

ГЕНЕРАЦІЙНО-РЕКОМБІНАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ НА КОНТАКТІ Pt/n-CdTe

Наведено результати дослідження електричних явищ на фоточутливому контакті Pt/n-CdTe. За даними вольт-фарадних досліджень розраховані параметри бар'єра Шоттки. Встановлені механізми проходження струму крізь бар'єр: рекомбінація при прямих і генерація та тунелювання при зворотних зміщеннях. Електричні характеристики переходів кількісно описані в рамках моделі генерації-рекомбінації в області просторового заряду з урахуванням генераційно-рекомбінаційного рівня всередині забороненої зони.

In this paper the results of electric phenomena on the photosensitive contact of Pt/n-CdTe are presented. Schottky barrier parameters have been estimated on the base of Volt-Farad investigations. There were established the mechanisms of current flow through the barrier: recombination at the direct bias and generation and tunneling at inverse ones. Electrical characteristics of transitions are quantitatively described in the frames of generation-recombination model in spacialcharge region taking into account the generation-recombination level having place in the energy gap.

Телурид кадмію володіє оптимальними оптичними властивостями з огляду на фотовольтаїчне перетворення сонячної енергії [1-3]. Основною проблемою на шляху створення високоефективних приладів на CdTe є забезпечення необхідних електричних властивостей структури, які визначаються як параметрами базового матеріалу, так і технологією виготовлення структур. Створення й дослідження електричних та оптичних властивостей контакту металів із телуридом кадмію – ефективний спосіб вивчення особливостей поведінки такого напівпровідника в загальній системі електричних переходів у твердих тілах.

Для виготовлення структур використовували монокристали n-CdTe, вирощені вертикальним методом Бріджмена. Значення концентрації електронів і рухливості при кімнатній температурі дорівнювали 10^{17} см^{-3} та $1000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ відповідно. Поверхнево-бар'єрні структури виготовляли термічним випаровуванням платини у вакуумі на механічно та хімічно оброблену поверхню пластини CdTe.

Прямі гілки вольт-амперних характеристик (ВАХ) контакту Pt/n-CdTe, досліджені в діапазоні температур 291÷325 К, наведені на рис. 1. Для них характерно зменшення напруги, при якій спостерігається швидке зростання струму з підвищенням температури внаслідок зниження

висоти потенціального бар'єра, зумовленого контактною різницею потенціалів. Структури виявилися стабільними за електричними властивостями при величині прямого струму до 400 мА/см^2 . Оцінені значення висоти потенціального бар'єра за прямими вітками $e\phi_0=0,67 \text{ еВ}$. Лінійна ділянка ВАХ при додатних напругах вказує на існування у структурі внутрішнього опору величиною $R_{\text{П}}=100 \text{ Ом}$, значення якого за оцінкою відповідає питомому опору застосованого базового матеріалу CdTe з урахуванням геометричних форм досліджуваних зразків.

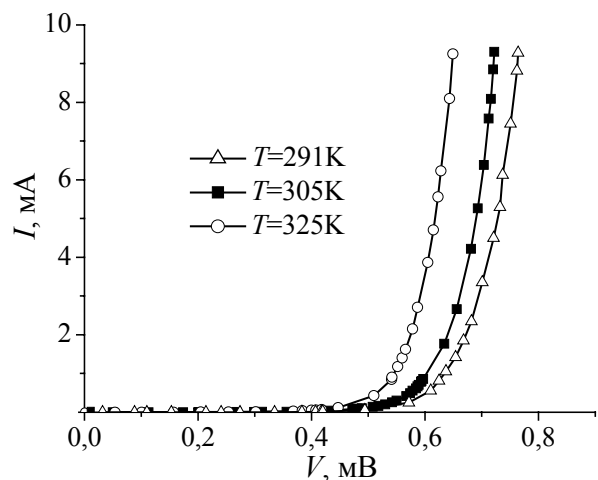


Рис. 1. Прямі вітки вольт-амперних характеристик поверхнево-бар'єрних структур Pt/n-CdTe

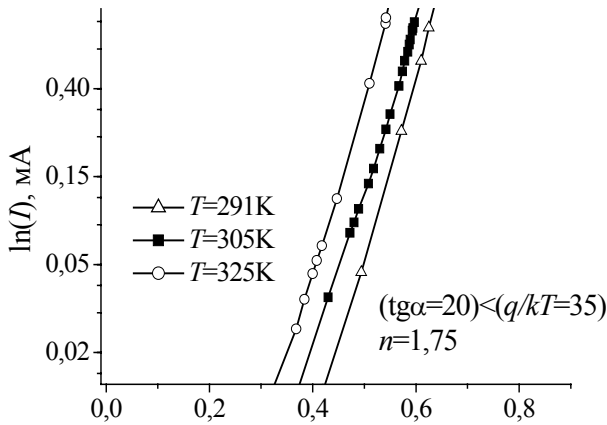


Рис. 2. Рекомбінаційний механізм перенесення носіїв заряду крізь енергетичний бар'єр при прямому зміщенні

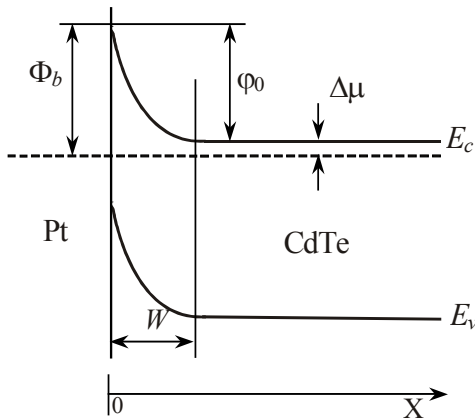


Рис. 3. Енергетична діаграма поверхнево-бар'єрної структури Pt/n-CdTe: $\phi_0=1,13\text{eV}$, $\Delta\mu=0,06\text{eV}$, $w=0,6\text{мкм}$

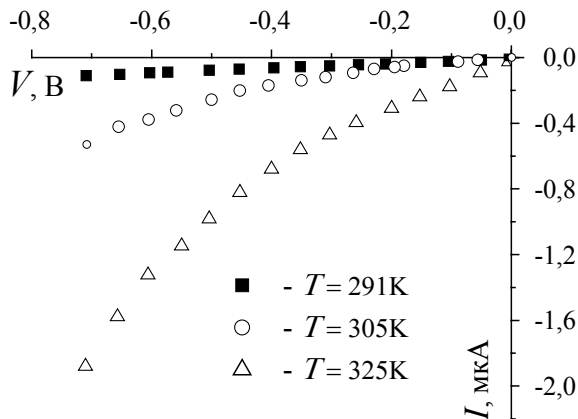


Рис. 4. Залежність зворотного струму від напруги і температури у структурах Pt/n-CdTe

Аналіз проходження носіїв заряду крізь енергетичний бар'єр у прямому напрямку (рис. 2) вказує на переважаючий рекомбінаційний механізм (коефіцієнт неідеальності $n=1,75$) в діапазоні прямих зміщень до 0,6 В. При напругах

$V > 0,6\text{ В}$ переважає тунельний механізм протікання основних носіїв заряду крізь енергетичний бар'єр за участю глибоких рівнів, зумовлених існуванням межі поділу. Внаслідок цього різке зростання струму з прикладеною прямою напругою настає швидше ($V=0,67\text{ В}$), ніж у випадку термоемісії ($V=1,13\text{ В}$).

Розраховані за вимірними вольт-фарадними характеристиками (ВФХ) товщина збідненої області електричного переходу без зовнішнього зміщення становить $w=0,6\text{ мкм}$, напруженість вбудованого електричного поля $E=3,7 \cdot 10^6\text{ В/м}$. Лінійний характер залежності $S^2/C^2=f(V)$ вказує на стабільність електричних властивостей базового матеріалу та відсутність впливу на нього технологічних операцій виготовлення структури. Висота потенціального бар'єра за даними ВФХ складає $\phi_0=1,13\text{ eV}$. При побудові енергетичної діаграми (рис. 3) мали на увазі, що хід потенціальної енергії в області просторового заряду описується виразом [4]

$$\phi(x, V) = (\phi_0 - eV) \left(1 - \frac{x}{w}\right)^2, \quad (1)$$

де ϕ_0 – висота потенціального бар'єра, w – товщина збідненої області.

Дослідження темнових зворотних гілок ВАХ (рис. 4) дозволило з'ясувати механізми протікання струму в поверхнево-бар'єрних структурах Pt/n-CdTe з метою оцінки можливостей зменшення зворотного струму. При врахуванні тільки надбар'єрного та генераційного механізмів струмопротікання залежність струму від напруги повинна бути слабшою [5], ніж спостережувана експериментально у структурах Pt/n-CdTe (рис.4), що, можливо, зумовлено внеском тунельної складової струму. У випадку тунельного характеру проходження струму залежність $I=f(V)$ для різкого переходу має вигляд [6]

$$I = a_0(\phi_0 - eV) \exp\left(-\frac{b_0}{(\phi_0 - eV)^{1/2}}\right), \quad (2)$$

де a_0 і b_0 визначаються параметрами електричного переходу і не залежать від напруги. Згідно з виразом (2), залежність $I(V)$ в координатах $\ln I=f(\phi_0 - eV)^{-1/2}$ повинна зображатись прямими лініями, що і спостерігається під час досліду в області зворотних напруг $|V| > 1\text{ В}$ (рис. 5). Підвищення температури спричинює зменшення нахилу прямих, не змінюючи характеру їх залежності. При зворотних зміщеннях $|V| < 1\text{ В}$ спостерігається відхилення від прямолінійної

залежності $\ln I = f(\phi_0 - eV)^{-1/2}$, що свідчить про значний внесок у зворотний струм теплових складових. Швидке зростання на цій ділянці зворотного струму з напругою і його суттєва залежність від температури дозволяє встановити його природу як термогенераційну.

У загальному випадку залежність струму від напруги знаходять шляхом інтегрування швидкості рекомбінації $U(x)$ по всій області просторового заряду діодної структури [4,7]

$$I = Ae \int_0^w U(x) dx, \quad (3)$$

де A – площа електричного переходу, w – товщина просторового заряду. Згідно зі статистикою, рекомбінації Шоклі-Ріда [5]

$$U(x, V) = \frac{n(x, V)p(x, V) - n_i^2}{\tau_{p0}[n(x, V) + n_1] + \tau_{n0}[p(x, V) + p_1]}, \quad (4)$$

де $n(x, V)$ і $p(x, V)$ – нерівноважні концентрації носіїв відповідно в зоні провідності й валентній зоні, n_i – їх власна концентрація, τ_{n0} і τ_{p0} – ефективний час життя електронів і дірок в області просторового заряду.

Величини n_1 і p_1 дорівнюють рівноважним концентраціям електронів і дірок за умови, що рівень Фермі збігається з рівнем рекомбінації E_t , тобто

$$\begin{aligned} n_1 &= N_C \exp(-E_t / kT), \\ p_1 &= N_V \exp(-(E_g - E_t) / kT). \end{aligned} \quad (5)$$

При виконанні умови $eV \gg kT$ зворотний генераційний струм [4,5]:

$$|I_g| = \frac{ep_1 w}{\tau_{p0}} \frac{\sqrt{E_g - \Delta\mu - E_t - eV} - \sqrt{E_t - \Delta\mu}}{\sqrt{\phi_0 - eV}}, \quad (6)$$

де $\Delta\mu$ – глибина залягання рівня Фермі в заборонованій зоні напівпровідника.

Для розрахунку струму використовувалась висота бар'єра $\phi_0 = 1,13$ eV за результатами дослідження ВФХ. Порівняння розрахунків за формулою (6) з експериментальними даними ВАХ при малих зворотних зміщеннях (до $|V| = 1$ В) дають можливість знайти глибину залягання генераційно-рекомбінаційного рівня.

Найкращий збіг з експериментом для поверхнево-бар'єрних структур отримано при $E_t = 0,59$ eV і часі життя в області просторового заряду $\tau_{n0} = \tau_{p0} = 3,2 \cdot 10^{-8}$ с (рис. 6).

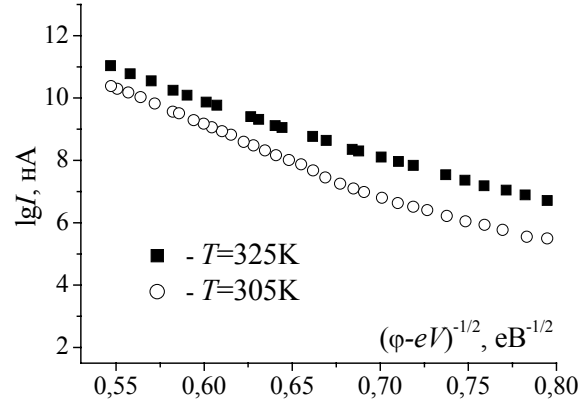


Рис. 5. Тунельний механізм руху носіїв заряду крізь енергетичний бар'єр Pt/n-CdTe при зміщенні у зворотному напрямку

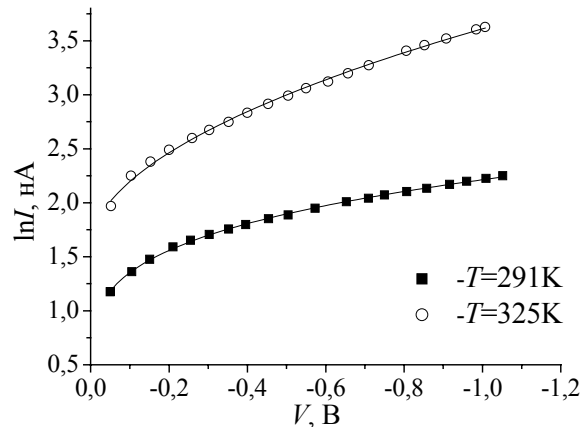


Рис. 6. Зіставлення розрахованих ВАХ при глибині залягання генераційно-рекомбінаційного рівня $E = 0,59$ eV (лінії) з експериментальними даними

Практично важливим є те, що зворотні струми в досліджуваній поверхнево-бар'єрній структурі визначаються генерацією у збідненій області, тобто величинами τ_{n0} і τ_{p0} . Оскільки ефективні значення часу життя у збідненій області обернено пропорційні концентрації генераційно-рекомбінаційних центрів, то для зменшення зворотного струму потрібно значну увагу приділяти якості обробки поверхні для забезпечення мінімальної глибини порушеного шару.

Поверхнево-бар'єрні структури при освітленні випромінюванням, близьким за спектральним складом до сонячного, виявляли фоточутливість. Густина струму короткого замикання складала $400 \div 500$ мкА/см². Ця величина визначається прозорістю металеві плівки, часом життя неосновних носіїв заряду в базовій області і станом межі поділу метал-напівпровідник. Напруга холостого ходу у всіх досліджуваних структурах знаходиться в межах $0,45 - 0,5$ В.

Висновки

Отримані випрямляючі поверхнево-бар'єрні структури Pt/n-CdTe – фоточутливі у видимій області випромінювання. Електричні характеристики переходів кількісно описуються в рамках моделі генерації-рекомбінації в області просторового заряду з урахуванням особливостей процесів, які відбуваються в поверхнево-бар'єрній структурі. Глибина залягання генераційно-рекомбінаційного рівня 0,59 еВ, ефективний час життя носіїв заряду $3,2 \cdot 10^{-8}$ с. Результати експериментальних досліджень вказують на перспективу оптимізації технологічних і зонних параметрів структури для суттєвого поліпшення фотоелектричних властивостей.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Колтун М.М. Солнечные элементы. – М.: Наука, 1987.
2. Чопра К., Дас С. Тонкопленочные солнечные элементы. – М.: Мир, 1986.
3. Вегнер С.Ф., Дмитрук М.Л., Комащенко В.М. Перспективні фотовольтаїчні матеріали і структури на основі напівпровідників A^2B^6 (фізико-технологічні аспекти) // Оптоелектроника и полупроводниковая техника. – 2002. – №37. – С.220-235.
4. Косяченко Л.А., Паранчич Ю.С., Макогоненко В.Н., Склярчук В.М., Склярчук Е.Ф., Герман И.И. Электрические свойства поверхностно-барьерной фотодиодной структуры на основе HgInTe // ЖТФ. – 2003. – 73, №5. – С.126-129.
5. Косяченко Л.А., Махний В.П., Потыкевич И.В. Генерация-рекомбинация в области пространственного заряда контакта металл-CdTe // УФЖ. – 1978. – 23, №2. – С.279-286.
6. Барасюк Я.М., Баранюк В.Є., Демич М.В., Махний В.П., Собіщанський Б.М. Механізми формування оберненого струму у фотодіодах на основі гетеропереходу pCdTe-nCdS // Науковий вісник ЧНУ. Вип. 112: Фізика. – Чернівці: ЧНУ, 2001. – С.78-81.
7. Косяченко Л.А., Паранчич С.Ю., Танасюк Ю.В., Склярчук В.М., Склярчук Е.Ф., Маслянчук Е.Л., Мотуцук В.В. Генерационно-рекомбинационные центры в CdTe:V // ФТП. – 2003. – 37, №4. – С.469-472.