

Р.Ю. Петрусь

## Створення та фотоелектричні властивості структур на основі багатокomпонентних халькогенідів

Національний університет «Львівська політехніка»,  
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна

Методами спрямованої кристалізації та хемічних транспортних реакцій удосконалено технології вирощування монокристалів  $\text{InSe}$ ,  $\text{In}_2\text{Se}_3$  та твердих розчинів  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  ( $x=0,00-0,70$ ), визначено елементний склад, досліджено структуру та фізичні властивості отриманих монокристалів. Запропоновано нову технологію формування енергетичного бар'єру методом термообробки вирощених кристалів, і вперше створено випрямляючі фоточутливі гетероструктури  $n\text{-Ox}/n\text{-InSe}$ ,  $\text{Ox}/\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  ( $x=0,00-0,70$ ). Проаналізовано стаціонарні вольт-амперні характеристики і спектри відносної квантової ефективності вперше одержаних гетероструктур у природньому (а для  $n\text{-Ox}/n\text{-InSe}$  і в лінійно-поляризованому) випромінюванні. Показано, що в створених гетероструктурах спостерігається фоточутливість у широкій спектральній смузі, а за скісного падіння лінійно-поляризованого випромінювання виникає фотоплекроїзм. Уперше створено бар'єри Шоттки  $\text{In}/n\text{-In}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{Al}/n\text{-In}_2\text{Se}_3$  та  $\text{In}/\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ , які фоточутливі у широкому інтервалі енергій падаючих фотонів (1–3,8 еВ, 300 К). Аналіза спектрів фоточутливості створених структур дозволила визначити характер міжзонних оптичних переходів, висоту енергетичних бар'єрів і енергії міжзонних оптичних переходів кристалів  $\text{In}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  ( $x=0,00-0,70$ ). Запропоновано і вперше отримано методом електричного розряду точкові структури на основі монокристалів  $\text{InSe}$  та твердих розчинів  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  ( $x=0,00-0,70$ ). Досліджено стаціонарні вольт-амперні характеристики та фоточутливість структур  $\text{TK}/n\text{-InSe}$ ,  $\text{TK}/\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  ( $x=0,00-0,70$ ). Виявлено широкосмуговий характер і екситонна особливість у спектрах фоточутливості структур  $\text{TK}/n\text{-InSe}$ . Зроблено висновок про можливість застосування нових структур як широкосмугових фотоперетворювачів оптичного випромінювання та у створенні приладів магнітної фотоелектроніки на основі твердих розчинів  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ .

**Ключові слова:** селеніди індію, напівпровідникові тверді розчини, спрямована кристалізація, хемічні транспортні реакції, фотоперетворюючі структури, бар'єри Шоттки, гетероструктури.

R. Yu. Petrus'

## Fabrication and Photoelectric Properties of Structures on the basis of Multicomponent Chalcogenides

Lviv Polytechnic National University,  
12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine

The technology of crystal growth by directed crystallization and chemical transport reactions of  $\text{InSe}$ ,  $\text{In}_2\text{Se}_3$  single crystals and  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  ( $x=0,00-0,70$ ) solid solutions crystals was improved. The crystal composition, structure and physical properties were investigated. The new technology of energy barrier fabrication by thermal air treatment of growth crystals was proposed. By the first time the  $n\text{-Ox}/n\text{-InSe}$ ,  $\text{Ox}/\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  ( $x=0,00-0,70$ ) heterostructures with rectifying and photosensitive properties was fabricated. The current-voltage characteristics and spectra of photoconversion relative quantum efficiency for unpolarized and for  $n\text{-Ox}/n\text{-InSe}$  in linearly-polarized light of fabricated heterostructures was investigated. The wide-band photosensitivity and the photopleochroism spectral dependence for the oblique of incidence of linearly-polarized light in created heterojunctions is observed. By the first time fabricated  $\text{In}/n\text{-In}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{Al}/n\text{-In}_2\text{Se}_3$  and  $\text{In}/\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  Schottky barriers photosensitive to incident photons in a wide energy region (1–3,8 eV, 300 K). The nature of the interband photoactive absorption is investigated. The values of the energy barrier height, the energy of interband optical transitions for  $\text{In}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  crystals was determined. The point structures on the  $\text{InSe}$  single crystals and  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  ( $x=0,00-0,70$ ) solid solution crystals were fabricated by electric discharge method. The current-voltage characteristics and photosensitivity of created by the first time structures (Spot weld)/ $n\text{-InSe}$ , (Spot weld)/ $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  ( $x=0,00-0,70$ ) was investigated. The energy band and energy position of exciton peculiarity of photosensitivity spectrum of obtained structures was discussed. The fabricated structures can be applied in wide-range photoconverters of optical radiation and  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  solid solutions crystals in devices of magnetic photoelectronic.

**Key words:** indium selenides, semiconductor solid solutions, directed crystallization, chemical transport reactions, photoconverter, Schottky barrier, heterojunction.

Стаття постуила до редакції 21.03.2011; прийнята до друку 20.04.2011.

## Вступ

**1. Вирощування досконалих однорідних монокристалів** із заданими і відтвореними властивостями – актуальна проблема напівпровідникового матеріалознавства. Значний практичний інтерес становлять такі напівпровідникові матеріали  $A^{III}B^{VI}$  як  $InSe$ ,  $In_2Se_3$  та напівмагнітний напівпровідник  $Cd_{1-x}Mn_xTe$ .

**2. Широкошмугові фоточутливі поверхнево-бар'єрні структури** на основі названих матеріалів – перспективні фотоперетворювачі внаслідок чутливості до оптичного випромінювання у широкому інтервалі (від інфрачервоного до ультрафіолетового) енергії світлових квантів, характеризуються достатньо високим коефіцієнтом корисної дії, прості і дешеві у виготовленні. Довгохвильовий край фоточутливості перетворювачів світла визначається, в основному, енергією міжзонних переходів фотоперетворюючого поглинаючого напівпровідника, а короткохвильовий – обмежується шириною забороненої зони матеріалу “вікна” за умови досконалого формування межі розділу фаз.

**3. За літературними даними** проведена аналіз діаграми стану системи  $In-Se$  та фазової діаграми  $CdTe-MnTe$ , яка дозволила виявити: особливості вирощування монокристалів селенідів  $InSe$ ,  $In_2Se_3$  та твердих розчинів  $Cd_{1-x}Mn_xTe$ , їх кристалічної і зонної структури; особливості утворення власного оксиду  $InSe$  та твердих розчинів  $Cd_{1-x}Mn_xTe$ , структури їх поверхонь, характерних розмірів, властивостей та технології одержання; гетероструктури (ГС) власний оксид/ $InSe$  та бар'єрів Шоттки  $Me/InSe$ .

$CdTe$  і  $MnTe$  утворюють обмежений ряд твердих розчинів ( $x \leq 0,77$ ). Стала кристалічної ґратки твердого розчину  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  змінюється лінійно зі зміною складу твердого розчину і може бути розрахована за законом Вегарда:

$$a_{0,CdMnTe} = (1-x) \cdot a_{0,CdTe} + x \cdot a_{0,MnTe} \quad (1)$$

лінійною інтерполяцією між значеннями сталей ґраток відповідних бінарних напівпровідників. Зміна ширини забороненої зони зі зміною вмісту мангану у першому наближенні також описується лінійною залежністю. Залежність ширини забороненої зони  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  від вмісту мангану визначається співвідношенням:

$$E_g(x) = (1,526 + 1,316 \cdot x) \text{ eV} \quad (300 \text{ K}) \quad (2)$$

**4. Прямозонний напівпровідник  $InSe$**  гексагональної модифікації ( $E_g = 1,25 \text{ eV}$ ,  $T = 300 \text{ K}$ ) належить до групи сполук типу алмаза і тому може задовольнити вимоги щодо його застосування у високоефективних радіаційностійких фотоперетворювачах, які забезпечують високу квантову ефективність фотоперетворення природного і лінійно поляризованого випромінювань. Специфіка кристалічної будови  $InSe$  – шаруватість за площиною (001). Це дозволяє методом розщеплення з монокристалічного

зливка одержувати достатньо тонкі і досить гнучкі платівки з дзеркально рівними і досконалими поверхнями. Площа такого сколу може сягати декількох квадратних сантиметрів.

Напівмагнітний напівпровідник телуриду кадмію-мангану ( $Cd_{1-x}Mn_xTe$ ) привертає увагу дослідників тим, що дає змогу шляхом зміни відносного вмісту у ньому мангану змінювати його ширину забороненої зони. Крім того, атоми  $Mn$  вбудовуються у вузли кристалічної ґратки  $CdTe$ , не виходячи у міжвузловини, і утворюють „ідеальний” напівпровідниковий твердий розчин  $Cd_{1-x}Mn_xTe$ . Унаслідок цього  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  перспективний для практичного використання в оптоелектронних і магнітоелектричних приладах.

Для забезпечення умов створення широкошмугових фотоперетворюючих структур, у роботі функцію «вікна» виконували широкозонні власні оксиди (Ох)  $InSe$  або  $Cd_{1-x}Mn_xTe$ , а також напівпрозорі плівки металів  $In$  та  $Al$ . Вибір  $In$  зумовлений намаганням мінімізувати термічний вплив на властивості напівпровідників у процесі створення структур, а вибір  $Al$  – наблизитись до промислової технології.

Роботу присвячено одержанню масивних монокристалів селенідів індію –  $InSe$ ,  $In_2Se_3$  ( $A^{III}B^{VI}$ ) та твердих розчинів  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  ( $A^{II}MnB^{VI}$ ), створенню фоточутливих структур на основі вирощених монокристалів та комплексному дослідженню їх електрофізичних та фотоелектричних властивостей.

**Мета роботи** – розвиток технологій вирощування монокристалів халькогенідів  $InSe$ ,  $In_2Se_3$ , багатокомпонентних твердих розчинів  $Cd_{1-x}Mn_xTe$ , створення на їх основі різноманітних широкошмугових фотоперетворюючих поверхнево-бар'єрних структур та комплексне дослідження фізичних властивостей цих матеріалів і структур на предмет оцінки можливостей їх практичного використання.

**Для цього необхідно було вирішити такі завдання:**

1. Вирощування монокристалів  $InSe$ ,  $In_2Se_3$ ,  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  з використанням парофазного методу та методу спрямованої кристалізації.

2. Дослідження фізичних властивостей вирощених монокристалів.

3. Відпрацювання технології процесів термічного окиснення на повітрі монокристалів селеніду індію ( $InSe$ ) та твердого розчину  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  з різним вмістом мангану для одержання високоякісних плівок власного оксиду для їх використання як елементів гетероструктур (ГС).

4. Відпрацювання процесів електричного розряду між тонкими дротинками ( $Ag$ ,  $Pt$ ) для створення точкових зварних контактів (надалі – ТК) до монокристалів селеніду індію ( $InSe$ ) і твердого розчину  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  ( $x = 0,00-0,70$ ) та формування у такий спосіб фоточутливих точкових структур  $TK_{Ag, Pt/n-InSe}$  та  $TK_{Ag, Pt/Cd_{1-x}Mn_xTe}$ .

5. Формування фоточутливих бар'єрів Шотткі In/In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, Al/In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> та In/Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te, на основі монокристалів In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> та магнітного твердого розчину Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te з різним вмістом мангану.

6. Розроблення методики та формування фоточутливих гетероструктур *n*-Ox/*n*-InSe та Ox/Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te (*x*=0,00–0,70) із використанням попередньо створених плівок власних оксидів.

7. Комплексне дослідження електро-фізичних та фотоелектричних властивостей створених різнотипних структур на селенідах індію InSe, In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> та магнітних твердих розчинах Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te (*x*=0,00–0,70).

**Об'єкт дослідження** – поверхнево-бар'єрні структури (площинні та точкові, бар'єри Шотткі) та окисні гетероструктури, які створені на основі халькогенідів InSe, In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, та твердих розчинів Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te.

**Предмет дослідження** – фізичні властивості створених різними методами (окиснення поверхні, вакуумне осадження, електричний розряд між тонкими дротинками) поверхнево-бар'єрних структур на основі багатокомпонентних халькогенідів InSe, In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> і магнітних твердих розчинів Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te та фізичні явища в них.

## I. Експериментальна частина

**Методи дослідження.** Для досягнення мети та вирішення поставлених завдань у роботі проводилися експериментальні дослідження технологій вирощування (метод хемічних транспортних реакцій та метод спрямованої кристалізації) монокристалів InSe, In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> і твердих розчинів Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te.

Дослідження фізичних властивостей вирощених монокристалів базувалися на: аналізі температурних залежностей питомої електропровідності і коефіцієнта Холла (метод ефекту Холла); питомого опору (чотиризондовий метод), типу провідності (метод термо-ЕРС); структурних досліджень (метод X-променевої дифрактометрії); контролі елементного складу і гомогенності вирощених монокристалів (метод мікрозондової X-променевої аналізи).

Досліджено процеси формування поверхнево-бар'єрних структур (метод термічного окиснення монокристалічних платівок; метод електричного розряду; магнетронне та термічне вакуумне осадження).

Крім цього, досліджено поверхнево-бар'єрні структури (метод вольт-амперних характеристик) і спектральний розподіл відносної квантової ефективності фотоперетворення (методи фотоелектричної та оптичної спектроскопії).

Комп'ютерне моделювання і опрацювання результатів експериментів виконано за допомогою прикладних математичних пакетів.

## II. Результати та обговорення

### 2.1. Вирощування монокристалів InSe, In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, твердих розчинів Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te та методики дослідження їх властивостей.

1. Цей розділ присвячено опису методик вирощування названих кристалів із парової фази – методом хемічних транспортних реакцій (ХТР) та методом спрямованої кристалізації з розтопів стехіометричного складу та опису методики досліджень кристалічної структури, елементного складу та ступеня гомогенності, електропровідності, ефекту Холла, одержання вольтамперних характеристик (ВАХ), визначення відносного квантового виходу фотоперетворення, коефіцієнта неідеальності ВАХ та струму насичення поверхнево-бар'єрних структур [1–26].

2. Основна особливість контролю процесу вирощування з парової фази полягала у використанні розробленого автором комп'ютерного регулятора температури, який дозволяв програмовано встановлювати та змінювати температуру нагрівача ростової установки під час ростового експерименту.

3. Концентрацію переносника NH<sub>4</sub>I для вирощування монокристалів методом ХТР розраховували на основі рівняння стану ідеального газу та даних щодо об'єму ростової ампули. Найбільші за величиною парціальні тиски компонент, які вносять вагомий вклад у парову фазу, вибирали на основі аналізу складу парової фази. Розвинута технологія ХТР забезпечила одержання структурно досконалих однорідних монокристалів селенідів індію InSe, In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> та твердих розчинів Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te і дозволяла проводити “вільний ріст” монокристалів без контакту зі стінками ростового контейнера за температур, значно нижчих, ніж температури топлення названих сполук. Описані [1–26] схеми температурних полів, реалізованих у процесі ростових експериментів, конструктивні особливості ростових ампул, способи їх приготування та проведення ростових експериментів.

### 2.2. Створення поверхнево-бар'єрних структур на основі селенідів індію, їх електрофізичні та фотоелектричні властивості.

1. У [1–26] описані технології виготовлення площинних фоточутливих ГС *n*-Ox/*n*-InSe, структур In/*n*-In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, Al/*n*-In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> та точкових ГС ТК<sub>Ag</sub>/*n*-InSe, ТК<sub>Pd</sub>/*n*-In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> на основі селенідів індію *n*-InSe і *n*-In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> та досліджено фоточутливість реалізованих поверхнево-бар'єрних структур.

2. Як вихідний матеріал для формування ГС використано тонкі (близько 50 мкм) платівки монокристалічного *n*-InSe, одержані сколюванням на повітрі вирощених методом спрямованої кристалізації однорідних зливків *n*-InSe, а також платівки *n*-InSe, які вирощені методом ХТР. Концентрація вільних електронів вихідних платівок становила  $n \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , а холлівська рухливість уздовж шарів  $\mu_1 \approx 150 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  ( $T=300 \text{ К}$ ). Обидві

площини як сколених, так і отриманих методом ХТР платівок InSe дзеркально-рівні і не потребують механічної та хемічної підготовки для формування на їх основі ГС.

3. Відпрацьована технологія термообробки платівок  $n$ -InSe у нормальних атмосферних умовах дозволила одержати на їх поверхні тонкі ( $h \approx 0,5$  мкм) плівки оксиду селеніду індію. Встановлено, що плівки Ox в усіх випадках відносяться до електронного типу провідності. Для створення омичних контактів до  $n$ -InSe і плівки оксиду використано чистий індію. У такий спосіб сформовано ГС  $n$ -Ox/ $n$ -InSe із середніми розмірами близько  $10 \times 10 \times 0,02$  мм. Розроблена технологія створення ГС із використанням плівок оксиду селеніду індію дала змогу значно здешевити та спростити технологічний процес, що важливо для упровадження в масове виробництво.

4. На однорідних монокристалічних платівках  $n$ -In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> уперше створено інший тип поверхнево-бар'єрних fotocутливих структур – бар'єри Шотткі In/ $n$ -In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, Al/ $n$ -In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, які формували методом вакуумного термічного напылення напівпрозорого шару металу (In°, Al°) на свіжосколоту дзеркальну рівну поверхню (0001) In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>.

5. Уперше запропоновано і відпрацьовано технологію створення точкових контактів до монокристалічних платівок  $n$ -InSe із використанням техніки електричного розряду між тонкими (10–50 мкм) дротинками (Ag, Pt) у повітряному середовищі і в такий спосіб створено точкові ГС ТК<sub>Ag</sub>/ $n$ -InSe, ТК<sub>Pt</sub>/ $n$ -InSe. Стационарні ВАХ поверхнево-бар'єрних структур In/ $n$ -In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, Al/ $n$ -In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, ТК<sub>Ag</sub>/ $n$ -InSe та ТК<sub>Pt</sub>/ $n$ -InSe, виявили чітке випрямлення. Пропускний напрям відповідав прикладенню негативної полярності зовнішнього зміщення до платівки напівпровідника і у всіх випадках узгоджувався з полярністю їх фотоЕРС.

6. Під час освітлення оксидних структур  $n$ -Ox/ $n$ -InSe світловим зондом ( $d \approx 50$  мкм) природнього випромінювання у різних точках fotocутливої поверхні оксиду спостерігали фотovoltaїчний ефект, полярність якого відповідала напрямку випрямлення. Для кращих ГС фотоЕРС  $U_{oc} \approx 20$  мВ, а фотострум короткого замикання  $I_{sc} \approx 0,1$  мА. Максимальна вольтова fotocутливість ізотипних ГС  $n$ -Ox/ $n$ -InSe за  $T=300$  К дорівнювала  $S_U^{max} \approx 500$  В/Вт. На рис. 1 зображено типові залежності спектрального розподілу відносної квантової ефективності фотоперетворення  $\eta(\hbar\omega)$  ГС  $n$ -Ox/ $n$ -InSe. Значення стрімкості довгохвильового краю  $S = \partial(\ln\eta)/\partial(\hbar\omega)$  становить приблизно  $60 \text{ eV}^{-1}$ , що відповідає прямим міжзонним переходам в InSe, а його значення  $1,13 \text{ eV}$  – ширині забороненої зони InSe. За енергії фотонів  $\hbar\omega > 1,2 \text{ eV}$  (освітлення з боку платівки InSe, крива 2 на рис. 1) настає різкий короткохвильовий спад fotocутливості ГС  $n$ -Ox/ $n$ -InSe, що викликано швидким зростанням поглинання випромінювання в  $n$ -InSe, яке зумовлене увімкненням

механізму прямих міжзонних переходів. Це супроводжується швидким віддаленням зони фотогенерування пар від активної ділянки гетеропереходу, що і зумовлює спостережуваний різкий спад фотоструму. Якщо ГС  $n$ -Ox/ $n$ -InSe освітлювати з боку плівки  $n$ -Ox, то відбувається збільшення напівширини спектра  $\eta(\hbar\omega)$  від  $\delta_{1/2} = 60 \text{ meV}$  до  $\delta_{1/2} \approx 900 \text{ meV}$  (за товщини підкладок  $h \approx 20\text{--}30$  мкм) і спектри  $\eta(\hbar\omega)$  стають широкосмуговими. За цих умов максимальна fotocутливість ГС лежить у глибині інтервалу фундаментального поглинання InSe ( $\hbar\omega_{max} \approx 1,55 \text{ eV}$ ).

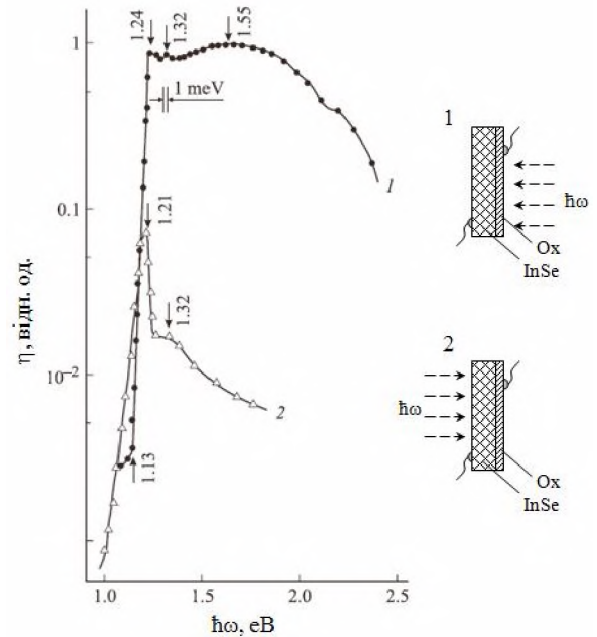


Рис. 1. Спектральний розподіл відносної квантової ефективності фотоперетворення  $\eta(\hbar\omega)$  гетероструктури  $n$ -Ox/ $n$ -InSe за двох способів її освітлення: з боку плівки оксиду (1), з боку  $n$ -InSe (2),  $T=300$  К. На вставці приведені конструктивні особливості гетероструктури та способи її освітлення.

7. На рис. 2 зображено типові залежності квантових ефективностей  $\eta_{||}$ ,  $\eta_{\perp}$  фотоперетворення структур  $n$ -Ox/ $n$ -InSe від кута падіння  $\Theta$  лінійно поляризованого випромінювання (ЛПВ) на їх приймальну площину за умови, що  $\hbar\omega = \text{const}$ . Тут  $\eta_{||}$  – відносна квантова ефективність фотоперетворення у разі, коли вектор електричного поля  $\vec{E}$  ЛПВ паралельний площині падіння променя, а  $\eta_{\perp}$  – коли вектор  $\vec{E}$  перпендикулярний площині падіння променя ЛПВ. У всьому інтервалі кутів падіння променя ЛПВ ( $0 \leq \Theta \leq 90^\circ$ ) виконується співвідношення  $\eta_{||} > \eta_{\perp}$  (рис. 2, а, б, криві 1 і 2). Під час освітлення ГС  $n$ -Ox/ $n$ -InSe уздовж нормалі до приймальної площини (Ox), яка компланарна з площиною сколу (0001) InSe, коефіцієнт фотополюхроїзму  $P$  дорівнює нулеві у всьому інтервалі fotocутливості. Це дозволяє зробити висновок, що природний фотополюхроїзм у таких ГС відсутній, оскільки світло

розповсюджується вздовж ізотропного напрямку (001) шаруватого кристала InSe. Зі зростанням кута падіння  $\Theta$  ЛПВ коефіцієнт наведеного фотоплекроїзму в структурах  $n$ -Ox/ $n$ -InSe у короткохвильовому спектральному інтервалі ( $\hbar\omega \geq 1,55$  eV) відповідає закономірності  $P \propto \Theta^2$  (рис. 2, б, крива 4). Це дозволяє пов'язувати спостережуваний фотоплекроїзм з оптичними процесами на межі розділу фаз повітря/Ox InSe.

8. У структур з точковим контактом ТК<sub>Pt, Ag</sub>/ $n$ -InSe максимальний фотовольтаїчний ефект спостерігається за умов безпосереднього освітлення точкового контакту світловим зондом ( $d \approx 0,3$  мм), а точковий контакт у всіх отриманих структурах заряджається позитивно. Знак фотовольтаїчного ефекту узгоджується зі знаком прямого зміщення структури під час одержання ВАХ. Якщо світловий зонд виходить за межі точкового контакту, то фотовольтаїчний ефект практично зникає. Ця особливість дає підстави вважати, що активна ділянка такої структури локалізується в околі точкового контакту. Максимальна вольтова фоточутливість структур ТК/ $n$ -InSe  $S_U^{\max} \approx 1500$  В/Вт ( $T=300$  К). Висока фоточутливість точкових структур без вираженого короткохвильового спаду  $\eta$  спостерігається до  $\hbar\omega \approx 3,8$  eV, що вказує на високу досконалість інтерфейсу в них. Напівширина  $\delta_{1/2}$  спектрів  $\eta(\hbar\omega)$  у точкових структурах ТК/ $n$ -InSe становить 1,38 eV, що значно більше, ніж у площинних структурах Ox/InSe, де  $\delta_{1/2} \approx 900$  meV. Прояв особливостей у спектрах  $\eta(\hbar\omega)$  за  $\hbar\omega \approx 1,25$  eV, які пов'язані з екситонами, також є свідченням того, що розвинений у цій праці новий метод дозволяє формувати в InSe високо-ефективні ширококутові фотоперетворюючі

структури.

Фоточутливість бар'єрів Шоттки In/ $n$ -In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> та Al/ $n$ -In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> завжди більша під час освітлення з боку бар'єрного контакту, а максимальна вольтова фоточутливість в кращих структурах сягає  $S_U^{\max} \approx 500$  В/Вт за  $T=300$  К.

На рис. 3 наведено типові спектральні залежності відносної квантової ефективності фотоперетворення  $\eta(\hbar\omega)$  однієї із площинних структур на основі бар'єру Шоттки In/ $n$ -In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> за двох способів її освітлення. Характерно, що в довгохвильовому інтервалі ( $\hbar\omega < 1,8$  eV) тип залежностей  $\eta(\hbar\omega)$  за обох способів освітлення виявляється близьким. В інтервалі енергій фотонів  $\hbar\omega \geq 1,8$  eV у разі освітлення структури з боку напівпровідника настає різкий короткохвильовий спад фоточутливості. Такий спад фоточутливості у процесі зростання енергії квантів  $\hbar\omega$  викликаний віддаленням зони фотогенерування пар від активної ділянки структури на відстані, що перевищує довжину дифузійного зміщення носіїв заряду в In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>. Під час освітлення структури з боку бар'єрного контакту фотонами  $\hbar\omega > 1,8$  eV фоточутливість, навпаки, починає знову різко зростати (до  $\hbar\omega \approx 2$  eV), а надалі аж до  $\hbar\omega \approx 3,8$  eV залишається на високому рівні (рис. 3, крива 1), так що спектр стає ширококутовим. Це свідчить про суттєво малий вплив поверхневої рекомбінації в отриманих бар'єрах In/ $n$ -In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> і високу ефективність збирання фотогенерованих пар. Спектри фоточутливості бар'єру Шоттки In/ $n$ -In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> у координатах  $(\eta\hbar\omega)^{1/2} - \hbar\omega$  і  $(\eta\hbar\omega)^2 - \hbar\omega$  (рис. 4, криві 2 і 3) мають прямолінійні ділянки, які можна зв'язати з непрямим і прямим міжзонними оптичними переходами в In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>.

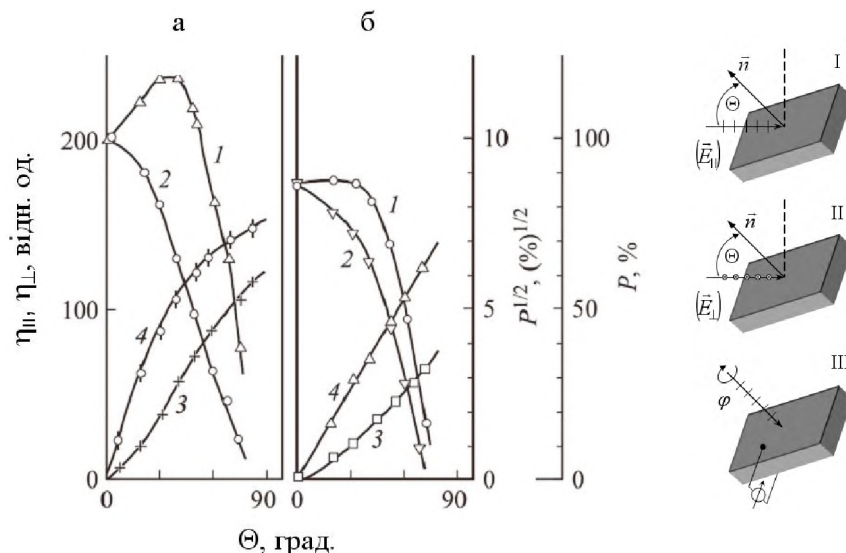


Рис. 2. Залежності відносних квантових ефективностей фотоперетворення  $\eta_{||}$  (1),  $\eta_{\perp}$  (2) та коефіцієнта фотоплекроїзму  $P$  (3) і  $P^{1/2}$  (4) від кута падіння лінійно поляризованого випромінювання на площину Ox гетероструктури  $n$ -Ox/ $n$ -InSe за  $T=300$  К у монохроматичному освітленні:  $\hbar\omega=1,24$  eV (а) і 1,55 eV (б). На вставці приведені схеми освітлення гетероструктури за трьох орієнтацій площини поляризації ЛПВ по відношенню до площини падіння: паралельно площині падіння (I), перпендикулярно площині падіння (II), уздовж нормалі до площини Ox (III).

Ширина забороненої зони для непрямих переходів, яка отримана в результаті екстраполяції  $(\eta\hbar\omega)^{1/2} \rightarrow 0$  (рис. 4, крива 2):  $E_g^{ind} \approx 1,79$  еВ. Екстраполяція  $(\eta\hbar\omega)^2 \rightarrow 0$  (рис. 4, крива 3) дозволяє визначити значення ширини забороненої зони для прямих переходів:  $E_g^d \approx 1,90$  еВ ( $T=300$  К). Аналогічні закономірності спектрального розподілу fotocутливості спостерігали і для бар'єрів Al/*n*-In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>. Слід відзначити, що бар'єри Al/*n*-In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> в умовах кімнатних температур відзначаються суттєвою стабільністю параметрів, бо не виявлено будь-яких ознак деградації fotocутливості протягом 3 років спостереження.

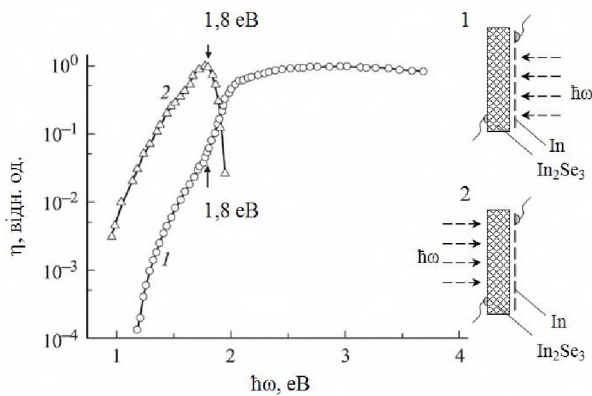


Рис. 3. Спектральні залежності відносної квантової ефективності фотоперетворення структури In/*n*-In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> за двох способів освітлення: з боку плівки індію (1) та з боку In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> (2).

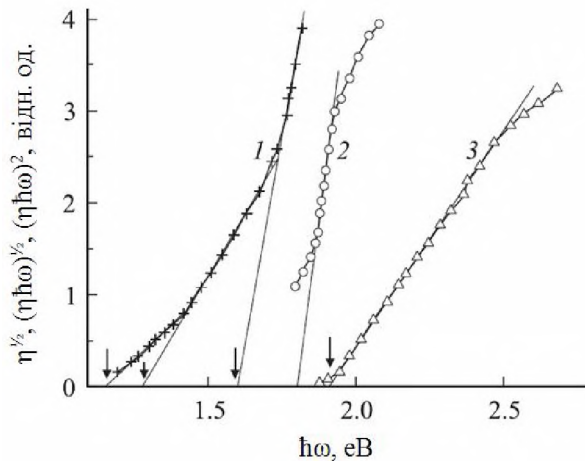


Рис. 4. Залежності  $\eta^{1/2}=f(\hbar\omega)$  (1),  $(\eta\hbar\omega)^{1/2}=f(\hbar\omega)$  (2) і  $(\eta\hbar\omega)^2=f(\hbar\omega)$  (3) відносної квантової ефективності фотоперетворення структури In/*n*-In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> за 300 К.

### 2.3. Створення поверхнево-бар'єрних структур на основі твердих розчинів Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te, їх електрофізичні та фотоелектричні властивості.

1. Для формування fotocутливих ГС на основі плоскопаралельних платівок твердого розчину Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te ( $h=2-4$  мм) з дзеркально-

рівною поверхнею, одержаних сколюванням, апробовано і використано технології, що розроблені для створення fotocутливих ГС на основі селенідів індію.

2. Дослідження стаціонарних ВАХ структур Oх/Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te ( $x=0,00-0,70$ ) показали, що запропонований режим термообробки платівок Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te приводить до відтвореного отримання ГС з випрямними властивостями. Пропускний напрям ВАХ в усіх ГС Oх/Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te відповідає прикладенню зовнішнього зміщення негативної полярності до плівки Oх. Типову стаціонарну ВАХ однієї з ГС Oх/Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te зображено на рис. 5. Як видно з рис. 5, початкова ділянка прямої вітки ВАХ ( $U < 1$  В) (рис. 5, а, крива 1) для отриманих структур відповідає діодному рівнянню  $I=I_s \exp(eU/\beta kT-1)$ , де струм насичення  $I_s$  у кращих структурах сягав  $10^{-9}$  А, а фактор неідеальності дорівнював  $\beta \approx 4,5-6$  ( $T=300$  К). Це дозволяє стверджувати, що в отриманих ГС Oх/Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te переважальним є тунельно-рекомбінаційний механізм перенесення заряду. В інтервалі напруг  $U_R < 5$  В зворотного зміщення спостерігалася степенева залежність між струмом і напругою  $I \sim U^m$  (рис. 5, б). За напруг зворотнього зміщення  $U_R < 0,6$  В показник степеня  $m \approx 0,35$ , що зумовлено генераційними процесами в активній ділянці ГС. За  $U_R > 0,6$  В показник  $m$  зростає і виявляється близьким до одиниці, що властиво механізму тунелювання носіїв заряду або ж струму, обмеженого просторовим зарядом у режимі насичення швидкості.

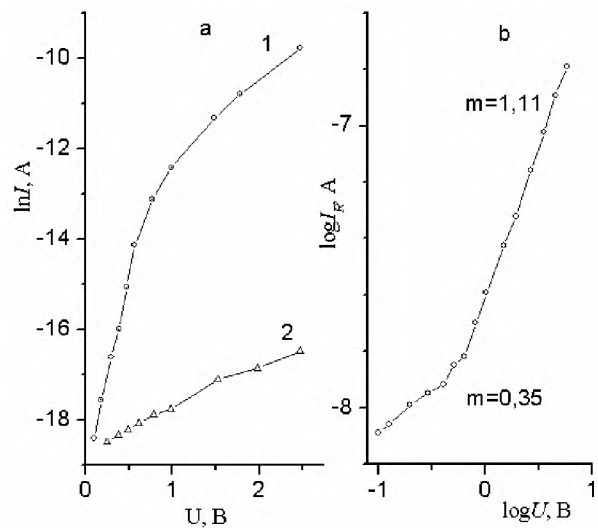


Рис. 5. Стаціонарна вольт-амперна характеристика гетероструктури Oх/Cd<sub>0,6</sub>Mn<sub>0,4</sub>Te (а) за різних зміщень: прямого (1) і зворотнього (2) та зворотна вітка ВАХ у подвійній логарифмічній шкалі (б) ( $T=300$  К).

3. Із типових спектральних залежностей відносної квантової ефективності фотоперетворення  $\eta(\hbar\omega)$  для двох гетероструктур на монокристалах Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te, що відрізняються

вмістом мангану ( $x=0$  та  $x=0,40$ ) (рис. 6, *a*) бачимо, що зі зростанням вмісту мангану спектри  $\eta(\hbar\omega)$  та їх абсолютний максимум  $\hbar\omega^m$  зміщуються у короткохвильову спектральну ділянку порівняно зі спектром  $\eta(\hbar\omega)$  структури  $Ox/CdTe$ . Цей ефект пов'язаний із збільшенням ширини забороненої зони внаслідок зростання вмісту Mn у твердому розчині  $Cd_{1-x}Mn_xTe$ . Екстраполяція лінійних ділянок залежності  $(\eta\hbar\omega)^2=f(\hbar\omega)$  (рис. 6, *b*) дозволяє визначити енергію прямих міжзонних переходів у твердому розчині  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  ( $x=0$  і  $x=0,40$ ):  $E_g^{dir}=1,47$  і  $2,2$  еВ відповідно ( $T=300$  К).

4. Типові спектри відносної квантової ефективності фотоперетворення  $\eta(\hbar\omega)$  точкових ГС  $TK_{Ag}/Cd_{1-x}Mn_xTe$  із різним вмістом Mn у твердому розчині зображено на рис. 7. Довгохвильова компонента спектрів  $\eta(\hbar\omega)$  ГС  $TK_{Ag}/Cd_{1-x}Mn_xTe$  сильно розширюється порівняно зі спектром  $\eta(\hbar\omega)$  структур на кристалах  $p$ -CdTe (рис. 7, крива 1). За досягнення вмісту Mn  $x\approx 0,60$  у спектрах  $\eta(\hbar\omega)$  структур  $TK_{Ag}/Cd_{1-x}Mn_xTe$  спостерігається чіткий максимум, який добре корелює з відомим із вимірювань фотолумінесценції максимумом (смуга С). Аналогічні спектральні закономірності спостерігали і для бар'єрів Шотткі  $In/Cd_{1-x}Mn_xTe$ . Отже, вміст мангану в кристалах твердих розчинів  $Cd_{1-x}Mn_xTe$

контролює протяжність спектрального діапазону високої фоточутливості площинних бар'єрів Шотткі  $In/Cd_{1-x}Mn_xTe$  і точкових ГС  $TK_{Ag,Pt}/Cd_{1-x}Mn_xTe$ .

Типові значення одержаних електрофізичних та фотоелектричних параметрів досліджених структур  $In/Cd_{1-x}Mn_xTe$  та  $TK_{Ag}/Cd_{1-x}Mn_xTe$  наведено в табл. 1. Як видно з табл. 1, площинним бар'єрам Шотткі і точковим ГС властиве чітке випрямлення (коефіцієнт  $K$ ).

Пропускний напрям у цих структурах реалізується за від'ємної полярності зовнішнього зміщення на площинному індієвому чи точковому контактах для всіх вивчених складів твердого розчину. Типові значення напівширини ( $\delta_{1/2}$ ) спектрів  $\eta(\hbar\omega)$  кількісно характеризують спектральний діапазон високої фоточутливості створених типів структур. Найбільше значення  $\delta_{1/2} \approx 1,6$  еВ досягнуто у структурах на основі кристалів CdTe ( $x=0$ ). Максимальної вольтової фоточутливості  $S_U^{max}$  досягнуто у структурах  $TK_{Ag}/Cd_{1-x}Mn_xTe$  та  $In/Cd_{1-x}Mn_xTe$ , створених на монокристалах вмісту  $x=0$  під час їх освітлення з боку індієвого і точкового контактів, відповідно. Збільшення вмісту мангану у  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  приводить до зменшення величини максимальної вольтової чутливості  $S_U^{max}$  названих структур.

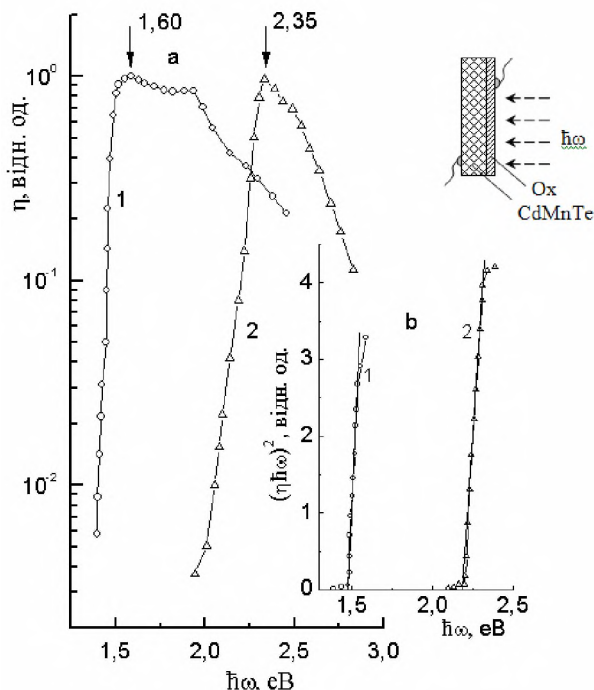


Рис. 6. Спектральні залежності відносної квантової ефективності фотоперетворення  $\eta(\hbar\omega)$  гетероструктур  $Ox/Cd_{1-x}Mn_xTe$  (*a*) та їх подання залежністю  $(\eta\hbar\omega)^2=f(\hbar\omega)$  (*b*). Криві 1 відповідають значенню  $x=0$ , криві 2 – значенню  $x=0,4$ .

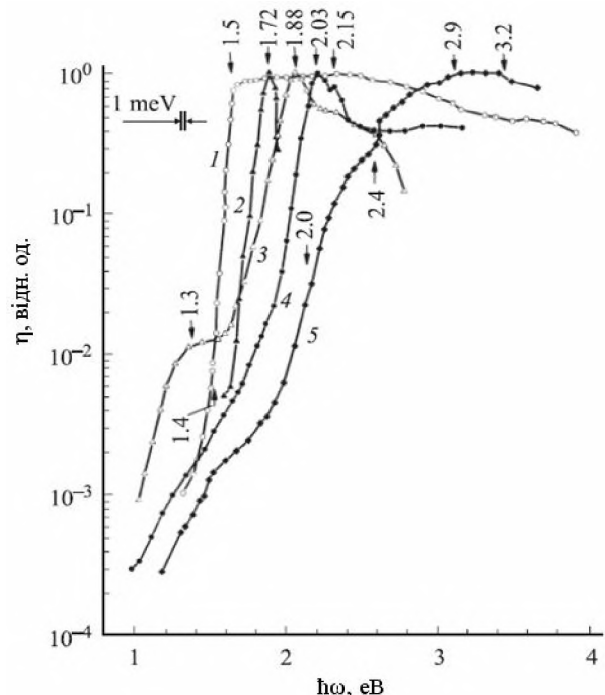


Рис. 7. Спектральні залежності відносної квантової ефективності фотоперетворення точкових гетероструктур  $TK_{Ag}/Cd_{1-x}Mn_xTe$  для вмістів Mn  $x=0$  (1);  $x=0,35$  (2);  $x=0,40$  (3);  $x=0,50$  (4);  $x=0,70$  (5),  $T=300$  К) під час освітлення структури в околі точкового контакту.

Таблиця 1

Фізичні властивості бар'єрів Шотткі та точкових зварних гетероструктур на кристалах  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  з різним вмістом мангану за  $T = 300$  К

Тип структури	$x$ , % мол.	$K$ ( $U \approx 2B$ )	$R_0$ , Ом	$U_0$ , В	$\hbar\omega^m$ , еВ	$\delta_{1/2}$ , еВ	$S_U^{max}$ , В/Вт	$E_g^{dir}$ , еВ	$E_g^{ind}$ , еВ
In/ $Cd_{1-x}Mn_xTe$	0	$2 \cdot 10^5$	$10^5$	0,5	1,5–2,5	1,55	1,5	1,44	
	0,35	$10^2$	$10^8$	0,7	1,78	0,1	5	1,65	
	0,40	15	$10^9$	0,4	2,0	1,2	10	1,77	
	0,50	10	$10^{10}$	0,7	1,0; 2,15	0,7	5	1,90	
	0,70	10	$3 \cdot 10^9$	0,3	3–3,5	>1,2	3	2,5	1,9
TK/ $Cd_{1-x}Mn_xTe$	0	$10^2$	$3 \cdot 10^4$	0,3	1,5–2,4	1,60	200	1,44	
	0,35	50	$5 \cdot 10^8$	0,4	1,72	0,09	150	1,63	
	0,40	5	$2 \cdot 10^8$	0,5	1,88	0,58	120	1,77	
	0,50	2	$6 \cdot 10^8$	0,4	2,03; 2,15	0,25	5	1,94	
	0,70	5	$2 \cdot 10^8$	0,6	2,9–3,2	>1,2	3	2,5	1,9

## Висновки

1. Розвинуто фізико-хімічні основи технології вирощування монокристалів багатокомпонентних халькогенідів методами хімічних транспортних реакцій та спрямованої кристалізації близьких до стехіометрії розтопів, вирощено гомогенні однофазні кристали селенідів індію InSe,  $In_2Se_3$  та твердих розчинів  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  ( $x=0,00-0,70$ ) високого ступеня однорідності.

2. Створено технологію отримання на поверхнях платівок природнього сколу моноселеніду індію  $n$ -InSe та твердого розчину  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  ( $x=0,00-0,70$ ) тонких ( $d \approx 0,5$  мкм) плівок власного оксиду ( $n$ -Ox), які характеризуються високим рівнем адгезії до підкладок  $n$ -InSe та  $Cd_{1-x}Mn_xTe$ , а їх колір і товщина контролюються температурою і часом термообробки у повітряному середовищі.

3. Уперше за розробленою технологією термообробки платівок у повітряному середовищі, сформовано fotocутливі поверхнево-бар'єрні гетероструктури  $n$ -Ox/ $n$ -InSe, Ox/ $Cd_{1-x}Mn_xTe$  ( $x=0,00-0,70$ ), які характеризуються надійною відтворюваністю випрямних та фотоелектричних властивостей у широкому спектральному діапазоні.

4. Запропоновано і реалізовано нову технологію створення точкових зварних контактів (ТК) до монокристалічних платівок  $n$ -InSe та твердого розчину  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  ( $x=0,00-0,70$ ) із використанням техніки електричного розряду між дротинками (Ag або Pt) мікронних діаметрів (10–20 мкм). Уперше створено бар'єрні точкові структури  $TK_{Ag,Pt}/n$ -InSe,  $TK_{Ag,Pt}/Cd_{1-x}Mn_xTe$  з добре відтворюваними випрямними та фотовольтаїчними властивостями, які протягом 3 років спостереження не виявили будь-яких проявів деградаційних явищ.

5. Уперше створено поверхнево-бар'єрні структури In/ $n$ - $In_2Se_3$ , Al/ $n$ - $In_2Se_3$  та In/ $Cd_{1-x}Mn_xTe$

на дзеркально-рівній поверхні свіжого сколу  $In_2Se_3$  або твердого розчину  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  ( $x=0,00-0,70$ ), які fotocутливі у широкому інтервалі енергій падаючих фотонів за 300 К. Для отриманих бар'єрів Шотткі в умовах кімнатних температур не виявлено жодних ознак деградації fotocутливості упродовж 3 років спостереження.

6. Комплексно досліджено електрофізичні та фотоелектричні властивості у природньому та лінійно-поляризованому випромінюваннях створених на основі селенідів індію  $n$ -InSe,  $n$ - $In_2Se_3$  гетероструктур  $n$ -Ox/ $n$ -InSe;  $TK_{Pt,Ag}/n$ -InSe та бар'єрів Шотткі In/ $n$ - $In_2Se_3$ , Al/ $n$ - $In_2Se_3$ . Визначено характер і енергії міжзонних оптичних переходів у кристалах  $In_2Se_3$ .

7. Установлено, що вміст мангану в кристалах твердих розчинів  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  контролює протяжність спектрального діапазону високої fotocутливості створених поверхнево-бар'єрних структур (In/ $Cd_{1-x}Mn_xTe$ ) та точкових гетероструктур (TK/ $Cd_{1-x}Mn_xTe$ ). На основі вперше отриманих спектрів фотоактивного поглинання різномісних гетероструктур визначено характер міжзонних оптичних переходів і значення ширини забороненої зони кристалів  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  ( $x=0,00-0,70$ ) залежно від атомного складу твердого розчину. Показано, що спектри відносної квантової ефективності фотоперетворення  $\eta(\hbar\omega)$  для твердих розчинів  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  близьких складів  $x$  схожі між собою і характеризуються надійною відтворюваністю.

8. Уперше доведено можливість застосування створених fotocутливих поверхнево-бар'єрних структур на основі вирощених багатокомпонентних халькогенідів InSe,  $In_2Se_3$  та твердих розчинів  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  як високоефективних широкосмугових фотоперетворювачів оптичного випромінювання та в розробках приладів магнітної фотоелектроніки.



## Наукова новизна отриманих результатів

1. Розвинуто метод хемічних транспортних реакцій із програмованим встановленням температурних розподілів ростової установки для вирощування гомогенних монокристалів  $\text{InSe}$ ,  $\text{In}_2\text{Se}_3$  та твердих розчинів  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  ( $x=0,00-0,70$ ).

2. Розвинуто фізико-хемічні основи технології отримання на поверхнях платівок природнього сколу моноселеніду індію  $n\text{-InSe}$  та твердого розчину  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  ( $x=0,00-0,70$ ) високоякісних платівок власного оксиду ( $n\text{-Ox}$ ). Уперше, з використанням розвинутої технології термообробки, одержано fotocутливі гетероструктури  $n\text{-Ox}/n\text{-InSe}$  та  $\text{Ox}/\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  ( $x=0,00-0,70$ ) з надійною відтворюваністю фізичних властивостей.

3. Запропоновано і відпрацьовано технологію створення точкових зварних контактів (ТК) до монокристалічних платівок моноселеніду індію та твердого розчину  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  ( $x=0,00-0,70$ ) з використанням техніки електричного розряду між дротинками (Ag або Pt) мікрометричних діаметрів (10–20 мкм). Вперше створено бар'єрні точкові гетероструктури  $\text{TK}_{\text{Ag,Pt}}/n\text{-InSe}$ ,  $\text{TK}_{\text{Ag,Pt}}/\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  з надійною відтворюваністю випрямними та фотовольтаїчними властивостями.

4. На поверхнях свіжого сколу монокристалів  $\text{In}_2\text{Se}_3$  та  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  створено поверхнево-бар'єрні структури (бар'єри Шоттки)  $\text{In}/n\text{-In}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{Al}/n\text{-In}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{In}/\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  та виявлено їх fotocутливість у спектральному інтервалі 1–4 eV.

5. Вперше виявлено можливості застосування створених fotocутливих поверхнево-бар'єрних структур як високоефективних широкодіапазонних фотоперетворювачів оптичного випромінювання та в розробках приладів магнітної фотоелектроніки.

## Практичне значення отриманих результатів

1. Створені нові технологічні засади для відтворюваного здійснення ростових процесів. Для цього розроблено і виготовлено комп'ютерний регулятор температури, який забезпечує керування температурною динамікою ростової установки (програмоване встановлення температурного розподілу нагрівача ростової установки, виведення її на режим росту, проведення росту та вихід з режиму росту) з можливістю задання швидкостей цих процесів та керованої зміни температурних розподілів нагрівача у процесі росту.

2. Розроблені та впроваджені нові технологічні процеси створення високоякісних плівок власного оксиду на поверхні платівок напівпровідників  $n\text{-InSe}$  та  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  для їх використання як елементів гетероструктур.

3. Запропоновані технологічні процеси та реалізовано fotocутливі гетероструктури  $\text{Ox}/n\text{-InSe}$ ,  $\text{Ox}/\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  на основі власних оксидів напівпровідників  $n\text{-InSe}$  та  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ .

4. Запропоновано і відпрацьовано технологію створення точкових контактів до платівок  $n\text{-InSe}$  та  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  з використанням техніки електричного розряду між тонкими дротинками срібла або платини та створено у такий спосіб гетероструктури  $\text{TK}_{\text{Ag,Pt}}/\text{InSe}$ ,  $\text{TK}_{\text{Ag,Pt}}/\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ , fotocутливі у широкому діапазоні спектра.

5. Показано, що створені нові типи fotocутливих структур (оксидних, точкових, бар'єрів Шоттки) можуть знайти застосування як широкодіапазонні фотоперетворювачі оптичного випромінювання.

6. Подальше дослідження гетероструктур на твердих розчинах  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  дозволить створити фотосенсиори нового покоління з можливим впливом на їх fotocутливість зовнішніх магнітних полів.

## Література

1. **Фоточувствительность гетеропереходов  $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ , полученных химическим поверхностным осаждением  $\text{CdS}$**  / Г.А. Ильчук, В.В. Кусьнеж, Ю.В. Рудь, В.Ю. Рудь, П.И. Шаповал, Р.Ю. Петрусь // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44, № 3. – С. 335–337.
2. **Электрические свойства монокристаллов  $\text{In}_2\text{Se}_3$  и фоточувствительность барьеров Шоттки  $\text{Al}/\text{In}_2\text{Se}_3$**  / И.В. Боднар, Г.А. Ильчук, Р.Ю. Петрусь, Ю.В. Рудь, В.Ю. Рудь // Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т. 43, № 9. – С. 1179–1182.
3. **Хімічне поверхневе осадження тонких плівок  $\text{CdS}$  з водного розчину солі  $\text{CdI}_2$**  / Г.А. Ильчук, В.В. Кусьнеж, П.И. Шаповал, Ф.И. Цюпко, Р.Ю. Петрусь, С.В. Токарев, О.И. Горбова // Журнал нанотехнологической физики – 2009. – Т. 1, №2 – С. 42–48.
4. **Фоточувствительность поверхностно-барьерных и точечных структур на монокристаллах  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$**  / Г.А. Ильчук, Р.Ю. Петрусь, Ю.А. Николаев, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, Е.И. Теруков // Журнал технической физики. – 2008. – Т. 78, № 6. – С. 49–53.
5. **Плівки  $\text{CdS}$ , одержані хімічним поверхневим осадженням: створення та властивості** / Г.А. Ильчук, В.В. Кусьнеж, П.И. Шаповал, Ф.И. Цюпко, В.О. Українець, А.М. Коструба, Р.Ю. Петрусь // Физика і хімія твердого тіла. – 2008. – Т. 9, №4. – С. 757–762.

6. **Создание и фотоэлектрические свойства** гетероструктур собственный окисел/ $Cd_xMn_{1-x}Te$  / Г.А. Ильчук, Р.Ю. Петрусь, Ю.А. Николаев, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, Е.И. Теруков // Письма в журнал технической физики. – 2007. – Т. 33, № 24. – С. 24–31.
7. **Создание и свойства точечных структур на монокристаллах n-InSe** / Г.А. Ильчук, В.В. Кусьнеж, Р.Ю. Петрусь, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, В.О. Українець // Физика и техника полупроводников. – 2007. – Т. 41, № 10. – С. 1187–1189.
8. **Фотоэлектрические свойства структур In/In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>** / Г.А. Ильчук, В.В. Кусьнеж, Р.Ю. Петрусь, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, В.О. Українець // Физика и техника полупроводников. – 2007. – Т. 41, № 1. – С. 53–55.
9. **Гетерофотоэлементы n-Ох/n-InSe: создание и свойства** / Г.А. Ильчук, В.В. Кусьнеж, Р.Ю. Петрусь, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, Е.И. Теруков, В.О. Українець // Физика и техника полупроводников. – 2006. – Т. 40, № 11. – С. 1356–1360.
10. **Особливості деградації поверхнево-бар'єрних структур метал-p-CdTe** / В.О. Українець, Г.А. Ильчук, Н.А. Українець, Р.Ю. Петрусь, В.І. Лобойко // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Електроніка". – 2004. – № 482. – С. 80–85.
11. **Электрохимический синтез тонких пленок CdS** / Г.А. Ильчук, В.О. Українець, Ю.В. Рудь, О.И. Кунтый, Н.А. Українець, Б.А. Лукиянец, Р.Ю. Петрусь // Письма в журнал технической физики. – 2004. – Т. 30, № 15. – С. 19–24.
12. **Властивості поверхнево-бар'єрних структур Me(In, Sn, Pb) – p-CdTe в області додатніх зміщень** / В.О. Українець, Г.А. Ильчук, Н.А. Українець, Р.Ю. Петрусь, С.Б. Харамбура // Фізика і хімія твердого тіла. – 2004. – Т. 5, №2. – С. 364–368.
13. **Кероване введення кластерних включень в монокристалах CdTe в процесі парофазного росту методом хімічних транспортних реакцій** / Г.А. Ильчук, В.О. Українець, А.Б. Данилов, Н.А. Українець, Р.Ю. Петрусь // Актуальні проблеми фізики напівпровідників: IV Міжнародна школа-конференція, 27–30 червня 2003 р. – Дрогобич, 2003. – С. 20.
14. **Фотоэлектрические явления в барьерах Шоттки на основе выращенных методом химических транспортных реакций CdTe и ZnTe** / Г.А. Ильчук, В.О. Українець, Р.Ю. Петрусь, Н.А. Українець // Фотоэлектрические явления в полупроводниках: материалы конференции, 20–21 апр. 2004 г. – Ташкент, 2004. – С. 12–13.
15. **Фотогальванічний ефект в поверхнево-бар'єрних структурах на основі плівок CdS, створених електрохімічним методом** / Г.А. Ильчук, В.О. Українець, Р.Ю. Петрусь, Н.А. Українець, І.О. Кунтый // II Українська наукова конференція з фізики напівпровідників, 20–24 вересня 2004 р. – Чернівці–Вижниця, 2004. – С. 16.
16. **Фізичні властивості електрохімічно синтезованих плівок кадмію сульфіді** / Г.А. Ильчук, В.В. Кусьнеж, Н.А. Українець, Р.Ю. Петрусь, В.О. Українець, С.П. Дубельт // Актуальні проблеми фізики напівпровідників: V Міжнародна школа-конференція, 27–30 червня 2005 р. – Дрогобич, 2005. – С. 73.
17. **Photovoltaic effect in structures on the basis of CdS films received by an electrochemical method** / V. Kusnesh, G. Ilchuk, V. Ukrainets', R. Petrus' // Physics of disordered systems: 3-rd International conference, 18–21 September 2005. – Gdansk-Sobieszewo, Poland, 2005. – P. 60–61.
18. **Heterophotoelements created by InSe oxidation** / G.A. Ilchuk, V.V. Kusnezh, R. Yu. Petrus', V. Yu. Rud', Yu. V. Rud', N.A. Ukrainets // Luminescent Detectors and Transformers of Ionizing Radiation: 6<sup>th</sup> European Conference, 19–23 June 2006. – Lviv, Ukraine, 2006. – P. 217.
19. **Телуризація плівок кадмію** / Г.А. Ильчук, В.О. Українець, Р.Ю. Петрусь, В.В. Кусьнеж // П'ята відкрита наукова конференція проф.-викл. складу Ін-ту прикладної математики та фундаментальних наук, 5–6 жовтня 2006 р. – Львів, 2006. – С. 72.
20. **Відпал плівок кадмію в атмосфері телуру та їх властивості** / Г.А. Ильчук, В.В. Кусьнеж, Р.Ю. Петрусь, В.О. Українець // Фізика і технологія тонких плівок та наносистем: Матеріали XI Міжнародної конференції, 7–12 травня 2007 р. – Т.1. – Івано-Франківськ, 2007. – С. 132.
21. **Thermal synthesis of CdTe films from elementary components** / V. Kusnezh, G. Ilchuk, V. Ukrainets, R. Petrus', A. Danilov // 4-rd International workshop on functional and nanostructured materials, 2–5 September 2007. – Gdansk, Poland, 2007. – P. 140.
22. **Кусьнеж В.В.** Вплив відпалу на оптичні властивості тонких плівок CdS<sub>хім</sub> осаджених з різних солей кадмію / В.В. Кусьнеж, Р.Ю. Петрусь, С.В. Токарев // Сьома відкрита наукова конференція проф.-викл. складу Ін-ту прикладної математики та фундаментальних наук, 13–14 листопада 2008 р. – Львів, 2008. – С. 74.
23. **Ильчук Г.А.** Електричні властивості монокристалів In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> вирощених з парової фази / Г.А. Ильчук, Р.Ю. Петрусь, В.Ю. Рудь // Восьма відкрита наукова конференція проф.-викл. складу Ін-ту прикладної математики та фундаментальних наук, 12–13 листопада 2009 р. – Львів, 2009. – С. 98.

24. **Chemical surface** deposition of CdS thin films from aqueous solutions / G. P'chuk, V. Kusnezh, P. Sharowal, R. Petrus' // Joint Conferences on Advanced Materials, 6<sup>th</sup> Workshop on Functional and Nanostructured Materials, 10<sup>th</sup> Conference on Intermolecular and Magnetic Interactions in Matter, 27–30 September 2009. – Sulmona–L'Aquila, Italy, 2009. – P. 194–195.
25. **Фізичні властивості** гетероконтакту природній білок/CdS / Г.А. Ільчук, В.В. Кусьнеж, С.В. Лукашук, Р.Ю. Петрусь. // Фізичні методи в екології, біології та медицині: II міжнародна конференція, 2–6 вересня 2009 р. – Львів–Ворохта, 2010 р. – С. 70–71.
26. **Фоточутливість бар'єрів Шотткі** Al/In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> / Г.А. Ільчук, Р.Ю. Петрусь, В.Ю. Рудь, В.В. Кусьнеж, В.О. Українець // Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології: Четверта міжнародна науково-практична конференція, 19–21 травня 2010 р. – Кременчук, 2010. – С. 27–28.

*Петрусь Р.Ю.* – кандидат фізико-математичних наук, молодший науковий співробітник кафедри фізики.

**Рецензент**

*Сіренко Г.О.* – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри неорганічної та фізичної хемії Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.