

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ УМОВ ВИГОТОВЛЕННЯ ГЕТЕРОПЕРЕХОДІВ СУЛЬФІД—ТЕЛУРИД КАДМІЮ НА ЇХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

Досліджено вплив умов відпалу на спектральні та інтегральні характеристики гетеропереходів твердофазного заміщення в системі сульфід-телурид кадмію. Встановлено, що збільшення температури та часу відпалу приводять до зменшення напівширини спектра fotocутливості та абсолютної величини струму короткого замикання. Запропоновані фізичні моделі, які пояснюють спостережувані ефекти.

The influence of annealing conditions on the spectral and integrated characteristics sulphide-telluride cadmium heterojunctions produced by solid state substitution is investigated. It is established, that increase of temperature and treatment time result in reduction of half-width of a spectrum of photosensitivity and absolute value of a short circuit current. The offered physical models, which explain observable effects.

Гетеропереходи (ГП) в системі сульфід-телурид кадмію можуть бути основою цілої низки приладів: високоефективних фотоприймачів [1], сонячних елементів з малим температурним коефіцієнтом зміни к.к.д. [2,3], детекторів іонізуючих випромінювань [4-6]. Їх параметри та характеристики визначаються технологічними умовами виготовлення гетероструктури. В даній роботі досліджено вплив температури та часу відпалу на основні фотоелектричні властивості анізотипних ГП сульфід-телурид кадмію, виготовлених методом реакцій твердофазного заміщення.

Вихідними підкладками служили монокристали CdS, вирощені з розплаву під тиском інертного газу і леговані до 1 мольн. проц. ізвалентною домішкою Те. Для збільшення електронної провідності до $10^{-0,1}$ Ом $^{-1}$ ·см $^{-1}$ кристали відпалювались в насиченій парі In: Cd=8:2 при 1100К на протязі 10 годин. Шари p-CdTe створювались методом реакцій твердофазного заміщення в замкнутому об'ємі [7]. Підкладка n-CdS та наважка (Te+CdTe+LiCO $_3$) знаходились в протилежних кінцях відкачаної до 10^{-4} Торр кварцової ампули. Температура T_a та час відпалу t_a змінювались в межах 770-970 К та 0,5-2 год. Технологія виготовлення діодної структури описана в роботах [1-6]. Дослідження товщини шару CdTe від T_a та t_a показали, що процес заміщення носить дифузійний характер. Температурна залежність коефіцієнта дифузії добре описується

виразом:

$$D \approx 4 \cdot \exp\left(-\frac{0,62}{kT_a}\right), \text{ см}^2/\text{с}. \quad (1)$$

Знання величини D дозволяє розрахувати товщину d заміщеного шару p-CdTe за відомою формулою [8]

$$d = 2\sqrt{D \cdot t_a}. \quad (2)$$

В досліджуваному діапазоні температур відпалу при $t_a=1$ год величина d змінюється в межах 20-200 мкм. Товщина варізонного шару d_0 CdS $_x$ Te $_{1-x}$, який виникає на межі розділу ГП, не перевищує $d_0 \leq 0,1d$ при всіх значеннях T_a і t_a . Отже, варіація технологічних умов створення ГП дозволяє в широких межах змінювати величини d і d_0 . Останні суттєво впливають на основні фотоелектричні характеристики і параметри гетероструктур, обговорення яких проведено нижче. Освітлення ГП проводилось зі сторони сульфїду кадмію.

Найбільших змін зазнають спектральні характеристики (Рис.1). Як видно з наведених даних, залежності струму короткого замикання I_{sc} від енергії фотона $\hbar\omega$ при зміні T_a міняють не тільки форму, але й межі fotocутливості. Найбільш широкий і майже плоский спектр характерний для гетероструктур, які виготовлені при найменшій T_a , крива 1 на рис.1. Він обмежений областю енергій фотонів 1,4-2,5 еВ, які близькі до ширини

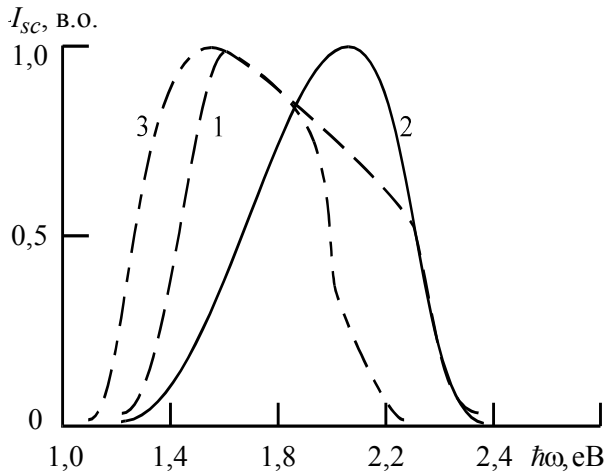


Рис. 1. Спектри фоточутливості ГП pCdTe-nCdS, виготовлених при різних T_a : 770 К (1), 870 К (2).

забороненої зони E_g CdTe і CdS [9]. Підвищення T_a приводить до зменшення напівширини смуги фоточутливості, а також зміщення максимуму $\hbar\omega_m$ в сторону більших енергій. Це зумовлено збільшенням частки генерованих фотоносіїв у шарі твердих розчинів $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$, ширина забороненої зони яких близька до E_g сульфїду кадмію. Утворення таких високоомних шарів у даному випадку цілком імовірно, оскільки Li в CdS є компенсуючою акцепторною домішкою [9]. На відміну від CdTe, інверсії типу провідності шляхом дифузії Li в CdS досягти неможливо. Отже, при даних T_a в ГП існує високоомний шар твердих розчинів $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ з великим x , де локалізована область просторового заряду (ОПЗ), яка, власне, і визначає спектр фоточутливості. По мірі зростання T_a збільшується товщина шару $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ з малим значенням x , що приводить до збільшення низькоенергетичної фоточутливості. Наявність чутливості при енергіях менших за E_g телуриду кадмію зумовлена тим, що залежність $E_g(x)$ твердих розчинів $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ нелінійна і має мінімум $E_g \approx 1,3$ eV при $x \approx 0,3$ [9]. Обмеження I_{sc} при $\hbar\omega \approx 2,2$ eV викликане тим, що товщина шарів $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ з великим x може перевищувати дифузійну довжину нерівноважних фотоносіїв і вони не розділяються полем ОПЗ. До аналогічних ефектів приводить також збільшення часу відпалу, однак його вплив значно слабший, ніж T_a . Це викликане, насамперед, тим, що T_a входить у показник експоненти виразу для коефіцієнта дифузії (1), тоді як залежність $d(t_a)$ тільки коренева (2).

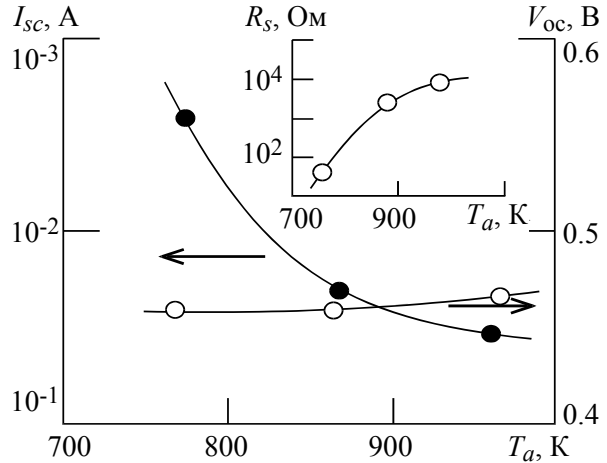


Рис.2. Залежності I_{sc} та V_{oc} від T_a . На врізці - залежність послідовного опору від температури відпалу.

Залежності струму короткого замикання від напруги холостого ходу при всіх T_a добре описуються відомим виразом [10] (при $eV_{oc} \geq 3kT$)

$$I_{sc} = I_0 \exp\left(\frac{eV_{oc}}{nkT}\right), \quad (3)$$

де T - температура вимірів, I_0 - струм відсічки при $V_{oc}=0$, n - коефіцієнт ідеальності вольт-амперної характеристики, який визначається механізмом проходження струму. При низьких V_{oc} коефіцієнт $n=2$, що свідчить про переважаючу генерацію фотоносіїв в ОПЗ гетеропереходу. Збільшення рівня освітленості P (великі значення V_{oc}) приводить до зменшення коефіцієнта n до одиниці. Це означає, що при таких зміщеннях домінуючими стають процеси надбар'єрного проходження носіїв заряду.

Збільшення T_a практично не впливає на величину V_{oc} (Рис.2). З іншої сторони, при зміні температури відпалу в інтервалі 770-970 К абсолютне значення I_{sc} зменшується більше, ніж на порядок. Це може бути зумовлено зростанням послідовного опору R_s фотодіода, який викликаний збільшенням товщини високоомних варізонних шарів. Останнє підтверджується даними, які наведені на рис.2 (врізка). (Послідовний опір визначався з навантажувальної світлової характеристики загальноприйнятим методом [10]). Зауважимо, що збільшення T_a приводить також до зменшення фактора заповнення ff навантажувальної характеристики, а в кінцевому результаті і до зменшення к.к.д. фотоперетворення. В досліджуваному діапазоні температур відпалу величина ff змінюється в межах 0,7-0,35.

Вплив послідовного опору проявляється також на залежностях I_{sc} та V_{oc} від рівня освітленості (Рис.3). Незважаючи на те, що їх можна описати відомими виразами [10]

$$I_{sc} = const \cdot P^m \quad (4)$$

$$V_{oc} = nkT \ln\left(\frac{const \cdot P}{I_0}\right), \quad (5)$$

деякі параметри залежать від умов відпалу. Відзначимо, насамперед, збільшення показника степені m від 1 до 1,5 при зростанні T_a в інтервалі 770-970 К. Це адекватно пояснюється впливом високоомних шарів твердих розчинів, які можуть мати помітну фотопровідність. Вона приводить до модуляції залежності $I_{sc}(P)$, в зв'язку з чим остання відрізняється від лінійної. Вплив T_a на залежність $V_{oc}(P)$ найбільш суттєвий в області низьких рівнів освітленості, що також пов'язано з наявністю високоомних шарів. У режимі холостого ходу фотоносії акумулюються в тих квазінейтральних областях ГП, де вони є основними. Якщо при цьому їх концентрація більша, ніж рівноважна, то буде відбуватись зміщення квазірівнів Фермі до країв відповідних зон дозволених енергій. Це приводить до збільшення висоти та зменшення ширини потенціального бар'єру i , в кінцевому результаті, до аномальної залежності $V_{oc}(P)$. Відзначимо, що подібні характеристики спостерігались також на ГП без товстих високоомних шарів в умовах інтенсивного лазерного збудження [11]. В нашому випадку, цей ефект реалізується при набагато менших рівнях освітленості внаслідок наявності в ГП шарів з низькою концентрацією основних носіїв заряду.

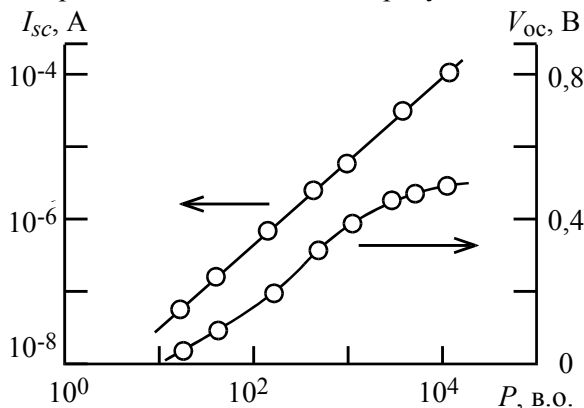


Рис. 3. Залежності I_{sc} та V_{oc} від рівня освітленості для ГП, виготовленого при $T_a=870$ К.

На завершення зауважимо, що для ГП з шириною ОПЗ, набагато більшою від дифузійних довжин неосновних носіїв, темнові та світлові вольт-амперні характеристики описуються теорією струмів, обмежених об'ємним зарядом [11]. Властивості таких фотодетекторів описані в роботах [1,4,5].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Махній В.П., Барасюк Я.Н. Фотоприемник с внутренним усилением на основе гетероперехода сульфид-теллурид кадмия // Микроэлектроника. - 1998. - 27, №2. - С.90-93.
2. Баранюк В.Е., Косяченко Л.А., Махній В.П. Свойства фотоэлемента на основе варизонной структуры сульфид-теллурид кадмия // Гелиотехника. - 1988. - №5. - С.17-20.
3. Баранюк В.Е., Барасюк Я.М., Махній В.П. Электричні та фотоелектричні властивості гетеропереходів сульфід-теллурид кадмію // УФЖ. - 1996. - 41, №4. - С.453-457.
4. Barasyuk Ya.M., Makchniy V.P., Sklyarchuk V.M. Detector of X-rays Based on a Cadmium Sulfide-Telluride Heterojunction // Inst. and Experim. Techn. - 1997. - 40, №2. - P.254-255.
5. Махній В.П., Барасюк Я.Н. Интегральный детектор ионизирующих излучений на основе гетероперехода сульфид-теллурид кадмия // Письма в ЖТФ. - 1997. - 23, №6. - С.15-18.
6. Баранюк В.С., Барасюк Я.М., Махній В.П., Малімон І.В. Спектральні та дозиметричні характеристики рентгеночутливих гетеропереходів сульфід-теллурид кадмію // Науковий вісник ЧДУ. Вип. 30: Фізика. - Чернівці: ЧДУ, 1998. - С.132-138.
7. Махній В.П. Механизм образования гетероструктур при твердофазном замещении на основе соединений A^2B^6 // Извест. АН СССР. Неорганич. матер. - 1991. - 27, №3. - С.619-620.
8. Курносое А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. - М.: Высш. школа, 1986.
9. Берченко Н.Н., Кревс В.Е., Средин В.Г. Полупроводниковые твердые растворы и их применение. - М.: Воениздат, 1982.
10. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: Теория и Эксперимент / Пер. с англ. под ред. М.М. Колтуна. - М.: Энергоатомиздат, 1987.
11. Симашикевич А.В. Гетеропереходы на основе полупроводниковых соединений A^2B^6 . - Кишинев: Штиинца, 1980.