

# МАТЕРІАЛИ ДЛЯ СЕНСОРІВ SENSORS MATERIALS

---

УДК.621.315.592

## ОДЕРЖАННЯ ТА ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГЕТЕРОПЕРЕХОДІВ *n*-CdO/*p*-Si

В. В. Хомяк, Л. Ф. Політанський

*Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича*  
*вул. Коцюбинського 2, v.khomyak@chnu.edu.ua*

## ОДЕРЖАННЯ ТА ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГЕТЕРОПЕРЕХОДІВ *n*-CdO/*p*-Si

В. В. Хомяк, Л. Ф. Політанський

**Анотація.** Досліджувалися отримання, структурні та оптичні властивості тонких плівок CdO. Тонкі плівки були отримані з кадмієвої мішені методом реактивного магнетронного розпилення на постійному струмі. З експериментальних результатів розраховані показник заломлення, коефіцієнт екстинкції та поглинання. Нанесенням оксиду кадмію на кремнієву підкладку *p*-типу створено гетероструктуру *n*-CdO/*p*-Si та досліджено її вольт-амперні (ВАХ) та вольт-фарадні (ВФХ) характеристики. Із аналізу ВАХ та ВФХ оцінено основні механізми струмопереносу створених діодних структур.

**Ключові слова:** тонка плівка, *n*-CdO/*p*-Si, коефіцієнти екстинкції та поглинання, показник заломлення, тунелювання

## OBTAINING AND ELECTRICAL PROPERTIES OF *n*-CdO/*p*-Si HETEROJUNCTIONS

V. V. Khomyak, L.F. Politans'kyu

**Abstract.** There have been investigated the obtaining and structural and optical properties of CdO thin films. Thin films were received with cadmium target by DC method on direct current. From the experimental results there were determined refractive index, extinction coefficient and absorption coefficient. Heterojunction of *n*-CdO/*p*-Si has been obtained by sputtering of cadmium oxide on *p*-Si substrate. Current-voltage characteristics (CV) and capacitance-voltage characteristics have been studied and on their base the main mechanisms of current transport of the formed diode heterojunctions have been evaluated.

**Keywords:** thin films, absorption coefficient, extinction coefficient, refractive index, *n*-CdO/*p*-Si, tunneling

ПОЛУЧЕНИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ  $n\text{-CdO}/p\text{-Si}$ 

В. В. Хомяк, Л. Ф. Политанский

**Аннотация.** Исследовались получение, структурные и оптические свойства тонких плёнок CdO. Тонкие плёнки были получены из кадмиевой мишени методом реактивного магнетронного распыления на постоянном токе. Из экспериментальных результатов рассчитаны показатель преломления, коэффициент экстинкции и поглощения. Нанесением оксида кадмия на кремниевую подложку  $p$ -типа создана гетероструктура  $n\text{-CdO}/p\text{-Si}$  и исследованы ее вольт-амперные (ВАХ) и вольт-фарадные (ВФХ) характеристики. Из анализа ВАХ и ВФХ оценены основные механизмы токопереноса созданных диодных структур.

**Ключевые слова:** тонкая плёнка,  $n\text{-CdO}/p\text{-Si}$ , коэффициенты экстинкции и поглощения, показатель преломления, туннелирование.

**Вступ**

Розробка і дослідження нових тонкоплівкових матеріалів диктуються вимогами швидкопрогресуючих сучасних технологій. Прогресивний розвиток електронної техніки потребує розробки високоефективних тонкоплівкових напівпровідникових матеріалів з високою прозорістю й електропровідністю, а також зі стабільними та відтворюваними характеристиками та якісною морфологією поверхневого шару.

В останні роки оксиди металів з напівпровідниковими властивостями досить широко застосовуються в різних промислових приладах, особливо у галузі фотоелектричної техніки для різних цілей: як прозорі контакти чи прозорі шари (вікна) для сонячних елементів, антивідбиваючі покриття, а також як складові елементи в гетероструктурах [1-4].

Оксид кадмію ( $\text{CdO}$ ) –  $A^{IV}B^{VI}$  напівпровідник з шириною забороненої зони 2.2 - 2.7 eV і завдяки малому електричному опору та високій прозорості у видимій області спектру є перспективним матеріалом для сонячних елементів промислового виготовлення [5, 6].

Як правило, у більшості випадків отримують тонкі плівки  $\text{CdO}$  методом пульверизації з наступним піролізом та шляхом росту з розчину [6]. Однак цими методами важко отримати плівки з великою провідністю та прозорістю, а

також забезпечити однаковий стехіометричний склад і тому ефективність створення приладів з використанням плівок  $\text{CdO}$ , отриманих названими вище методами є невеликою.

Отже проблема створення прозорих провідних тонких плівок з наперед заданими властивостями, а також розробки високоефективних і дешевих технологій їх виготовлення, є досить актуальною.

Мета роботи полягає в одержанні методом реактивного магнетронного розпилення на постійному струмі плівок оксиду кадмію і дослідженні їх структурних, оптичних характеристик, а також створенні гетероструктур  $n\text{-CdO}/p\text{-Si}$  та дослідженні їх електричних характеристик.

**Експеримент**

Тонкі плівки  $\text{CdO}$  виготовлялися за допомогою методу реактивного магнетронного розпилення на постійному струмі (реактивний DC метод) в суміші газів  $\text{Ar}$  і  $\text{O}_2$  на промисловій установці ВУП-5М із спеціально сконструйованим зовнішнім блоком живлення магнетрона. Блок живлення давав можливість контролювано задавати на катод значення постійної напруги та струму в межах 50–1000 В і 10–500 мА відповідно. Особливістю даної конструкції є те, що живлення магнетрона має режим стабілізації по струму (на відміну від промислової установки ВУП-5М), а це дає можливість уник-

нути неконтрольованих розрядів на катоді й підтримувати задані значення струму розряду при розпиленні. Загальний тиск робочого газу, який подається в камеру може контролювано змінюватись від 0.1 до 10 Па. Катодом слугував диск діаметром 40 мм, отриманий з високочистого кадмію Cd (клас чистоти 5N). Розпилення проводилося на підкладку зі сапфіру й кремнію *p*-типу провідності. Сапфірова підкладка була попередньо очищена миючим засобом, а потім очищалася в метанолі й ацетоні протягом 10 хвилин, після чого промивалася деіонізованою водою і висушувалася. Нанесення на сапфір було використано для вивчення оптичної прозорості, а кремній для дослідження товщини отриманих плівок, а також для створення гетероструктур. Осадження проводилося при різних температурах підкладок в інтервалі від кімнатної до 350°C.

Товщина одержаних плівок оцінювалася за допомогою інтерференційного мікроскопа МІІ-4, а також по піках інтерференції на кривих спектра пропускання й становила 425 – 1800 нм залежно від технологічних умов осадження (тиску робочого газу в камері, струму магнетрона, температури підкладки, часу осадження). Дослідження кристалічної структури було проведено з допомогою X-променевої дифракції (XRD) на установці Bruker AXS D505 з монохроматичним  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 0.154056$  нм) опроміненням. Оптична прозорість (пропускання) досліджувалося за допомогою спектрофотометра МДР-23 при кімнатній температурі в діапазоні довжин хвиль 200 – 1100 нм. Вольт-амперні та вольт-фарадні характеристики гетероструктури *n*-CdO/*p*-Si вимірювали за допомогою комплексу SOLARTRON SI 1286, SI 1255.

### Результати і обговорення

На рис. 1 наведені типові рентгенівські дифрактограми плівок CdO, вирощених при різних технологічних режимах [7]. У спектрах спостерігається інтенсивний пік (200), характерний для кубічної структури. Однак плівки, які вирощені при температурах підкладки  $T_s \leq 423$  К, збагачені непрореагованим з киснем кадмієм, про що свідчить додатковий пік на

кривій X-променевої дифракції (рис. 1, крива 1). Такий же додатковий пік спостерігається для плівок, одержаних при вищих температурах підкладки, коли тиск газу в робочій камері  $P_g \leq 0,13$  Па і струм магнетрона  $I_m \geq 140$  мА (рис. 1, крива 5). Поява додаткового максимуму пов'язана з присутністю кристалічної фази Cd. Однофазні плівки CdO без слідів неокисленого Cd отримувалися при температурах росту  $T_s > 423$  К та відповідному виборі тиску  $P_g$  і струму магнетрона  $I_m$ . Проведення ізотермічного відпалу протягом 10 хв на повітрі приводило до того, що всі вирощені плівки ставали однофазними без слідів Cd (див. рис. 1, криві 1, 3 і 5, 6). Максимум інтенсивності основного піка збільшується (зі зникненням додаткового максимуму) як зі збільшенням температури відпалу, так і температури осадження, що вказує на однофазність таких плівок і підвищення їх структурної досконалості.

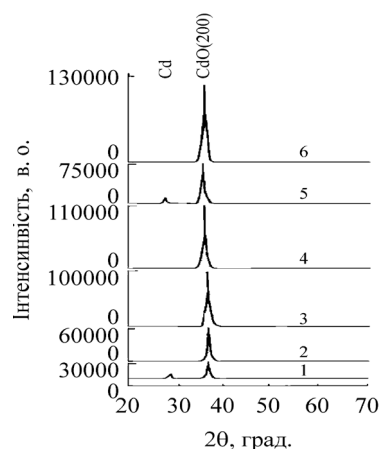


Рис. 1. Рентгенівські дифракційні профілі плівок CdO, вирощених при різних температурах підкладки  $T_s$ , К: 1, 3 — 373; 2, 4 — 473; 5, 6 — 573 і відпалених на повітрі при  $T_a$ , К: 3 — 473; 4, 6 — 773. Плівки 1 — 4 отримані при  $P_g = 1,5$  Па і  $I_m = 100$  мА; 5, 6 —  $P_g = 0,13$  Па і  $I_m = 140$  мА

Середній розмір зерен плівки CdO був розрахований за допомогою рівняння Шеррера [8]:

$$D = \frac{0.94\lambda}{\beta \cos \theta}, \quad (1)$$

де  $\beta$  — повна ширини на піввисоті (FWHM) піку,  $D$  — розмір зерна,  $\theta$  — кут відбивання,  $\lambda$  — довжина рентгенівської хвилі.

Розмір зерна плівки CdO, вирощеної при 350°C на сапфіровій підкладці, складав 23 нм для площини (200).

На рис. 2 наведена спектральна залежність коефіцієнта пропускання плівки CdO нанесеної на сапфірову підкладку при кімнатній температурі. Спостерігається високий, більше 80%, середній коефіцієнт пропускання у видимій області спектра.

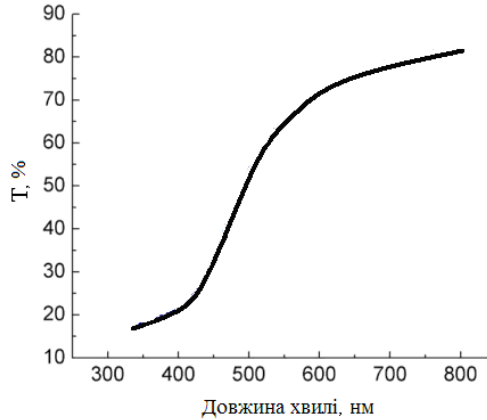


Рис. 2. Спектр пропускання тонкої плівки оксиду кадмію, одержаної при кімнатній температурі

На рис.3 наведено оптичний спектр пропускання тонкої плівки CdO отриманої при температурі 350°C (всі інші технологічні параметри такі ж, що й для попередньої плівки) в діапазоні довжин хвиль від 200 до 1100 нм.

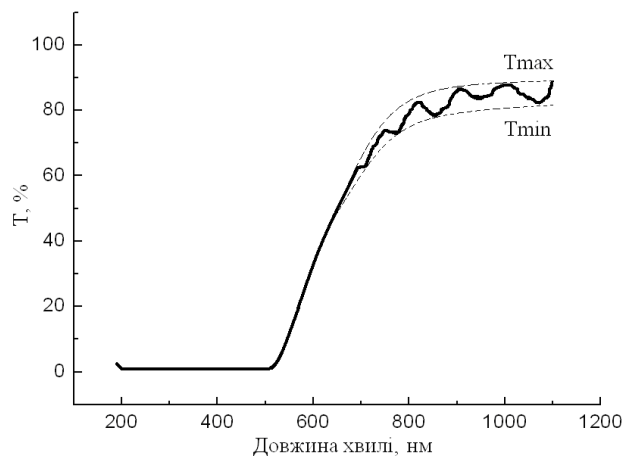


Рис. 3. Крива пропускання плівки CdO, одержаної при  $T_s = 350^\circ\text{C}$

Оптичні константи, такі як показник заломлення  $n$  і коефіцієнт екстинкції  $k$  були визначені зі спектру пропускання (рис. 3) з використанням методу огинаючої. Показник заломлення та коефіцієнт екстинкції розраховувалися з допомогою системи рівнянь [9]:

$$n = \left[ N + (N^2 - n_s^2)^{1/2} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

$$N = \frac{(n_s^2 + 1)}{2} + 2n_s \frac{(T_{\max} - T_{\min})}{T_{\max} T_{\min}}, \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \frac{(n-1)(n-n_s) \left[ (T_{\max}/T_{\min})^{1/2} + 1 \right]}{(n+1)(n-n_s) \left[ (T_{\max}/T_{\min})^{1/2} - 1 \right]}, \quad (4)$$

$$k = \frac{\alpha \lambda}{4\pi}, \quad (5)$$

де  $n_s$  — показник заломлення сапфірової підкладки ( $n_s = 1.766$ ),  $T_{\max}$  і  $T_{\min}$  — максимум і мінімум пропускання на тій же довжині хвилі в апроксимуючих огинаючих кривих спектра пропускання,  $\alpha$  — коефіцієнт поглинання,  $d$  — товщина плівки.

Товщина плівки ( $d \approx 1,04$  мкм), одержаної при 350°C була розрахована на основі формули [10]:

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2[n(\lambda_1)\lambda_2 - n(\lambda_2)\lambda_1]}, \quad (6)$$

де  $n(\lambda_1)$  і  $n(\lambda_2)$  показник заломлення в двох сусідніх максимумах (або мінімумах) при довжинах хвиль двох сусідніх екстремумів  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  в припущенні, що  $n(\lambda_1) \approx n(\lambda_2)$ .

Спектральні залежності розрахованих значень  $n$  і  $k$  наведені на рис. 4. Видно, що показник заломлення змінюється від 2.48 до 2.35, в той час, як коефіцієнт екстинкції зростає від 0.04 до 0.09.

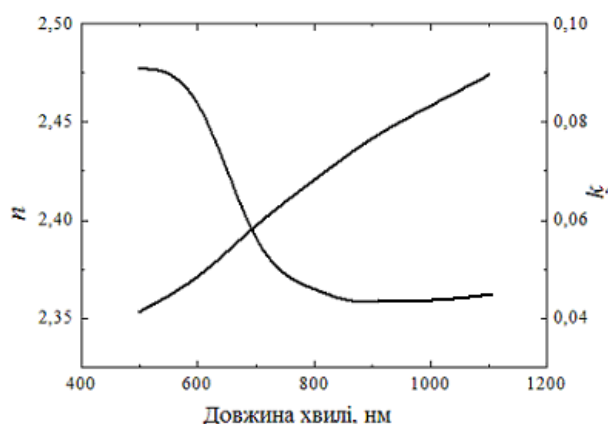


Рис. 4. Спектральні залежності показника заломлення і коефіцієнта екстинкції плівок CdO

На основі результатів оптичного пропускання були розраховані значення коефіцієнта поглинання  $\alpha$  (рис.5) з використанням наступного співвідношення [11]:

$$\alpha = [2.303 \cdot \log(1/T)/d], \quad (7)$$

де  $T$  — коефіцієнт пропускання,  $d$  — товщина плівки. Використовуючи розраховану спектральну залежність коефіцієнта поглинання, екстраполюванням лінійної ділянки графічної залежності  $(\alpha h\nu)^2 = f(h\nu)$  до нуля, була визначена ширина забороненої зони, яка становить  $E_g = 2.25$  eV і добре узгоджується з літературними даними [5-7,11,12].

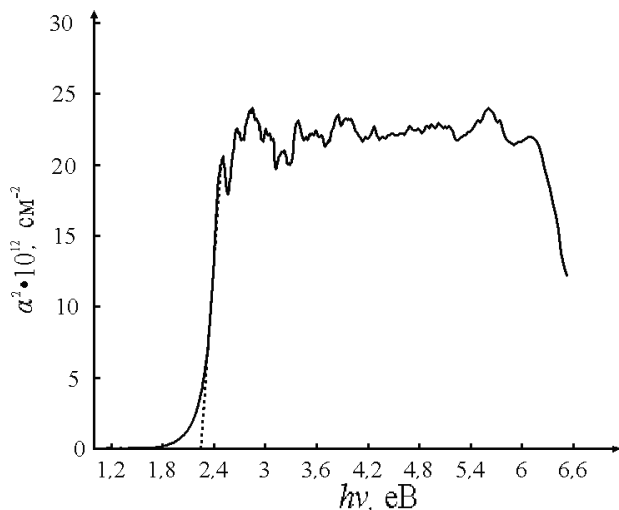


Рис. 5. Залежність  $(\alpha h\nu)^2 = f(h\nu)$  для тонкої плівки CdO

На рис. 6 наведена схема діода  $n$ -CdO/ $p$ -Si, отриманого шляхом нанесення тонкої плівки CdO при 350°C на підкладку монокристалічного кремнію  $p$ -типу провідності. До нанесення CdO плівки, кремнієві пластини занурювалися в розбавлений розчин HF, а потім промивалися дистильованою водою для видалення оксиду. За допомогою термічного випаровування формувалися алюмінієві контакти товщиною 100 нм як на фронтальній, так і на тильній поверхнях створеної гетероструктури.

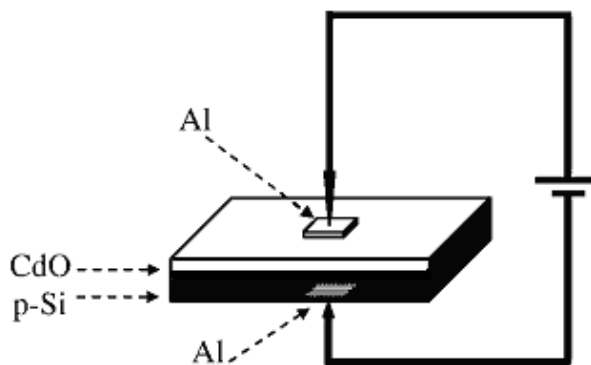


Рис. 6. Схема  $n$ -CdO/ $p$ -Si діода

На рис. 7 наведені вольт-амперні характеристики (ВАХ) виміряні при різних температурах виготовленого діода  $n$ -CdO/ $p$ -Si. Прямі і зворотні струми діода зростають зі збільшенням температури. Видно, що прямі та зворотні вітки ВАХ добре апроксимуються лінійними залежностями, що свідчить про експоненціальну залежність струму від напруги. Відсутність температурної залежності нахилу ВАХ свідчить про домінування багатоступінчастого тунельно-рекомбінаційного механізму струмопереносу [13].

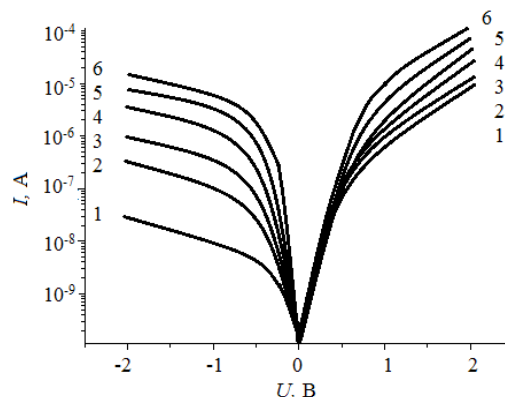


Рис. 7. ВАХ  $n$ -CdO/ $p$ -Si (в напівлогарифмічному масштабі) діода, виміряна при різних температурах  $T$ : 1 — 80 К, 2 — 140 К, 3 — 300 К,

4 — 340 К, 5 — 360 К, 6 — 400 К

Оскільки отримана гетероструктура володіє  $p$ - $n$  провідністю, то ВАХ  $n$ -CdO/ $p$ -Si може бути проаналізована за таким співвідношенням [14]:

$$I = I_0 \exp[A(U - IR_S)], \quad (8)$$

де  $I_0$  — зворотний струм насичення,  $U$  — прикладна напруга,  $I$  — значення струму,  $R_S$  — послідовний опір і  $A$  — константа, яка не залежить від напруги. Величини  $I$  й  $A$  були визначені з прямої гілки ВАХ діода. Значення величини  $A$  наведені в табл. 1.

Залежність  $I_0$  від температури в напівлогарифмічних координатах (рис. 8) свідчить, що  $I_0$  експоненційно зростає зі збільшенням температури і може бути описана таким співвідношенням [15]:

$$I_0 = I_S \exp\left(-\frac{E}{kT}\right), \quad (9)$$

де  $I_S$  — передекспоненційний множник,  $T$  — температура,  $k$  — стала Больцмана,  $E$  — енергія активації.

При низькій напрузі прямий струм діода знаходиться під контролем багатоступінчастого тунельного механізму струмопереносу. Ця модель пов'язана з рекомбінацією електронів, що тунелюють з CdO у незаповнені стани  $p$ -кремнію, в той час як тунелювання дірок відбувається зі станів  $p$ -кремнію у стани  $n$ -CdO і тому відбувається багатоступінчастий процес тунелювання, внаслідок стрибків дірок між локалізованими станами [16, 17].

Характерно, що на кривій спостерігаються дві прямолінійні ділянки (I і II), які мають різні нахили. Отже, крива дає дві енергії активації, величини яких, визначені з нахилу прямолінійних ділянок для області I та II, дорівнюють 36.1 меВ та 138.6 меВ відповідно. Це вказує, що існуючі механізми струмопереносу діода при низьких і більш високих температурах відрізняються. Ми вважаємо, що механізм струмопереносу при низьких температурах відповідає тунельному механізму, в той час як при більш високих температурах, він контролюється рекомбінаційними струмами, оскільки коефіцієнт  $A$  проявляє залежність від температури [14].

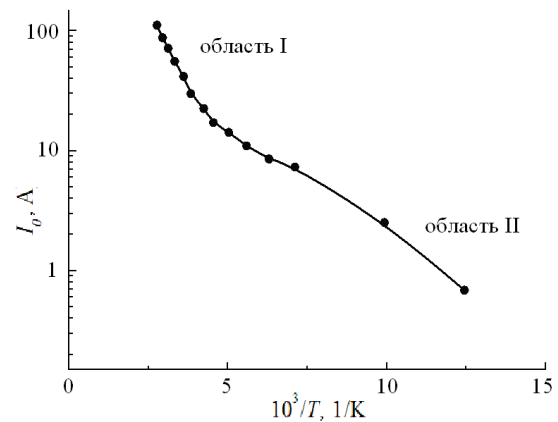


Рис. 8. Залежність зворотного струму насичення  $I_0$  від температури

Фактор ідеальності  $n$ -CdO/ $p$ -Si діода може бути розрахований за формулою [18]:

$$I = I_0 \exp [qU / (nkT)], \quad (10)$$

де  $I_0$  — зворотний струм насичення,  $q$  — заряд,  $U$  — прикладна напруга,  $n$  — фактор ідеальності,  $k$  — стала Больцмана,  $T$  — температура.

Фактор ідеальності, розрахований з нахилу віток ВАХ прямого струму діода, при різних температурах наведений в табл.1. З підвищенням температури  $n$  спочатку зменшується, а починаючи з 140 К майже не змінюється з ростом температури. Зміна  $n$  з температурою зумовлена, на нашу думку, температурною зміною густини поверхневих станів на межі. Велике значення, оціненого фактора ідеальності  $n$ , пов'язане з наявністю неідеального контакту, а також є наслідком неоднорідності та тунелювання. Ця оцінка вказує, що при найнижчих температурах тунельний струм домінує в механізмі струмопереносу діода. Крім того, при найнижчих температурах коефіцієнт  $A$  практично не залежить від температури, що є підтвердженням обмеження прямого струму тунельними процесами [14].

Таблиця 1. Електричні параметри CdO/p-Si діода

$T$ (К)	Коефіцієнт, $A$	Фактор ідеальності, $n$	Показник степеня, $m$
80	15.43	7.52	3.43
140	15.37	5.26	2.41
300	6.86	5.31	1.92
340	6.63	5.19	1.76
360	5.98	5.23	1.69
400	5.79	5.20	1.78

При вищих напругах ( $0.5 < U < 2$  В) ВАХ характеристика гетероперехідного  $n$ -CdO/p-Si діода може бути проаналізована за таким співвідношенням [19]:

$$I = a U^m, \quad (11)$$

де  $a$  — стала величина,  $m$  — показник степеня.

Для аналізу впливу вищих напруг на характеристики ВАХ діода були побудовані залежності  $\log I$  від  $\log U$ . Значення  $m$ , визначені з нахилу кривих  $\log I$  від  $\log U$ , наведені в табл. 1. Величина  $m$  спадає з ростом температури. Це свідчить про наявність струмів обмежених просторовим зарядом.

На рис. 9 зображена вольт-фарадна характеристика (ВФХ)  $n$ -CdO/p-Si діода при частоті 100 Гц. Крива ВФХ діода була побудована у вигляді  $C^{-2} = f(U)$ . Зміна ємності з прикладеною напругою пов'язана зі зміною ширини області збіднення. Вбудований потенціал  $U_{bi}$  був визначений шляхом екстраполяції кривої  $1/C^2$  до нуля, і дорівнював 1.94 В. Отримана величина  $qU_{bi}$  вища ніж енергія активації з графіка  $I_o = f(10^3/T)$ . Це є також підтвердженням тунельного механізму струмопереносу в діоді  $n$ -CdO/p-Si, а також може свідчити про високу концентрацію поверхневих станів на межі розділу гетероперехода [13].

Дійсно, великі значення висоти потенціального бар'єра гетероперехода зумовлені високою концентрацією поверхневих станів  $N_{ss}$  на межі розділу. В першому наближенні  $N_{ss} \sim d^{-2}$  [13,20], де  $d$  — відстань між дислокаціями невідповідності, яка визначається з такого виразу:

$$d = a_{Si} a_{CdO} / (a_{Si} - a_{CdO}). \quad (12)$$

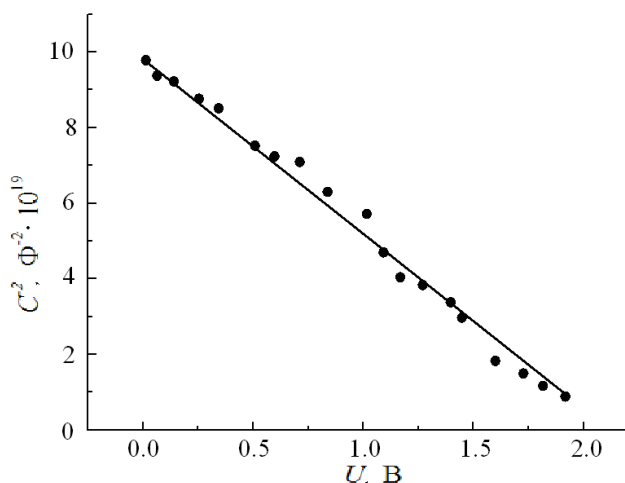


Рис. 9. Вольт-фарадна характеристика  $n$ -CdO/p-Si діода, при 300 К

Враховуючи, що  $a_{Si} = 5.4282 \text{ \AA}$  і  $a_{CdO} = 4.6949 \text{ \AA}$  [21], для  $d$  і  $N_{ss}$  отримаємо  $34 \text{ \AA}$  і  $1.2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , відповідно. При такій густині поверхневі стани, можуть відігравати роль центрів захоплення, або рекомбінації та істотно впливати на електричні властивості гетероструктур.

Прямолінійність ВФХ у координатах  $C^{-2} - f(U)$  свідчить про різкий розподіл некомпенсованої акцепторної домішки в межах області просторового заряду. Отже, досліджувана гетероструктура  $n$ -CdO/p-Si є різким, асиметричним, анізотипним гетеропереходом.

### Висновки

Методом реактивного магнетронного розпилення на постійному струмі (DC) отримано полікристалічні тонкі плівки оксиду кадмію.

На основі експериментальних результатів оптичного пропускання та відбивання розраховані основні оптичні константи: показник

заломлення, коефіцієнт екстинції, коефіцієнт поглинання тонкої плівки CdO. Визначено ширину забороненої зони оксиду кадмію, яка становить  $E_g = 2.25$  eВ.

Виготовлено анізотипні гетеропереходи  $n$ -CdO/ $p$ -Si нанесенням тонкої плівки  $n$ -CdO методом DC магнетронного розпилення на очищену поверхню монокристалічного  $p$ -Si. Проведено дослідження електричних властивостей  $n$ -CdO/ $p$ -Si діода в інтервалі температур 80-400 К. Встановлено, що при прикладанні зовнішньої напруги у прямому напрямку домінуючим є багатоступінчатий тунельно-рекомбінаційний механізм струмопереносу.

При низьких температурах механізм струмопереносу в діоді відповідає тунельному механізму, в той час як при більш високих температурах, він переходить з тунельного в рекомбінаційний і контролюється рекомбінаційними струмами.

Дослідження ВФХ характеристик підтверджують існування тунельного механізму струмопереносу в діоді  $n$ -CdO/ $p$ -Si. Оцінена густина поверхневих станів складає близько  $10^{15}$  см<sup>-2</sup>.

### Список використаної літератури

1. Look D., Reynolds D., Sizelove J., Jones R., Litton C., Cantwell G., and Harsh W., Electrical properties of bulk ZnO // Solid State Comm. — 1998. — V.105. — P. 399-401.
2. Garla C., Liang S., Emanetoglu N., Mayo W., Shen H., Wrabak M., and Lu Y., Structural, optical, and surface acoustic wave properties of epitaxial ZnO film grown on (012) sapphire by metalorganic chemical vapour deposition // J. Appl. Phys. 1998. — V.85. — P. 2595–2602.
3. Look D., Recent advances in ZnO materials and devices // Mater. Sci. Eng. B. — 2001. — V.80. — P. 383-387.
4. Bagnall D., Chen Y., Shen M., Zhu Z., Goto T., and Yao T., Room temperature excitonic stimulated emission from zinc oxide epilayers grown by plasma-assisted MBE // J Cryst. growth. — 1998. — V.184/185. — P. 605-609.
5. Загоруйко Ю. А., Коваленко Н. О., Федоренко О. А., Федоров А. Г., Матейченко П. В., Текстурированные пленки CdO, полученные методом фототермического окисления // Письма в ЖТФ. 2007. — Т.33, №4. — С. 51–57.
6. Чопра К. Л., Дас С. Т. Тонкопленочные солнечные элементы. — М.: Мир, 1986. — 440 с.
7. Хомяк В. В., Структурні та фізичні властивості плівок CdO, одержаних реактивним магнетронним розпилюванням // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. — 2010 — Т.1(7), №3. — С. 69–73.
8. Williamson G. K., Smallman R. E., Dislocation densities in some annealed and cold worked metals from measurements on the X-ray debye-scherrer spectrum // Philosophical Magazine. — 1956. — V.1, №1, — P. 34–46.
9. Gumus C., Ozkendir O. M., Kavak H., Ufuktepe Y., Structural and optical properties of zinc oxide thin films prepared by spray pyrolysis method // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. — 2006. — V.8, №1. — P. 299–303.
10. Уханов Ю. И. Оптические свойства полупроводников. — М.: Наука, 1977. — 368 с.
11. Ma D. W., Ye Z. Z., Chen L. L. Dependence of structural and optical properties of Zn<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>O films on the Cd composition // Phys. stat. sol. (a). — 2004. — V.201, №13. — P. 2929–2933.
12. Ramakishna Reddy K. T., Sravani C., Miles R. W. Characterisation of CdO thin films deposited by activated reactive evaporation // Journal of Crystal Growth. — 1998. — V.184/185. — P. 1031–1034.
13. Шарма Б. Л., Пурохит Р. К., Полупроводниковые гетеропереходы. — М: Сов. Радио, 1979 [Пер.з англ. Sharma B.L., Purohit R. K., Semiconductor heterojunctions (Pergamon Press 1974)].
14. Matsuura H., Hydrogenated amorphous-silicon/crystalline-silicon heterojunctions: properties and applications // IEEE Transactions. — 1989. — V.36, №12. — P. 2908-2914.
15. Zhang Y., Xu J., Lin B., Fu Z., Zhong S., Liu Ci., Zhang Z., Fabrication and electrical characterization of nanocrystalline ZnO/Si



- heterojunctions // Applied Surface Science.— 2006. — V.252. — P. 3449-3453.
16. Mimura H., Hatanaka Y., Carrier transport mechanisms of *p*-type amorphous–*n*-type crystalline silicon heterojunctions // J. Appl. Phys. — 1992. — V.71, №.3. — P. 2315-2321.
  17. Aguir K., Fennouh A., Carchano H., Seguin J. L., Elhadadi B., Lalande F., Electrical properties of a-GaAs/c-Si (*p*) heterojunctions // Thin Solid Films. — 1995. — V.257, №1. — P. 98–103
  18. Sze S. M., Physics of Semiconductor Devices (2nd Edition). — New York : Wiley, 1981. — 442 p.
  19. Lampert M. A. and Mark P., Current Injection in Solids. — New York: Academic Press, 1970. — 351 p.
  20. Брус В. В., Илащук М. И., Хомяк В. В., Ковалюк З. Д., Марьянчук П. Д., Ульяницкий К. С., Электрические свойства анизотипных гетеропереходов *n*-CdZnO/*p*-CdTe // ФТП.— 2012 — Т. 46, №9. — С. 1175–1180.
  21. Физико-химические свойства полупроводниковых веществ: Справочник. Коллектив авторов. — М.: Наука, 1978. — 339 с.