

ВПЛИВ Х-ОПРОМІНЕННЯ НА ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ ГЕТЕРОСТРУКТУР ОКСИД–InSe

О. А. Політанська

Чернівецьке відділення Інституту проблем матеріалознавства НАН України,
вул. І.Вільде, 5, Чернівці, 58001
e-mail: chimsp@unicom.cv.ua

Встановлено вплив характеристичного Х-випромінювання на фотоелектричні параметри гетероструктур власний оксид – *p*-InSe, який проявляється в зростанні потенціального бар'єру. Показано, що зі збільшенням експозиції опромінення величина бар'єру наближається до максимально можливого значення – половини ширини забороненої зони базового матеріалу. Досліджено вольтамперні, навантажувальні й спектральні характеристики гетероструктур, механізми струмопроходження через потенціальний бар'єр до й після Х-опромінення. Отримані результати пояснюються зміною концентрації акцепторів у InSe після опромінення та зростанням рекомбінаційних процесів у механізмі струмопереносу.

Вступ

Однією з важливих проблем напівпровідникового матеріалознавства є пошук радіаційно стійких матеріалів та дослідження поведінки приладів на їх основі при роботі в умовах жорсткого електромагнітного випромінювання. Одними з таких матеріалів можуть бути шаруваті кристали групи $A^{III}B^{VI}$, яскравим представником яких є селенід індію. Особливий інтерес представляє вивчення впливу малих доз радіації на властивості гетеропереходів з InSe.

Більшу частину робіт по впливу Х-опромінення на селенід індію, які можна знайти в літературі, виконано для чистих кристалів [1], а вивчення його дії на гетероструктури (ГС) взагалі носить винятковий характер [2]. Дослідження радіаційної стійкості шаруватих кристалів $A^{III}B^{VI}$ показують, що InSe та фотодіоди на його основі в умовах нейтронного, протонного і гамма-випромінювання не тільки не втрачають фоточутливості, а навіть збільшують її [3–5]. Це вказує на те, що структура потенціального бар'єра фотоприймачів не руйнується і вони можуть працювати в умовах проникаючої радіації. Однак мож-

ливості напівпровідникових сполук $A^{III}B^{VI}$ щодо стійкості до іонізуючого випромінювання все ще не розкриті й потребують детального вивчення.

У даній роботі досліджувався вплив малих доз Х-опромінення на кристали InSe з метою вивчення закономірностей поведінки структур на їх основі. Метою було дослідження дії характеристичного Х-випромінювання на фото- та електричні характеристики гетеропереходів власний оксид – *p*-InSe.

Методика експерименту

Особливістю шаруватих кристалів є велика кількість власних структурних дефектів, з якими пов'язують політипізм та однірну структурну неупорядкованість, що відіграє велику роль у формуванні фізичних властивостей кристалів [6]. Ці дефекти обумовлюють низьку рухливість і дифузійну довжину носіїв заряду в напрямку кристалографічної вісі *C*. Тому додаткове створення радіаційних дефектів кількісно повинно бути набагато меншим, ніж густина власних дефектів у напівпровіднику, що й відбивається на

радіаційній стійкості шаруватих кристалів.

Кристали InSe вирощували вертикальним методом Бріджмена з попередньо синтезованих зливків. Діркова провідність кристалів отримувалась при легуванні їх домішкою кадмію. Однорідність і електричні параметри монокристалів перевірялися дослідженням кінетичних коефіцієнтів у різних частинах зливку. Концентрація та рухливість носіїв заряду при кімнатній температурі становили відповідно $2,0 \cdot 10^{14}$ – $3,0 \cdot 10^{15}$ см^{-3} та 35 – 50 $\text{см}^2\text{V}^{-1}\text{с}^{-1}$. Шарувата структура кристалів моноселеніду індію InSe забезпечує їх перевагу в порівнянні з іншими напівпровідниками при виготовленні якісних ГС. Пластинки товщиною 300 мкм сколювалися вздовж площини зливку (001), при цьому отримувалися ідеальні, дзеркальні поверхні, що не потребували жодних підготовчих обробок при формуванні *p-n*-переходу. Структури формувалися шляхом термічного окислення підкладок із середніми розмірами $4 \times 4 \times 0,3$ мм^3 на повітрі при температурі 450°C та 96-годинній витримці. Такі режими вибирались з метою отримання ГС із найкращими фотоелектричними параметрами [7]. Після окислення зразок повторно сколювався, щоб окисна плівка залишилась лише з одного боку. Всі інші грані обрізувалися. Для омичних контактів використовувався чистий індій.

Рівномірне опромінення зразків паралельно осі *C* кристала проводилося при кімнатній температурі на установці типу ДРОН випромінюванням $\text{Ag } K_\alpha$ з енергією кванта 22 кеВ. Для кожного зразка загальний час експонування T_e становив 120 годин, а доза послідовно накопичувалась з кроком по 40 годин.

Спектри фотоструму ГС до і після опромінення досліджувались при кімнатній температурі при допомозі монохроматора МДР-3 з роздільною здатністю 26 Å. Усі спектри нормувалися відносно кількості падаючих фотонів.

Для визначення механізму струмопереносу через бар'єр досліджувались вольтамперні характеристики (ВАХ).

Навантажувальні характеристики отримувалися при освітленні вольфрамовою лампою розжарювання з густиною потоку випромінювання $P = 100$ $\text{мВт}/\text{см}^2$.

Вплив X-опромінення на кристали InSe:Cd також досліджувався методом двокристалного рентгенівського спектрометра (ДКС), який є одним з найбільш універсальних неруйнівних методів, точність якого по відносній зміні параметра кристалічної ґратки може досягати $\Delta a/a \approx 10^{-6}$. [8].

Обговорення результатів

На спектральних залежностях фотоструму основні зміни помітні для енергій фотонів $h\nu > 2,0$ еВ (рис.1). У порівнянні з неопроміненим зразком квантова ефективність фотоструму в цій області після першої дози опромінення дещо спадає. При цьому основний максимум не зміщується, а короткохвильовий спад фотоструму пов'язується із зростанням швидкості поверхневої рекомбінації носіїв. Подальше послідовне опромінення вже не впливало на спектральні характеристики гетеропереходів.

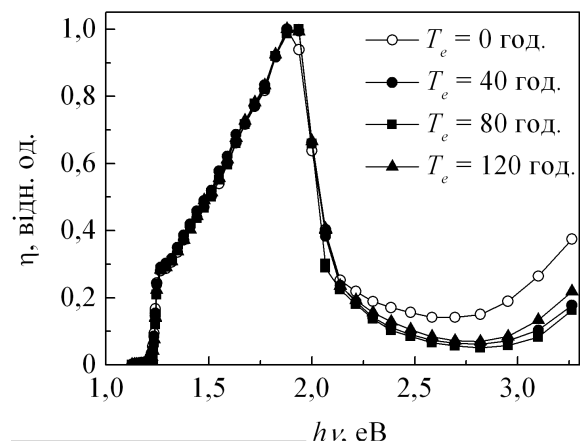


Рис. 1. Залежність відносної квантової ефективності фотоструму η від $h\nu$ для ГС оксид-*p*-InSe до (○) і після X-опромінення при експозиції зразків відповідно 40 (●), 80 (■) та 120 (▲) годин. $T=300$ К.

Початкова ділянка ВАХ фотодіодів (рис.2) при малих прямих зміщеннях зростає за відомим експоненціальним законом:

$$J = J_s \left[\exp\left(\frac{qU}{nkT}\right) - 1 \right]. \quad (1)$$

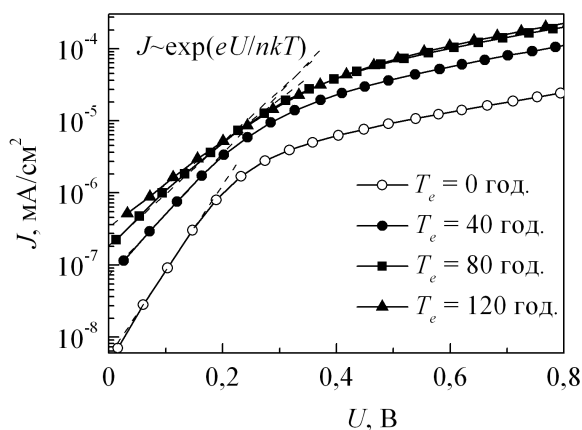


Рис.2. Прямі гілки ВАХ для ГС оксид-*p*-InSe до (○) і після X-опромінення при експозиції зразків відповідно 40 (●), 80 (■) та 120 (▲) годин, побудовані у напівлогарифмічному масштабі. $T=300$ К.

При напругах більших за $\sim 0,4$ В спостерігається відхилення ВАХ від закону (1). Це пов'язано з існуванням досить великого послідовного опору R_s і, як

наслідок, частина напруги падає не на самого бар'єрі, а на опорі підкладки базового матеріалу. Коефіцієнт випрямлення неопромінених ГС при 1,5 В становив близько 600.

Після експозиції X-променями спостерігається зміна експоненціальної залежності струму від напруги і, як наслідок, механізмів проходження струму через потенціальний бар'єр – надбар'єрний (діодний коефіцієнт $n \approx 1,4$) переходить у рекомбінаційний ($n \approx 2$) при $T_e = 40$ годин і тунельно-рекомбінаційний ($n \approx 2,4$ і $2,9$) для відповідно $T_e = 80$ і 120 годин. Це вказує на зростаючу роль рекомбінаційних процесів у механізмах струмопроходження через бар'єр ГС. При цьому незначна частка цих процесів пов'язується з поверхневими ефектами на межі розділу напівпровідників.

Після опромінення для кращих зразків зафіксовано зростання U_{xx} на 40 % та зменшення $J_{кз}$ на 30 % (табл. 1). Слід зазначити, що дослідження ВАХ зразків через 10 та 20 днів після загального часу експонування виявило стабільність і відтворюваність результатів.

Таблиця 1. Фотоелектричні параметри ГС оксид-*p*-InSe до і після X-опромінення.

оксид- <i>p</i> -InSe	Зразок №1				Зразок №2				Зразок №3			
	0	40	80	120	0	40	80	120	0	40	80	120
Час експозиції, год.	0	40	80	120	0	40	80	120	0	40	80	120
U_{xx} , В	0,48	0,56	0,58	0,6	0,43	0,57	0,58	0,6	0,45	0,55	0,57	0,59
$J_{кз}$, mA/cm ²	7,2	5,5	4,5	4,6	5,0	3,3	2,9	2,7	5,0	3,6	3,2	3,2
n	1,4	1,5	2,0	2,4	1,4	2,0	2,4	2,9	1,3	1,4	1,5	1,55

Зміна контактної різниці потенціалів досліджуваних ГС, а отже і ріст U_{xx} , відбувається таким чином. Спеціально легований InSe являє собою компенсований напівпровідник із багаторівневою енергетичною структурою забороненої зони [9]. Крім донорних та акцепторних рівнів, існують ще й пасткові рівні, що залягають поблизу середини забороненої зони напівпровідника і причиною яких є дефекти упаковки шарів [10]. Легування InSe акцепторною домішкою у малій кількості призводить до зростання питомого опору. Із зростанням вмісту домішки, коли її концентрація перевищує концентрацію власних донорів, відбувається зміна типу провідності напівпровідника. Для подальшого зменшення питомого опору концентрацію домішки потрібно збільшувати. Перенасичення домішковими атомами спричинює їх різне кристалічне розташування. Вони можуть бути як атомами заміщення, так і міжвузловими атомами.

При взаємодії X-випромінювання з напівпровідником відбувається іонізація не лише валентних електронів, а й електронів внутрішніх оболонок атомів [11]. У результаті цього кулонівська взаємодія між атомами зростає, при цьому утворюються додаткові дефекти у вигляді пар Френкеля. Наслідком такої „перекомпенсації” напівпровідника є зміщення рівня Фермі таким чином, що контактна різниця потенціалів гетероструктур зростає. Послідовне збільшення експозиції опромінення веде до стабілізації цього рівня і незмінності U_{xx} .

На фоні великої кількості власних дефектів утворення нових практично не впливає на структуру монокристала InSe: Cd, що підтверджується методом ДКС. Так, криві гойдання для шаруватого напівпровідника до і після опромінення майже ідентичні.

Покращення певних фотоелектричних параметрів гетероструктур та послідовна стабілізація свідчить про можливість їх використання в умовах підвищеної радіації.

Література

1. Р.А.Акопян, В.М.Журавлев, Изв. АН СССР, Неорганические материалы 19, 913 (1983).
2. Z.D.Kovalyuk, V.M.Katerynychuk, O.A.Politanska *et al.*, Abstr. E-MRS Spring Meeting 2005, Symposium O (Strasbourg, France, 2005), p.B4.
3. Р.Ю.Алиев, К.А.Аскеров, Прикладная физика 3, 78 (1999).
4. З.Д.Ковалюк, В.Н.Катеринчук, О.А.Политанская и др., Письма ЖТФ 31, 1 (2005).
5. К.А.Аскеров, А.З.Абазова, Ф.К.Исаев, Прикладная физика 4, 94 (2004).
6. C.De Blasi, D.Manno, A.Rizzo, J. Cryst. Growth 100, 347 (1990).
7. В.Н.Катеринчук, З.Д.Ковалюк, ФТП 38, 417 (2004).
8. В.А.Ушаков, Прецизионный двухкристалльный рентгеновский спектрометр для получения кривых качания, (ИЯФ, Новосибирск, 1980).
9. S.Shigetomi, H.Ohkubo, T.Ikari, J. Phys. Chem. Solids 51, 92 (1990).
10. A.Segura, M.C.Martinez-Tomas, V.Mari *et al.*, Appl. Phys. A 44, 249 (1987).
11. В.С.Вавилов, Н.П.Кекелидзе, Л.С.Смирнов, Действие излучений на полупроводники (Наука, Москва, 1988)

X-RAY IRRADIATION INFLUENCE ON PHOTOELECTRICAL PARAMETERS OF OXIDE–InSe HETEROSTRUCTURES

O.A.Politanska

Chernivtsi Department of Institute for Problems of Materials Science,
Ukr. Nat. Acad. Sci., Iryna Vilde St. 5, Chernivtsi, 58001
e-mail: chimsp@unicom.cv.ua

Influence of characteristic X-ray irradiation on photoelectrical parameters of intrinsic oxide – *p*-InSe heterostructures is shown to be revealed in the potential barrier increase. With the irradiation dose increase the barrier value approaches the greatest possible value – half of the base material bandgap. Current-voltage, loading and spectral characteristics of the heterostructures are studied as well as the mechanisms of the current transfer through the potential barrier before and after the X-ray irradiation. The obtained results are explained by the change of acceptor concentration in InSe after the irradiation and the increase of the contribution of recombination processes into the current transfer mechanism.