі зразків.

6. Загартування відпалених при високих температурах монокристалів $\text{CdS}:\text{Cu}$ веде до виникнення (внаслідок взаємодії термоутворених V_{Cd} з Cu_i) центрів Cu_{Cd} , які відповідальні за зростання фотопровідності зразків в області $0,64\text{-}0,70\text{мкм}$. Визначена енергія активації термоутворення центрів Cu_{Cd} , яка виявилась рівною $(0,95\text{-}1,00)\text{ eV}$.

7. Опромінення монокристалів CdS і $\text{CdS}:\text{Cu}$ зарядженими високоіонізуючими частинками (електронами і протонами) веде внаслідок дії підпорогових механізмів

до додаткового утворення радіаційних дефектів. Розрахована концентрація дефектів, утворених іонізуючим випромінюванням: $N \approx 10^{19} \text{см}^{-3}$ (при $E=1,2 \text{MeV}$, $\Phi \approx 10^{17} \text{ел./см}^2$) і $\sim 6 \cdot 10^{19} \text{см}^{-3}$ (при $E=46 \text{MeV}$, $\Phi \approx 1,6 \cdot 10^{15} \text{пр./см}^2$) для CdS; $N \approx 10^{20} \text{см}^{-3}$ ($E=1,2 \text{MeV}$, $\Phi \approx 10^{17} \text{ел./см}^2$) і $\sim 2 \cdot 10^{20} \text{см}^{-3}$ (при $E=46 \text{MeV}$, $\Phi \approx 1,6 \cdot 10^{15} \text{пр./см}^2$) для CdS:Cu ($N_{\text{Cu}}=10^{18} \text{см}^{-3}$).

8. Запропонована і теоретично обґрунтована фізична модель підпорогового дефектоутворення при лазерному опроміненні. Показано утворення під дією наносекундних імпульсів рубінового лазера з густиною потужності $7 \cdot 10^7 \text{Вт/см}^2$ приповерхневого низькоомного шару ($x=0,5\text{-}1 \text{мкм}$) і центрів повільної рекомбінації з характерними для кристалів CdS спектрами оптичного гашення фотопровідності, а також випаровування міжвузлових атомів сірки із приповерхневої області зразка.

9. При лазерному відпалі і перебудові центрів повільної рекомбінації в електронно і нейтронно опромінених зразках має місце тепловий ефект, зумовлений нагріванням (при збудженні кристалічної ґратки) зразків імпульсами світла рубінового лазера.

10. На основі комп'ютерного моделювання процесів дефектоутворення при електронному опроміненні монокристалів CdS з використанням програми „CASINO V2.42 - A” (Canada, 2002) обґрунтована модель домішково-іонізаційного механізму підпорогового дефектоутворення, яка пояснює домінуюче утворення дефектів в кадмієвій підґратці електронно опромінених дефектних кристалів CdS і CdS:Cu.

11. З використанням експериментальних результатів і теоретичного обґрунтування запропонованої фізичної моделі релаксаційних процесів в опромінених зразках показано, що відповідальними за деградацію власної фоточутливості в монокристалах CdS:Cu є преципітати, що складаються з двох міжвузлових атомів кадмію (Cd_i), які утворюються при відпалі опромінених зразків при кімнатній температурі. Визначена енергія активації переміщення Cd_i ($U \approx 2 \pm 0,06 \text{eV}$).

СПИСОК ОСНОВНИХ ДРУКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Влияние дефектного состояния образцов на спектры люминесценции облученных электронами монокристаллов CdS / Г. Е. Давидюк, В. В. Божко, Г. Л. Мирончук, В. З. Панкевич // Физика твердого тела. – 2007. – Т. 49, № 12. – С. 2133–2136.

Особистий внесок здобувача: вимірювання і аналіз спектрів люмінесценції електронно опромінених зразків.

2. Особенности оптических и фотоэлектрических свойств специально легированных и легированных Cu монокристаллов CdS / Г. Е. Давидюк, В. В. Божко, Г. Л. Мирончук, Л. В. Булатецкая, А. Г. Кевшин // Физика и техника полупроводников. – 2008. – Т. 42, № 4. – С. 399 – 403.

Особистий внесок здобувача: підготовка зразків до вимірювання, відпал нейтронно опромінених зразків, участь в обговоренні результатів.

3. Давидюк Г. Є. Вплив поверхні зразка на механізми дефектоутворення при електронному опроміненні спеціально нелегованих і легованих міддю

монокристалів сульфід кадмію / Г. Є. Давидюк, В. В. Божко, Г. Л. МIRONЧУК // Фізика і хімія твердого тіла. – 2007. – Т. 8, № 4. – С. 708–712.

Особистий внесок здобувача: оцінка концентрації дефектів відповідальних за розмиття краю смуги власного поглинання, аналіз кінетики деградації фоточутливості.

4. Особливості утворення дефектних комплексів, відповідальних за деградацію фоточутливості електронно опромінених легованих міддю монокристалів CdS / Г. Є. Давидюк, В. В. Божко, Г. Л. МIRONЧУК, В. Кажукаускас // Фізика і хімія твердого тіла. – 2008. – Т. 9, № 3. – С. 493–497.

Особистий внесок здобувача: дослідження кінетики деградації електронно опромінених зразків. Участь в обговоренні моделі деградації фоточутливості.

5. МIRONЧУК Г. Моделювання кінетично-динамічних ланцюжків релаксаційної оптики / Г. МIRONЧУК, П. Трохимчук // Вісник Львівського університету. Серія фізична. – 2006. – № 39 – С. 152–154.

Особистий внесок здобувача: розв'язок кінетично-динамічних рівнянь з використанням імпульсних функцій.

6. МIRONЧУК Г. Л. До питання підпорогового дефектоутворення у вузькозонних напівпровідниках $A^{III}B^V$ / Г. Л. МIRONЧУК, П. П. Трохимчук // Науковий вісник ВДУ. Фізичні науки. – 2001. – № 7. – С. 82–87.

Особистий внесок здобувача: участь в обґрунтуванні моделі виникнення структурних пошкоджень при лазерному опроміненні.

7. МIRONЧУК Г. Л. Кінетично-динамічні рівняння релаксаційної оптики // Науковий вісник ВДУ. Фізичні науки. – 2006. – № 4. – С. 189–192.

Особистий внесок здобувача: побудова моделі розподілу донорних центрів після опромінення імпульсами рубінового лазера.

8. Утворення дефектних комплексів і їх відпал у нейтронно опромінених спеціально нелегованих і легованих Си монокристалах CdS / Г. Є. Давидюк, В. В. Божко, М. С. Богданюк, Г. Л. МIRONЧУК, Л. В. Булатецька, А. Г. Кевшин // Науковий вісник ВДУ. Фізичні науки. – 2007. – № 16. – С. 57–62.

Особистий внесок здобувача: підготовка зразків до вимірювання, участь у дослідженні фізичних параметрів, обговорення результатів.

9. Вплив крупномасштабних структурних пошкоджень кристалічної ґратки монокристалів сульфід кадмію на перебудову центрів червоної та інфрачервоної люмінесценції в опромінених електронами зразках / Давидюк Г. Є., Божко В. В., МIRONЧУК Г. Л., Панкевич В. З. // Науковий вісник ВДУ. Фізичні науки. – 2007. – № 6. – С. 23–28.

Особистий внесок здобувача: підготовка зразків до вимірювання, вимірювання і дослідження спектрів люмінесценції.

10. МIRONЧУК Г. Л. Дослідження підпорогових механізмів утворення центрів повільної рекомбінації в спеціально нелегованих і легованих міддю монокристалах сульфід кадмію / Г. Л. МIRONЧУК, Г. Є. Давидюк, В. В. Божко // Нові технології – 2008. – № 2(20) – С. 168 – 174.

Особистий внесок здобувача: підготовка зразків до вимірювання, вимірювання спектрів оптичного гашення фотопровідності.

11. Влияние электронного облучения на особенности механизмов образования структурных повреждений монокристаллов CdS / Давидюк Г. Е., Божко В. В., Мирончук Г. Л., Панкевич В. З. // Лазерная и оптико-электронная техника. Сборник научных статей. – Минск : Академия управления при Президенте Республика Беларусь, изд. БГУ, №10, 2006. – С. 120–126.

Особистий внесок здобувача: підготовка зразків до вимірювання, дослідження фотоелектричних властивостей.

12. Мирончук Г. Л. Вплив рентгенівської радіації на спектри фоточутливості в спеціально нелегованих і легованих міддю монокристалах сульфиду кадмію / Мирончук Г. Л., Давидюк Г. Є., Божко В. В., Цьось Ю. А., Татарин Б. А. // Науковий вісник ВНУ імені Лесі Українки. Фізичні науки. – 2008. – № 9. – С. 37 – 50.

Особистий внесок здобувача: вимірювання спектрів люмінесценції та оптичного гашення фотопровідності в опромінених рентгенівськими квантами зразках. Участь в обговоренні результатів.

13. Myronchuk G. Some problems of the modeling kinetic-dynamic chains the equations of relaxed optics / G. Myronchuk, P. Trokhimchuk // Second international young scientists' conference on applied physics, Kyiv, 19 – 20 June 2002: theses of reports. – K., 2002. – P. 25–26.

14. Myronchuk G. The modeling two termal kinetic-dynamic chains the mixed phenomena of relaxed optics / G. Myronchuk, P. Trokhimchuk // Third international young scientists' conference on applied physics, Kyiv, 18–20 June 2003 : theses of reports. – K., 2003. – P. 61 – 62.

15. Мирончук Г. Моделирование кинетично-динамических ланцюжків релаксацийної оптики // Еврика–2004 : Міжнар. конф. молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики, Львів, 19 – 21 травня 2004р. : тези. доп. – Львів, 2004. – С. 28–29.

16. Мирончук Г. Кінетично-динамічні ланцюжки релаксацийної оптики // Релаксацийні, нелінійні й акустооптичні процеси та матеріали (РНАОПМ'2005) : матеріали 2-ої міжнар. наук. конф., 1-5 черв. 2005р. : тези доп. – Луцьк : РВВ „Вежа” ВДУ імені Лесі Українки, 2005. – С. 102 – 104.

17. Особливості фотопровідності монокристалів сульфиду кадмію опромінених великими дозами швидких реакторних нейтронів / Давидюк Г.Є., Божко В.В., Шаварова Г.П., Мирончук Г.Л., Булатецька Л.В. // Релаксацийні, нелінійні й акустооптичні процеси та матеріали (РНАОПМ'2006) : матеріали 3-ої міжнар. наук. конф., 6–10 верес. 2006р. : тези доп. – Луцьк : РВВ „Вежа” ВДУ імені Лесі Українки, 2006. – С. 134 – 135.

18. Зависимость образования структурных повреждений при электронном облучении монокристаллов сульфида кадмия от исходного дефектного состояния образцов / Давидюк Г. Е., Божко В. В., Мирончук Г. Л., Панкевич В. З. // Квантовая электроника : Шестая Международная научно –техническая конф., Минск, 14-17 ноября 2006 г. : тезисы докладов. – Минск, 2006. – С. 152–153.

19. Мирончук Г. Зміна параметрів оптично активних центрів у монокристалах сульфиду кадмію зі структурними дефектами під впливом опромінення високоенергетичними електронами / Мирончук Г., Панкевич Л. // Волинь очима

молодих науковців: минуле, сучасне, майбутнє : матеріали I міжн. наук.-практичної конф. студентів і аспірантів., 18-19 квіт. 2007 р. : тези доп. – Луцьк : РВВ “Вежа” ВНУ імені Лесі Українки, 2007. – Т.2., С. 59–60.

20. Давидюк Г. Є. Вплив поверхні зразка на механізми дефектоутворення при електронному опроміненні спеціально нелегованих і легованих міддю монокристалів сульфід кадмію / Давидюк Г. Є., Божко В. В., Мирончук Г. Л. // Фізика і технологія тонких плівок та наносистем (МКФТТПН) – XI : матеріали XI міжн. конф., Івано-Франківськ, 8–11 травн. 2007р. : тези доп. – Івано-Франківськ, 2007. – Т. 2. – С. 66.

21. Давидюк Г. Є. Деградація фоточутливості електронно опромінених монокристалів сульфід кадмію легованих міддю / Г. Є. Давидюк, В. В. Божко, Г. Л. Мирончук // Фізичні явища в твердих тілах : матеріали 8 міжн. конф., Харків, 11-13 груд. 2007р. : тези доп. – Х. : ХНУ, 2007. – С. 121.

22. Мирончук Г. Л. Роль підпорогових ефектів в перебудові дефектних станів у неопромінених й опромінених електронами спеціально нелегованих і легованих Cu монокристалах CdS / Г. Мирончук, Ю. Цьось // Волинь очима молодих науковців: минуле, сучасне, майбутнє : матеріали II міжн. наук.-практичної конф. студентів і аспірантів., Луцьк, 16-17 квіт. 2008 р. : тези доп. – Луцьк : РВВ “Вежа” Волин. нац. ун-ту імені Лесі Українки, 2008. – С. 187 – 189.

23. Особливості оптичних і фотоелектричних властивостей спеціально нелегованих і легованих Cu монокристалів CdS / Давидюк Г. Є., Божко В. В., Мирончук Г. Л., Головіна Н. А., Булатецька Л. В. // III Українська наук. конф. з фізики напівпровідників, Одеса, 17-22 червня 2007р. : тези доп. – Одеса : Астропринт, 2007. – С.91.

24. Дослідження підпорогових механізмів утворення центрів повільної рекомбінації в спеціально нелегованих і легованих міддю монокристалах сульфід кадмію / Мирончук Г. Л., Давидюк Г. Є., Божко В. В. // Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології : III міжн. наук. – практична конф., Кременчук, 21 – 23 трав. 2008 р. : тези доп. – Кременчук, 2008. – С. 116–117.

25. Подпороговое радиационно-стимулированное формирование центров рекомбинации в специально легированных и легированных медью монокристаллах CdS / Мирончук Г. Л., Давидюк Г. Е., Божко В. В., Барабаненков М. Ю. // XXXVIII международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, 27–29 мая 2008 г. : тезисы докладов. – М. : МГУ, 2008. – С. 164.

26. Мирончук Г. Л. Дослідження підпорогового дефектоутворення в кристалах InSb // Структурна релаксація в твердих тілах : міжнар. наук. конф., Вінниця, 23-25 травн., 2006р. : матеріали. – Вінниця, 2006. – С.265–267.

27. Цьось Ю. А. Особливості зміни параметрів повільних центрів рекомбінації в монокристалах CdS під впливом опромінення рентгенівськими променями / Цьось Ю. А., Мирончук Г. Л. // Релаксаційні, нелінійні й акустооптичні процеси та матеріали РНАОПМ'2008 : матеріали 4-ої міжнар. наук. конф., 01–05 черв. 2008р. : тези доп. – Луцьк : РВВ „Вежа” Волин. держ. ун-ту імені Лесі Українки, 2008. – С. 108 – 109.

28. Квасіхімічні реакції між дефектами в опромінених CdS:Cu – монокристалах, відповідальні за деградацію їхньої фоточутливості / Давидюк Г. Є., Божко В. В., Мирончук Г. Л., Кажукаускас В. // Сучасні проблеми електроніки : міжн. наук. семінар., Львів, 31 січ.-1 лют. 2008 р. : тези доп. – Львів : Львівський нац. ун.-т. ім. Івана Франка, 2008. – С. 27–28.

29. Утворення радіаційних дефектів в спеціально нелегованих і легованих міддю монокристалах CdS при опроміненні частинками з енергією меншою порогової енергії зміщення атомів з вузлів кристалічної ґратки / Г. Л. Мирончук, Г. Є. Давидюк, В. В. Божко, В. Кажукаускас // Актуальні проблеми фізики напівпровідників : VI міжнародна школа-конференція, Дрогобич, 23 вер. – 26 вер. 2008 р. : тези доповідей. – Дрогобич, 2008. – С. 172.

АНОТАЦІЯ

Мирончук Г.Л. Дефектоутворення в монокристалах CdS і CdS:Cu при опроміненні частинками підпорогової енергії. Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків. Волинський національний університет імені Лесі Українки, Луцьк, 2008.

Дисертація присвячена дослідженню механізмів утворення дефектів і їх впливу на електричні, фотоелектричні і оптичні властивості монокристалів сульфіду кадмію опромінених частинками підпорогової енергії – рентгенівськими квантами з $h\nu_1=8,6$ кеВ і $h\nu_2=17,5$ кеВ, електронами з $E=230$ кеВ і імпульсами рубінового лазера із густиною потужності світлового потоку $P=7\cdot 10^7$ Вт/см². Встановлено, що основним механізмом підпорогового дефектоутворення є домішково-іонізаційний механізм ефективність якого збільшується в області напружених і спотворених міжатомних зв'язків біля крупних структурних пошкоджень кристалічної ґратки напівпровідника. Швидкість утворення дефектів зростає в легованих Cu зразках.

Досліджено лазерний відпал центрів рекомбінації в електронно і нейтронно опромінених CdS і CdS:Cu – монокристалах.

Встановлено, що деградація власної фоточутливості в опромінених зразках CdS:Cu зв'язана з утворенням преципітатів, які складаються з двох міжвузлових атомів кадмію (Cd_{i2}). Визначена енергія активації дифузії Cd_i ($U=2\pm 0,06$ еВ).

Ключові слова: радіація, рентгенівські промені, лазер, сульфід кадмію, дефекти.

АННОТАЦИЯ

Мирончук Г.Л. Дефектообразование в монокристаллах CdS и CdS:Cu при облучении частицами подпороговой энергии.

Диссертация на соискание научной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников и диэлектриков. Волынский национальный университет имени Леси Украинки, Луцк, 2008.

Диссертация посвящена исследованию механизмов подпорогового образования дефектов в монокристаллах CdS, в т.ч. легированных атомами меди, и изучению влияния дефектов на электрические, фотоэлектрические и оптические свойства кристаллов. Подпороговое дефектообразование инициировалось низкоэнергетичным радиационным воздействием разной природы – рентгеновскими квантами с энергией 8.6 и 17.5 кэВ, электронами с энергией 230 кэВ и импульсами рубинового лазера с плотностью мощности излучения $7 \cdot 10^7$ Вт/см².

Показано, что рентгеновское облучение и поток ионизирующих частиц приводит к образованию вакансии кадмия (V_{Cd}) в области крупных структурных искажений решётки, характеризуемой деформированными и ослабленными межатомными связями. На основании исследования передачи энергии возбуждения электронам внутренних оболочек атомов (K, L ...) делается вывод о том, что примесно-ионизационный механизм с возможностью многократной ионизации $n > 2$ атомов кадмия является наиболее эффективным механизмом подпорогового дефектообразования. Эффективность примесно-ионизационного механизма больше в CdS:Cu-монокристаллах, что объясняется увеличением концентрации центров Cu_{Cd} , играющих роль центров рекомбинации и появляющихся в результате взаимодействия первичных радиационных дефектов, т.е. вакансий кадмия, с атомами меди. Определена энергия активации образования центров Cu_{Cd} , равная 0.95 – 1.00 эВ.

Экспериментально установлено и теоретически обосновано образование тонкого низкоомного слоя в приповерхностной области (толщиной 0.5-1 мкм) монокристаллов CdS, подверженных лазерному облучению. Предположено, что этот слой состоит из Cd_i .

Проведено исследование лазерного отжига структурных дефектов в облученных электронами и нейтронами монокристаллах CdS и CdS:Cu. Установлено испарение атомов серы, перешедших при электронном облучении в междоузельное состояние и диффундирующих в этом состоянии к поверхности кристалла. Показана существенная роль тепловых эффектов, обусловленных лазерным воздействием, в трансформации центров рекомбинации в облучённых электронами монокристаллах CdS:Cu. Экспериментально исследована деградация собственной фоточувствительности при комнатной температуре облучённых электронами монокристаллов CdS:Cu. Предложена физическая модель процесса деградации фоточувствительности и теоретически обосновано образование комплексов, состоящих из двух междоузельных атомов кадмия Cd_{i2} , ответственных за деградацию. Определена энергия активации диффузии Cd_{2i} , равная $2 \pm 0,06$ эВ.

Ключевые слова: сульфид кадмия, радиационное воздействие, дефекты, диффузия, отжиг.

ABSTRACT

Mironchuk G. L. Defects formation in CdS and CdS:Cu on irradiation by energetic particles of subthreshold energy. Manuscript.

Ph.D. (Physics and Mathematics) thesis, specialization 01.04.10 – Physics of semiconductors and dielectrics. Lesya Ukrainka Volyn National University, Lutsk, 2008.

Mechanisms of subthreshold defects formation in cadmium sulfide single crystals, including crystals originally doped with Cu atoms, as well as crystals electric, photo-electric, and optical properties are investigated. Subthreshold defects are produced by irradiation impact with low energy fluxes such as X-ray exposure with energy 8.6 and 17.5 keV, accelerated electrons with energy of 230 keV, and ruby laser pulses with light flux power density of $7 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$.

It is demonstrated that X-ray or ionizing radiation creates vacancies in the Cd sublattice of the crystals in the in local areas which are characterized by deformed and weakened interatomic bonds. Investigations of excitation transfer to the inner atomic shells allow to consider a doped-ionizing mechanism with multiple ionization of Cd atoms as the mostly efficient one of subthreshold defects formation. Aforementioned mechanism become the most pronounced in the doped with Cu atoms crystals.

It is shown a role of thermal effects during laser annealing in transformation of defects in undoped and doped with Cu atoms crystals.

It is supposed and proved that two interstitial Cd atom complexes, which are produced by electron irradiation (with energy of 1.2 MeV and flux $2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$), are responsible for degradation processes in the irradiated CdS:Cu crystals. Activation energy of these complexes diffusion is measured as equal to $2 \pm 0.06 \text{ eV}$.

Key words: single-crystals, cadmium sulphides, defects, irradiation.