

PACS 81.40.WX, 87.50.GI  
УДК 621.315.592, 620.19, 538.971

## ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ РАДІАЦІЙНО-ІНДУКОВАНОГО ВПОРЯДКУВАННЯ ДЕФЕКТНОЇ СТРУКТУРИ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ КРИСТАЛІВ

*Б. В. Павлик, Б. З. Цибуляк\*, М. В. Лишак*

Львівський національний університет імені Івана Франка, кафедра електроніки  
вул.Тарнавського, 107, м.Львів,79017; тел.: (032)2964371;  
e-mail: pavlyk@electronics.wups.lviv.ua

\*Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,  
кафедра інформаційних технологій та телекомунікаційних систем  
вул.Клепарівська, 35, м.Львів,79000; тел.: (032)2330055

### Анотація

#### ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ РАДІАЦІЙНО-ІНДУКОВАНОГО ВПОРЯДКУВАННЯ ДЕФЕКТНОЇ СТРУКТУРИ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ КРИСТАЛІВ

*Б. В. Павлик, Б. З. Цибуляк, М. В. Лишак*

Досліджено вплив іонізуючого опромінення на зміни електрофізичних характеристик приповерхневого шару та об'єму кристалів CdS. Встановлено, що під дією X-променів в сульфіді кадмію одночасно відбувається низка процесів перебудови системи дефектів кристала, ефективність яких залежить від температури, інтенсивності опромінення, величини поглинутої дози. Максимальна ефективність радіаційно-стимульованого впорядкування досягається при  $D=0,20$  Кл/кг. Запропонована фізична модель процесів радіаційно-індукованого впорядкування дефектної структури кристалів CdS.

**Ключові слова:** CdS, дефект, радіація, впорядкування, дифузія.

### Abstract

#### THE PHYSICAL MODEL OF RADIATION-STIMULATED ORDERING DEFECT STRUCTURE PROCESS IN SEMICONDUCTOR CRYSTALS

*B. V. Pavlyk, B. Z. Tsybuliak, M. V. Lyshak*

The effect of ionizing radiation influence on electro physical characteristics changes of surface and volume in CdS crystals has been studied. It is established that the range of defect structure reconstruction processes of crystals are simultaneously caused by X-ray irradiation. The efficiency of these processes depends on the temperature, the irradiation intensity, the value of absorbed dose. The maximum value of radiation stimulated ordering process achieved at  $D=0,20$  C/kg. The physical model of radiation-induced process of defect structure ordering in CdS crystals was proposed.

**Key words:** CdS, defect, irradiation, ordering, diffusion.

**Аннотация****ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛОВ***Б. В. Павлык, Б. З. Цибуляк, М. В. Лышак*

Исследовано влияние ионизирующего облучения на изменение электрофизических характеристик приповерхностного слоя и объема кристаллов CdS. Установлено, что под влиянием X-лучей в сульфиде кадмия одновременно происходит ряд процессов перестройки системы дефектов кристалла, эффективность которой зависит от температуры, интенсивности облучения, величины поглощенной дозы. Максимальная эффективность радиационно-стимулированного упорядочения достигается при  $D=0,20$  Кл/кг. Предложена физическая модель процессов радиационно-индуцированного упорядочения дефектной структуры кристаллов CdS.

**Ключевые слова:** CdS, дефект, радиация, упорядочения, диффузия.

Розвиток сучасної науки і техніки висуває на перший план завдання створення високочутливих сенсорів, працездатних в екстремальних умовах, зокрема за низьких температур, в радіаційних, механічних та магнітних полях. Хоча ціна таких пристроїв є високою, однак в процесі експлуатації, на жаль, відбуваються незворотні зміни їх характеристик, зумовлені деградаційними процесами в кристалах. Тому актуальною і своєчасною є постановка задачі як покращення експлуатаційних параметрів (точність, стабільність, довговічність) існуючих пристроїв, так і дослідження впливу іонізуючого опромінення на зміну електрофізичних характеристик перспективних напівпровідникових матеріалів та структур на їх основі, придатних для використання в сенсорній електроніці.

Відомо, що іонізуюче випромінювання спричиняє дифузію та перебудову електрично-активних домішок та структурних дефектів у об'ємі і приповерхневому шарі кристалів [1]. Це, у свою чергу, призводить до зміни електричних параметрів напівпровідникових пристроїв, виготовлених на їх основі. Дослідження радіаційно-індукованих змін електрофізичних властивостей кристалів дають можливість встановити механізми процесів перебудови системи дефектів як об'єму, так і приповерхневого шару напівпровідника.

Особливу зацікавленість викликає так званий ефект малих доз — радіаційно-індуковане покращення характеристик кристалів промислового використання та напівпровідникових бар'єрних структур на їх основі на початковій стадії опромінення [2]. Цей ефект найкраще проявляється у кристалах, які характеризують-

ся певною структурною недосконалістю, тобто, нерівноважних за структурно-домішковим фактором. Саме тому для приведення системи до рівноважного стану необхідними були, як правило, невеликі дози радіації. Створення послідовної теорії фізичних процесів радіаційно-стимульованого впливу на напівпровідникові матеріали сенсорної електроніки та їх чисельне моделювання є перспективними напрямками сучасних досліджень.

**Експериментальна частина**

Досліджено вплив X-променевого опромінення на зміну електрофізичних характеристик кристалічного сульфід кадмію. Цей напівпровідник окрім широкого використання як модельного матеріалу характеризується ще й високою концентрацією біографічних дефектів, які призводять до нестабільності параметрів пристроїв, виготовлених на базі CdS. Тому для вивчення радіаційно-індукованої перебудови дефектої структури напівпровідника були використано методики, які дозволяють проаналізувати зміни електрофізичних характеристик як в об'ємі так і в приповерхневому шарі (метод Холла, емісійна електронна спектроскопія базисних граней) кристалів.

Досліджено залежність інтенсивності емісії електронів з грані (0001) монокристалів CdS при охолодженні від 300 до 100 К від експозиційної дози X-опромінення ( $W$ , 5 мА, 60 кВ). Отримані залежності представлені на рис. 1. При охолодженні опромінених зразків дозою  $D \leq 0,13$  Кл/кг виявлено незначне (на 10-15%) зростання інтенсивності емісії електронів по-

рівняно із неопроміненими зразками у високотемпературній (200-260 К) та низькотемпературній (138-160 К) областях. Збільшення дози Х-променевого опромінення до 0,20 Кл/кг привело до зниження інтенсивності потоку електронів на 25-30% відносно вихідних зразків при охолодженні у діапазоні температур нижче 240 К. При досягненні дози 0,27 Кл/кг спостерігається ефект насичення і при подальшому збільшенні поглинутої дози опромінення величина густини потоку емітованих електронів змінюється незначно. На ділянці нагрівання зразка від  $T=100$  до 240 К спостерігається зниження інтенсивності емітованих електронів порівняно із неопроміненими зразками вже після дози опромінення 0,13 Кл/кг. З поверхні кристалів, опромінених дозою  $D=0,27$  Кл/кг, інтенсивність емісії електронів при підвищенні температури від 100 до 120 К стрімко зменшується, а при подальшому підвищенні температури до кімнатної спостерігається майже постійне значення інтенсивності емісії електронів з Cd-грані кристалів CdS в діапазоні температур від 120 до 270 К з наступним монотонним зменшенням потоку електронів. У всіх досліджуваних кристалічних зразках інтенсивність емісії електронів досягла фонового рівня в області кімнатних температур.

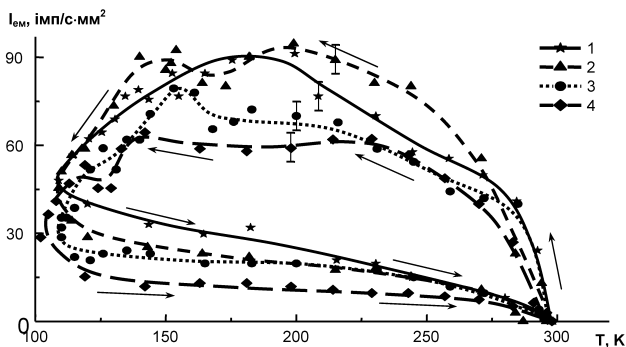


Рис. 1. Залежності інтенсивності емісії електронів з поверхні (0001)-грані монокристалів CdS від дози опромінення: 1 — до опромінення; 2 — 0,13 Кл/кг; 3 — 0,20 Кл/кг; 4 — 0,27 Кл/кг.

Аналіз літературних даних [3, 4, 5] свідчить, що під дією Х-променів в кристалах та структурах на їх основі відбувається одночасно низка процесів перебудови структурних дефектів: генерація радіаційних дефектів, радіаційно-стимульована дифузія, руйнування ростових преципітатів, гетерування точкових дефектів на дислокаціях, а також взаємодія радіаційних

і біографічних дефектів. Проте, залежно від величини дози іонізуючого опромінення та ряду зовнішніх факторів (температура, електромагнітні та механічні поля, тощо) відбувається домінування одних процесів над іншими. Це підтверджується експериментальними даними дослідження зміни холівських параметрів кристалів CdS під дією Х-променів (рис. 2).

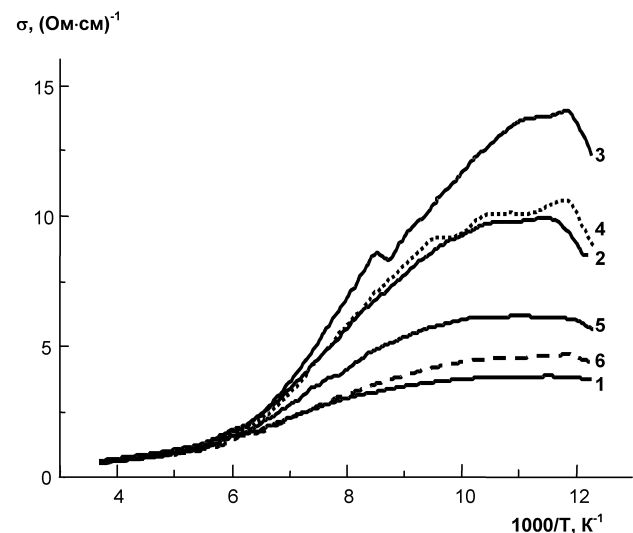


Рис. 2. Зміни температурної залежності холівської провідності електронів кристалів CdS під дією опромінення та їхня часова релаксація: 1 — до опромінення; 2 — 0,13 Кл/кг; 3 — 0,20 Кл/кг; 4 — 0,27 Кл/кг; 5 — через 72 год.; 6 — через 96 год.

З отриманих залежностей видно, що при малих дозах Х-опромінення ( $D \leq 0,20$  Кл/кг) простежується зростання провідності кристала при тому, що величина концентрації носіїв заряду залишалася незмінною (рис. 2 криві 1, 2, 3). При подальшому збільшенні дози опромінення вище значення  $D=0,20$  Кл/кг електропровідність кристала зменшується. Спостерігається також релаксація згаданих залежностей при витримці кристалів протягом трьох діб.

Одним з визначальних параметрів, який характеризує певні кінетичні ефекти в кристалах CdS є час життя дефектів  $\tau$  (зокрема, для нашого випадку — Cd). На основі отриманих експериментальних даних розраховано дозову залежність  $\tau$  (рис. 3). Як видно з графіка, існують дві чіткі області I (різке зниження  $\tau$ ) та II (його зростання з виходом на насичення). Межею чіткого розділу є точка мінімального значення часу життя дефектів, що відповідає максимуму ефекту радіаційно-стимульованого впорядкування ( $D=0,20$  Кл/кг).

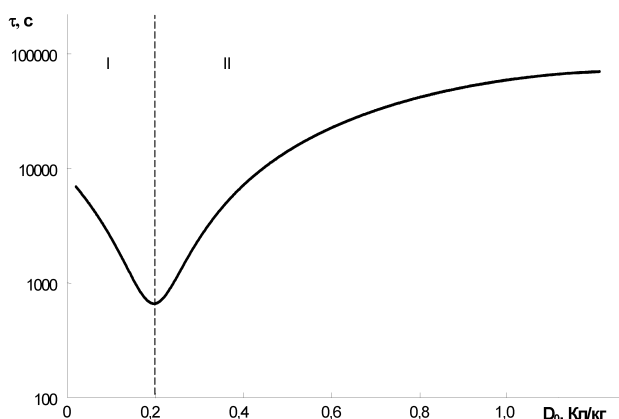


Рис. 3. Дозова залежність часу життя дефектів ( $Cd_i$ ) в кристалах CdS.

Отримані експериментальні дані дозволили нам запропонувати фізичну модель процесів радіаційно-індукованого впорядкування дефектної структури напівпровідникових кристалів CdS. Дана модель ґрунтується на тому твердженні, що під дією радіації в напівпровідникових кристалах можуть відбуватися процеси генерування та взаємодія радіаційних і структурних дефектів.

Відомо, що особливістю кристалів CdS є наявність в об'ємі високої концентрації надстехіометричних міжвузлових атомів  $Cd_i$  [6], які здатні утворювати комплекси (кластери, ростові преципітати), можуть ефективно дифундувати і локалізуватися в дефектних місцях приповерхневого шару кристала. Оскільки саме поверхня кристала характеризується значною концентрацією дефектів, то природно, що саме вона є ефективним стоком для міжвузлового кадмію.

Узагальнивши експериментальні залежності радіаційно-стимульованих змін холлівських параметрів, емісійних спектрів та часу життя дефектів можна стверджувати, що під дією іонізуючого опромінення з дозою, меншою певного “критичного” значення ( $D \leq 0,20 \text{ Кл/кг}$ ), відбуваються наступні процеси:

- вивільнення  $Cd_i$  внаслідок руйнування кластерів та інших комплексів у приповерхневому шарі кристала та на його поверхні. Це добре корелює із зростанням інтенсивності емісії електронів з базисної грані кристала (рис. 1);

- дифузія  $Cd_i$  до поверхні, дислокаційна структура якої є ефективним гетером міжвузлового кадмію, зумовлена зростанням коефіцієнта радіаційно-стимульованої дифузії дефектів

на 2-3 порядки. Зменшення концентрації  $Cd_i$  в об'ємі кристала на 1-1,5 порядки підтверджується отриманими холлівськими характеристиками (див. рис. 2);

- домінування ефективності процесів рекомбінації дефектів над генерацією в об'ємі кристала спостерігається при  $D \leq 0,20 \text{ Кл/кг}$ .

Збільшення дози іонізуючого опромінення понад  $0,20 \text{ Кл/кг}$  призводить до ефективнішого утворення радіаційних дефектів в об'ємі кристала та подальшого руйнування приповерхневих преципітатів. Зростання коефіцієнта радіаційно-стимульованої дифузії, значний градієнт концентрації міжвузлового кадмію на поверхні та в об'ємі, гетерування міжвузлових атомів на внутрішніх поверхнях лінійних дефектів в середині CdS, — стимулюють подальший відтік  $Cd_i$  в глибину кристала. Підтвердженням вищезгаданих процесів є: зниження інтенсивності емісії електронів з поверхні зразка, зменшення провідності та рухливості носіїв заряду, зростання часу життя  $Cd_i$  при  $D > 0,20 \text{ Кл/кг}$ .

## Висновки

Отже, встановлено, що під дією X-променів в кристалах відбувається одночасно низка конкуруючих процесів (генерація радіаційних дефектів, радіаційно-стимульована дифузія, руйнування ростових преципітатів, генерування точкових дефектів на дислокаціях, а також взаємодія радіаційних і біографічних дефектів) ефективність яких залежить від температури, інтенсивності опромінення, величини поглинутої дози та вихідної ступені досконалості кристалів. Нами запропонована фізична модель процесу радіаційно-індукованого впорядкування дефектної структури. Суть моделі полягає у врахуванні різкого (2-3 порядки) збільшення коефіцієнта дифузії точкових дефектів в полі радіації, локалізації електрично активних дефектів на дислокаціях та перебудові наявних структурних дефектів з врахуванням відповідних змін в йонній та електронній підсистемах кристала.

Для побудови завершеної фізичної і математичної моделей радіаційного впорядкування необхідні додаткові дослідження.

Ця робота виконана при фінансовій підтримці Міністерства освіти і науки України (№ДР0106U001318).

### Література

1. Борковская О.Ю., Дмитрук Н.Л., Литовченко В. Г., К модели эффекта радиационно-стимулированного упорядочения в полупроводниках  $A^3B^5$  // Физика и техника полупроводников. — 1989. — Т.23, В.2. — С.207-212.
2. Павлик Б., Цибуляк Б., Клочан О., Радіаційно-індуковане поліпшення електрофізичних параметрів кристалів CdS та поверхнево-бар'єрних структур на їх основі // Вісник Львівського ун-ту, сер. фіз. — 2000. — В.33. — С. 139-143.
3. Болотов В.В., Коротченко В.А., Мамонтов А.П. и др., Радиационные дефекты в полупроводниках при малых дозах облучения частицами // Физика и техника полупроводников. — 1980. — Т.14, В.11. — С.2257-2260.
4. Корсунская Н.Е., Торчинская Т.В., Маркевич И. В. и др., Стимулированная УФ-облучением диффузия дефектов в CdS// Украинский физический журнал. — 1983. — Т.26, В.7. — С.851-854.
5. Борковская О.Ю., Дмитрук Н.Л., Конакова Р.В. и др., Влияние гамма-облучения на характеристики фотопреобразования барьерных структур металл-арсенид галия с текстурированной границей раздела // Журнал технической физики. — 2002. — Т.72, В.6. — С.44-49.
6. Физика соединений  $A_2B_6$  / Под ред. А.Н. Георгобиани, М.К. Шейнкмана. — М.: Наука, 1988. — 320 с.