

ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ *p-n*-ПЕРЕХОДІВ НА ОСНОВІ *p-InSe<Cd>*, СТВОРЕНИХ ЛАЗЕРНИМ ОПРОМІНЕННЯМ

Отримані *p-n*-переходи, опроміненням поверхні *p-InSe<Cd>* потужними лазерними імпульсами тривалістю 2 мс. Встановлено значення порогової густини енергії 12 Дж/см², при якому починається плавлення поверхні шаруватих кристалів. Обговорюються температурні залежності вольт-амперних характеристик та інтерпретовано механізми проходження струму даних *p-n*-переходів. Досліджено спектральні залежності відносної квантової ефективності гетеропереходів

P-n-junctions are obtained by high-power laser pulse irradiation of surface *p-InSe<Cd>* duration 2 ms. It was established the existence of the threshold energy density of 12 J/cm² at which melting of the layered crystal surface begins. The temperature dependences of current-voltage characteristics are discussed; current transport mechanisms of the prepared diodes are interpreted. Relative quantum efficiency spectral dependences of *p-n*-junction are investigated.

Вступ

Дослідження взаємодії лазерного випромінювання з шаруватими напівпровідниковими кристалами викликає значний інтерес через можливість модифікації як об'ємних властивостей, так і властивостей приповерхневих шарів. На сьогодні досить активно вивчаються гетеропереходи виготовлені цим методом [1,2], однак аналогічні дослідження на шаруватих кристалах носять епізодичний характер [3], а на основі моноселеніду індію не проводились.

У даній роботі розглянуті електричні і фотоелектричні властивості *p-n*-переходів на основі моноселеніду індію, отриманих методом розплаву поверхневого шару напівпровідникового матеріалу імпульсом потужного лазерного випромінювання з наступною його рекристалізацією.

Симетрія елементарної комірки моноселеніду індію належить до гексагональної (ромбоєдричної) сингонії з нетривіальною трансляцією у напрямку, перпендикулярному до площин шарів. Більшість кристалів InSe, вирощених методом Бріджмена, належить до ϵ -політипу (просторова група D_{3h}^1). Однак введення невеликої кількості домішки приводить до появи γ - і δ -політипів (просторова група C_{3v}^5 і C_{6v}^4 відповідно). Ширина забороненої зони InSe дорівнює 1,2 еВ при температурі 300 К.

Експеримент

За методикою лазерного опромінення монокристалів, яка застосовувалась нами для утворення відповідних структур, використовувалися кристали *p-InSe*. Вони вирощувалися вертикальним методом Бріджмена з попередньо синтезованих зливків і легувалися домішкою кадмію для отримання діркової провідності. Монокристали були електрично однорідними з концентрацією вільних носіїв $p \sim 5,0 \cdot 10^{14}$ см⁻³ та холлівською рухливістю $\mu \approx 35-50$ см²/(В·с) при кімнатній температурі.

Зі зливків сколювалися тонкі, плоскопаралельні пластинки товщиною 0,3 мм з середніми розмірами 4×4 мм². Існування слабких ван-дер-Вальсових зв'язків між шарами (001) робить процес сколювання оптимальним для отримання робочих площин з мінімальною кристаліграфічною розорієнтацією і без розірваних зв'язків. Останнє є наслідком сильної анізотропії міжатомних сил у напівпровідниках $A^{III}B^{VI}$. Зразки *p-InSe<Cd>* рівномірно по всій площині опромінювалися лазером ГОС-301, що працював у режимі вільної генерації (тривалість імпульсу $\tau = 2$ мс, довжина хвилі $\lambda = 1,06$ мкм). Хімічним осадженням золота створювався омичний контакт до базового напівпровідника, а пайкою індієм – до опроміненої поверхні.

Лазерне випромінювання, поглинаючись поверхневим шаром напівпровідника, приводить до сильного нагрівання і розплаву цього шару.

P-n-перехід утворюється на межі поділу фаз – на місці початку рекристалізації [4,5]. Глибина розплаву і залягання *p-n*-переходу збільшується зі збільшенням густини енергії випромінювання [6]. Порогова густина енергії лазерного випромінювання, що викликає плавлення поверхневого шару кристалів *p-InSe*<Cd>, складала 12 Дж/см². При густині потоку 12–22 Дж/см² відбувалося рівномірне плавлення поверхні напівпровідника з утворенням після рекристалізації тонкого шару *n*-типу. Глибина розплаву і залягання *p-n*-переходу збільшується зі збільшенням густини енергії випромінювання [1-3]. При збільшенні густини потоку понад 25 Дж/см² відбувалося руйнування кристала. Підбором відповідних енергетичних режимів опромінення вдається одержати рівномірний по всій поверхні зразка перекристалізований шар.

Результати і обговорення

Для отриманих структур *p-n-InSe* при освітленні спостерігається фотовольтаїчний ефект. Напруга холостого ходу V_{xx} при освітленні з густиною потоку випромінювання $P=100$ мВт/см² сягала 0,3–0,43 В. Зауважимо, що висота бар'єра, визначена з вольт-амперних характеристик (ВАХ), задовільно корелює з V_{xx} .

Для діапазону температур 236–277 К характерний тунельно-рекомбінаційний механізм струмопереносу, коли діодний коефіцієнт $n \approx 2,7$ (рис.1). В інтервалі температур 296–314 К коефіцієнт n змінюється від 2,3 до 2,1 що відповідає рекомбінаційному характеру струму. Для більших температур ($T \geq 328$ К) проходження струму поступово набирає надбар'єрного характеру, що пов'язано зі зменшенням потенціального бар'єра.

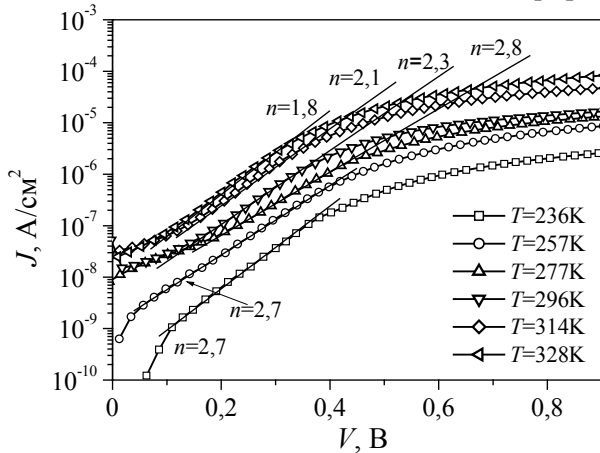


Рис. 1. Прямі гілки ВАХ *p-n*-переходів, створених лазерним опроміненням на основі *p-InSe*<Cd>, при різних температурах побудовані у напівлогарифмічному масштабі

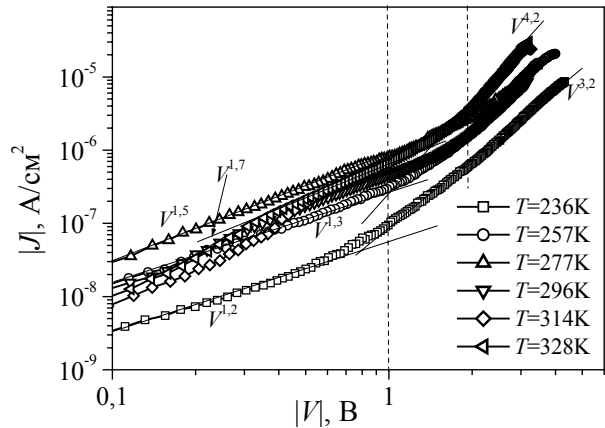


Рис. 2. Обернені гілки ВАХ *p-n*-переходів, створених лазерним опроміненням на основі *p-InSe*<Cd>, при різних температурах побудовані в логарифмічному масштабі

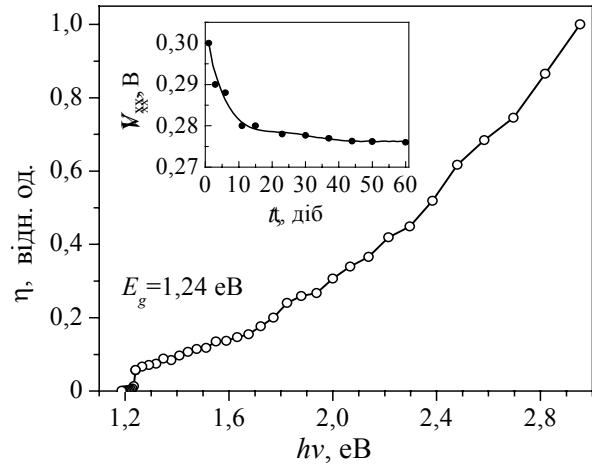


Рис. 3. Залежність відносної квантової ефективності фотоперетворення η від енергії $h\nu$ для *p-n*-переходів, створених лазерним опроміненням на *p-InSe*<Cd>. На вставці – процес релаксації для *p-n*-переходів

Обернені гілки ВАХ, як видно з рис.2, підлягають закону $J \sim V^m$ в усьому діапазоні напруг та температур і характеризується такими ділянками: 1) ділянка в інтервалі напруг $0 < V < -1$ В, де $J \sim V^{1,2 \div 1,7}$, 2) перехідна ділянка в області зміщень $-1 < V < -2$ В, 3) ділянка різкого росту струму $J \sim V^{3,2 \div 4,2}$ для ще вищих напруг. Такі залежності струму від прикладеної напруги характерні для струмів, обмежених просторовим зарядом.

Квантову ефективність η вимірювали на лінійній ділянці залежності фотоструму від інтенсивності падаючого на зразок світла і нормували на кількість падаючих квантів. На рис.3 зображено спектральну залежність відносної квантової ефективності фотоперетворення $\eta(h\nu)$ є відсутність спаду, почи-

наючи від краю фундаментального поглинання і до коротших довжин хвиль ($h\nu > 3\text{eV}$). Спектр має широкосмуговий характер без явних максимумів. Довгохвильовий край залежності $\eta(h\nu)$ при $h\nu \leq 1,2\text{eV}$ експоненційний і характеризується високою крутизною $S=10\text{ eV}^{-1}$. Енергетичне положення краю власного поглинання при енергії фотонів $h\nu=1,24\text{ eV}$ відповідає основному екситонному поглинанню і близьке до величини ширини забороненої зони *InSe*.

Характерна особливість *p-n*-переходів, створених лазерною технологією на основі шаруватих монокристалів, – добра відтворюваність характеристик діодів, виготовлених з одного і того ж зливку, та їх стабільність: не було виявлено істотних змін фотоелектричних параметрів протягом двох місяців після їх виготовлення (вставка на рис. 3). Видно, що напруга холостого ходу V_{xx} стабілізується через 20 діб.

Висновки

Методом лазерного опромінення поверхні монокристалічного *p-InSe<Cd>* одержали *p-n*-переходи. Встановлено значення порогової густини енергії 12 Дж/см^2 , при якому починається плавлення поверхні кристалів. Аналіз температурних залежностей ВАХ в області прямих зміщень вказує на наявність двох основних механізмів струмопереносу: рекомбінаційного та тунельно-рекомбінаційного. Поведінка обернених гілок ВАХ характерна для струмів, обмежених просторовим зарядом. Фотовольтаїчні вимірювання свідчать про відсутність короткохвильового спаду у спектрі фотоструму.

Отримані гетеропереходи та наведені результати експериментальних досліджень показують перспективність даного напрямку. І при інтенсивному дослідженні фізичних основ процесу взаємодії лазерного випромінювання з шаруватими напівпровідниками описана технологія може широко застосовуватись для створення стійких і стабільних *p-n*-переходів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Товстюк К.Д., Пляцко Г.В., Орлецький В.Б., Кияк С.Г., Бобицький Я.В. Образование *p-n*- и *n-p*-переходов в полупроводниках излучением лазера // УФЖ. – 1976. – 21, №11, – С.1918–1920.
2. Цюцюра Д.И., Шкумбатюк П.С. Получение *p-n*-переходов на *CdTe<In>* лазерным отжигом // ФТП. – 1993. – 27, №6. – С.1064–1067.
3. Бобицький Я.В., Гертович Т.С., Кияк С.Г., Пляцко Г.В., Товстюк К.Д. Фотоелектрические характеристики *In₂Se* с *p-n*-переходами, образованными при облучении лазером // УФЖ. 1977. – 22, №4, – С.685–687.
4. Карнов С.Ю., Ковальчук Ю.В., Погорельский Ю.В. Плавление полупроводников под действием импульсного лазерного излучения (обзор) // ФТП. – 1986. – 20, №11, – С.1945–1968.
5. Пляцко С.В. Генерация объемных дефектов в некоторых полупроводниках лазерным излучением в области прозрачности кристалла // ФТП. – 2000. – 34, № 9, – С.1046–1052.
6. Арутюнян Р.В., Баранов В.Ю., Большов Л.А., Сербант А.Ю. Воздействие лазерного излучения на материал. – М.: Наука, 1983.