

К. ф.-м. н. Т. Т. КОВАЛЮК^{1, 2}, д. ф.-м. н. М. М. СОЛОВАН¹, д. ф.-м. н. П. Д. МАР'ЯНЧУК¹

Україна, ¹Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича;

Czech Republic, ²Charles University in Prague

E-mail: t.kovalyuk@chnu.edu.ua

ЕЛЕКТРИЧНІ ТА ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГЕТЕРОПЕРЕХОДІВ MoN/p-CdTe ТА MoN/n-CdTe

Досліджено електричні та фотоелектричні властивості гетероструктур MoN/p-CdTe та MoN/n-CdTe, отриманих методом магнетронного осадження тонких плівок MoN та ITO на підкладки CdTe з різним типом провідності. Встановлено, що в обох випадках домінуючим механізмом струмопереносу при прямих зміщеннях є тунельно-рекомбінаційний. Показано, що кращі фотоелектричні параметри має гетероструктура MoN/p-CdTe, а саме: напруга холостого ходу $V_{oc} = 0,4$ В, струм короткого замикання $I_{sc} = 24,6$ мА/см² за інтенсивності освітлення 80 мВт/см².

Ключові слова: CdTe, нітрид молібдену, гетероперехід, тонка плівка, механізми струмопереносу.

Найперспективнішим матеріалом для створення перетворювачів сонячного випромінювання є сполука телуриду кадмію CdTe [1]. Це насамперед пов'язано з шириною забороненої зони CdTe, яка складає 1,5 еВ при 300 К, що є оптимальним для перетворення сонячної енергії в електричну [2]. CdTe — прямозонний напівпровідник, він має досить великий коефіцієнт поглинання ($> 10^5$ см⁻¹) [3], і саме тому його можна використовувати у вигляді тонких плівок, достатніх для інтенсивного поглинання світла. На відміну від багатьох інших напівпровідників сімейства A^{II}B^{VI} телурид кадмію може бути отриманий як *n*-, так і *p*-типу провідності. На основі телуриду кадмію існують різні типи сонячних елементів: з гомогенним переходом, бар'єром Шотткі та інші [4].

Тонкі плівки нітриду молібдену (MoN), зі свого боку, мають високу електричну провідність, високу температуру плавлення та хорошу хімічну стабільність. Вони знайшли успішне практичне застосування як дифузійний бар'єр між кремнієм і мідними електродами в мікроелектроніці [5], широко використовуються як надпровідникові однофотонні детектори (SNSPD) [6], а завдяки своїм фізичним властивостям є перспективними для виготовлення поверхнево бар'єрних структур [7].

Прозорий провідний оксид In₂O₃, легований атомами Sn (indium tin oxide, ITO), використовується для виготовлення пристроїв зображення інформації, органічних та неорганічних світлодіодів, сонячних батарей, тонкоплівкових транзисторів, газових сенсорів [8]. Цьому сприяють і його особливі властивості — висока (до 90%) прозорість у видимій області спектра та висока електропровідність, і розвинуті технології виготовлення плівок.

Враховуючи вище сказане, а також фізичні властивості плівок MoN та ITO, було вирішено дослідити електричні та фотоелектричні характеристики гетероструктур, створених шляхом нанесення тонких плівок на кристалічні підкладки CdTe *p*- та *n*-типів провідності методом реактивного магнетронного розпилення.

Вразки для досліджень та методика проведення експерименту

Для виготовлення досліджуваних структур використовувалися підкладки кристалів CdTe *p*- та *n*-типу провідності.

Підкладки CdTe *p*-типу провідності вирощували методом Бріджмена за малого тиску парів кадмію ($P_{Cd} = 0,02$ атм). Значення питомої електропровідності σ та концентрації носіїв зарядів *p* отриманих кристалів за кімнатної температури ($T = 295$ К) склали $\sigma = 8,9 \cdot 10^{-2}$ Ом⁻¹·см⁻¹ та $p = 7,2 \cdot 10^{15}$ см⁻³. Глибина залягання рівня Фермі для *p*-CdTe ($E_F - E_v = 0,105$ еВ) визначається з відомого виразу для концентрації рівноважних дірок

$$p = 2 \left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{(E_F - E_v)}{kT} \right), \quad (1)$$

де m_p — ефективна маса дірки;

k — стала Больцмана;

h — стала Планка.

Підкладки *n*-CdTe вирощували методом Бріджмена за високого тиску парів кадмію. Питома електропровідність отриманих кристалів $\sigma = 2,43$ Ом⁻¹·см⁻¹, густина вільних електронів $n = 1,92 \cdot 10^{16}$ см⁻³ та рух-

лівість $\mu_n = 775,2 \text{ cm}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, положення рівня Фермі для $n\text{-CdTe}$ становить $E_c - E_F = 0,1 \text{ eV}$.

Гетеропереходи виготовлялись нанесенням плівок MoN на поверхню підкладки CdTe (типорозміром $7\times 7\times 1 \text{ mm}$) в універсальній вакуумній установці Leybold Heraeus L560 за допомогою реактивного магнетронного розпилення в атмосфері суміші аргону з азотом при постійній напрузі.

Підкладки CdTe розміщувалися на столику, який обертався під час наплення, щоб забезпечити рівномірну товщину плівки. Для видалення неконтрольованого забруднення (органічні домішки, власний оксид) поверхні мішені та підкладки піддавалися короткочасному бомбардуванню іонами аргону. Перед осадженням вакуумну камеру було відкачано до тиску $5\cdot 10^{-5}$ мбар. Потужність магнетрона складала 30 Вт, тривалість процесу наплення — 1,5 хв, температура підкладок — приблизно 370 К.

Газова суміш формувалася у необхідній пропорції з двох незалежних джерел в процесі наплення, під час якого у вакуумній камері парціальні тиски аргону та азоту складали по 0,3 Па.

Після закінчення процесу наплення тонких плівок MoN вакуумна камера поступово охолоджувалася до кімнатної температури, потім відкривалася для заміни молибденової мішені на мішень ITO ($\text{In}_2\text{O}_3 - \text{SnO}_2$ 90:10 за масою).

Тонкі плівки ITO отримували методом магнетронного розпилення мішені ITO в атмосфері аргону при постійній напрузі. Протягом процесу наплення тиск аргону у вакуумній камері становив 0,4 Па, потужність магнетрона встановлювалася на рівні 30 Вт, процес наплення тривав 5 хв, температура підкладок становила 420 К.

Фронтальний електричний контакт з тонкою плівкою виготовляли за допомогою срібної струмопровідної пасти.

Однією з основних перешкод у виготовленні сонячних елементів на основі $p\text{-CdTe}$ є створення тилового омичного контакту, оскільки немає металів, які б формували омичний контакт з $p\text{-CdTe}$ без додаткової обробки поверхні телуриду кадмію. Тому при виготовленні експериментальних зразків контактна площадка піддавалася бомбардуванню іонами аргону у вакуумній камері для формування p^+ -області. Після обробки поверхні на неї послідовно напиляли шар оксиду молибдену та молибдену. Детальніше методику створення омичних контактів до $p\text{-CdTe}$ описано у [9].

При формуванні тилового електричного контакту до підкладки $n\text{-CdTe}$ осаджували шар Cu шляхом його відновлення з водного розчину CuSO_4 з подальшим вплавленням індію.

Вимірювання вольт-амперних характеристик (ВАХ) гетероструктур проводилося за стандартною методикою з використанням джерела постійного

струму BVP Electronics, точного мультиметра Fluke 5545A, вольтметра Picotest M3500A.

Товщину тонких плівок вимірювали за допомогою інтерферометра МІІІ-4 за стандартною методикою, вона складала 50 нм для MoN та 150 нм для ITO.

Результати досліджень та їх обговорення

Оптичні властивості тонких плівок MoN та ITO

З використанням спектрофотометра СФ-2000 було проведено дослідження спектральних залежностей коефіцієнта пропускання T_λ (рис. 1) тонких плівок MoN та ITO, які є складовими створених гетеропереходів в діапазоні довжини хвиль від 200 до 1100 нм.

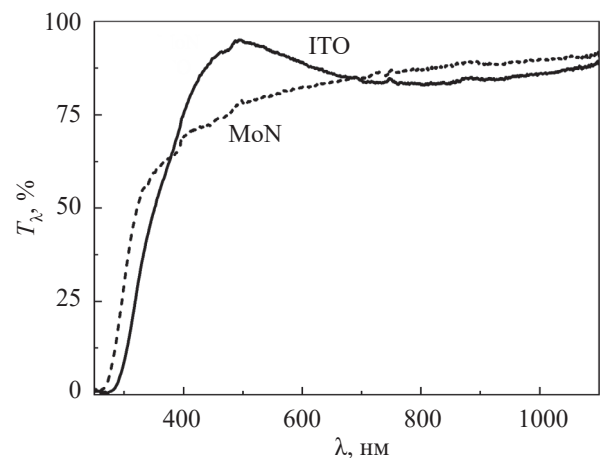


Рис. 1. Спектральні залежності коефіцієнтів пропускання тонких плівок MoN та ITO

З рис. 1 видно, що досліджувані плівки MoN та ITO мають досить високий коефіцієнт пропускання світла у видимому діапазоні, який сягає майже 90%, що в свою чергу забезпечує можливість їхнього ефективного використання для виготовлення фотоелектричних приладів.

Електричні властивості гетероструктури MoN/CdTe

Вольт-амперні характеристики анізотипних MoN/ $p\text{-CdTe}$ та ізотипних MoN/ $n\text{-CdTe}$ гетероструктур, отриманих за кімнатної температури, представлені на рис. 2. Як видно, досліджувані структури мають випрямляючі властивості.

Екстраполяцією лінійних ділянок ВАХ до перетику з віссю напруги визначено значення висоти потенціального бар'єра ϕ_0 для досліджуваних гетероструктур: для MoN/ $p\text{-CdTe}$ $\phi_0 = 0,51 \text{ eV}$, для MoN/ $n\text{-CdTe}$ $\phi_0 = 0,33 \text{ eV}$. Більші значення ϕ_0 для MoN/ $p\text{-CdTe}$ обумовлюються різним типом провідності компонентів гетеропереходу, що забезпечило більшу різницю робіт виходу електронів.

Оскільки висота потенціального бар'єра гетероструктури MoN/ $p\text{-CdTe}$ більша, ніж MoN/ $n\text{-CdTe}$, для

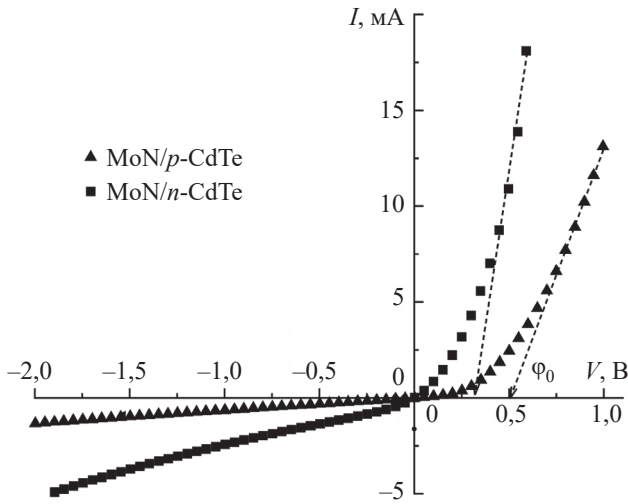


Рис. 2. ВАХ гетероструктур MoN/CdTe, отримані за $T = 298 \text{ K}$

неї було вирішено дослідити температурні залежності ВАХ. Результати наведено на **рис. 3**.

Встановлено, що температурна залежність висоти потенціального бар'єра гетероструктури MoN/p-CdTe добре описується рівнянням

$$\varphi_0(T) = \varphi_0(0) + \beta_\varphi T, \quad (2)$$

де $\varphi_0(0)$ — висота потенціального бар'єра MoN/p-CdTe за абсолютного нуля температури, $\varphi_0(0) = 1,31 \text{ eV}$;

β_φ — температурний коефіцієнт висоти потенціального бар'єра, $\beta_\varphi = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ eV/K}$.

Величини послідовного R_s і шунтуючого R_{sh} опорів досліджуваної гетероструктури визначали із залежності її диференційного опору R_{dif} від напруги (**рис. 4**). Менші значення послідовного опору R_s для гетероструктури MoN/n-CdTe, ніж для MoN/p-CdTe, обумовлено меншим питомим опором базового мате-

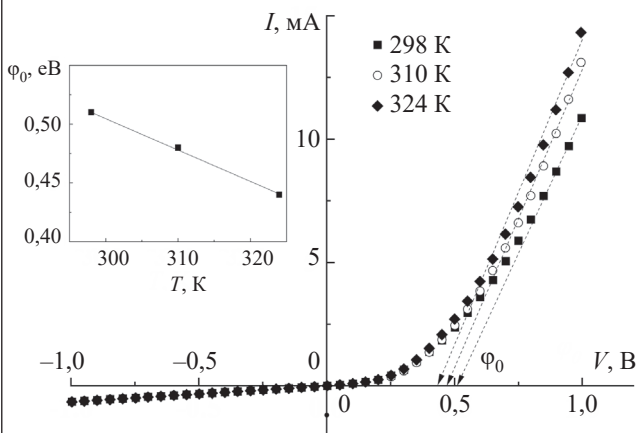


Рис. 3. ВАХ гетероструктури MoN/p-CdTe за різних температур та температурна залежність висоти потенціального бар'єра (див. вставку)

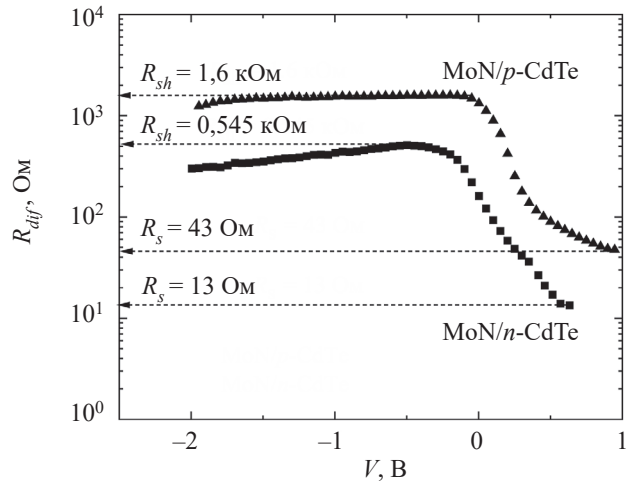


Рис. 4. Залежність диференційного опору гетероструктур MoN/p-CdTe та MoN/n-CdTe від напруги за $T = 298 \text{ K}$

ріалу (n-CdTe), а шунтуючого опору R_{sh} — внаслідок формування гетеропереходу гіршої якості.

Домінуючі механізми струмопереносу

Прямі гілки ВАХ досліджуваних гетероструктур у напівологічних координатах представлено на **рис. 5**. Як видно з рисунку, в області прямих зміщень,

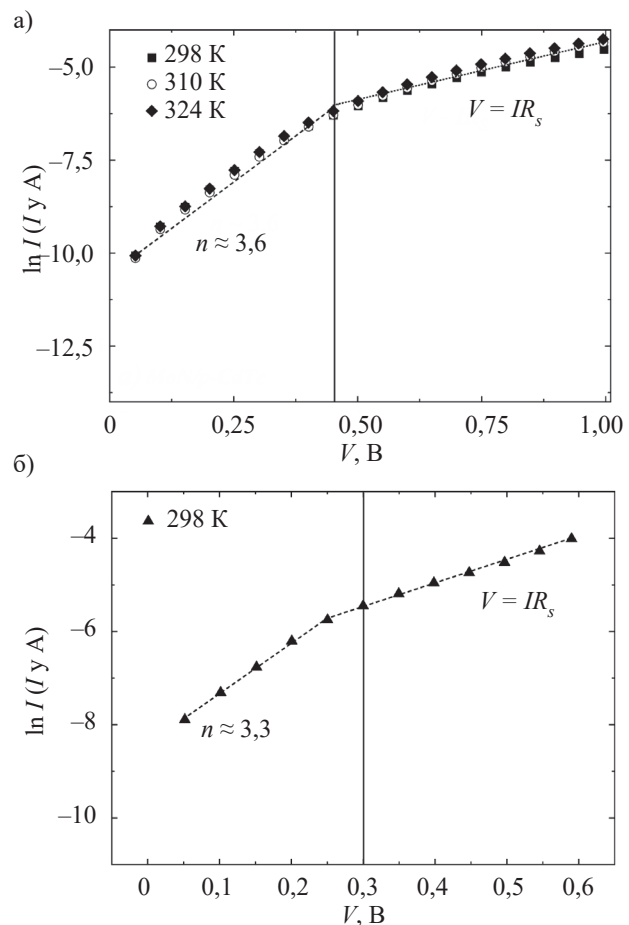


Рис. 5. Прямі гілки ВАХ гетероструктур, отримані за різних температур для MoN/p-CdTe (а) та за кімнатної для MoN/n-CdTe (б)

$V > 3kT/e$, спостерігаються прямолінійні ділянки, що свідчить про експоненційну залежність струму від напруги. Оскільки нахил ($\Delta \ln I / \Delta V$) прямолінійних ділянок ($3kT/e < V < 0,45$ В) не залежить від температури, а визначений коефіцієнт неідеальності $n = 3,6$ для MoN/p-CdTe та $n = 3,3$ для MoN/n-CdTe, єдиним обґрунтованим механізмом струмопереносу можна вважати тунельно-рекомбінаційний [10], оскільки при генераційно-рекомбінаційному механізмі струмопереносу спостерігається температурна залежність нахилу прямолінійних ділянок ВАХ, а значення показника неідеальності дорівнюють 2. Однією з причин домінування тунельно-рекомбінаційного механізму струмопереносу є велика концентрація поверхневих станів через розбіжність періодів кристалічної ґратки компонентів гетеропереходу. Поверхневі стани утворюють у забороненій зоні базового матеріалу енергетичні рівні, через які можуть відбуватися процеси тунелювання та рекомбінації.

Фотоелектричні властивості гетероструктур MoN/CdTe

На рис. 6 представлено темнову та світлову ВАХ досліджуваних гетероструктур у напівлогарифмічному масштабі. Тут видно, що для обох випадків при освітленні білим світлом інтенсивністю 80 мВт/см² зворотний струм I_{light} зростає в порівнянні з його величиною у темряві I_{dark} . Визначені із залежності $I = f(V)$ параметри гетероструктур, такі як напруга холостого ходу V_{oc} та струм короткого замикання I_{sc} , мали наступні значення:

- для MoN/p-CdTe $V_{oc} = 0,4$ В, $I_{sc} = 24,6$ мА/см²;
- для MoN/n-CdTe $V_{oc} = 0,15$ В, $I_{sc} = 6,8$ мА/см².

Оцінити продуктивність фотоприймача більш кількісно можна за допомогою визначення чутливо-

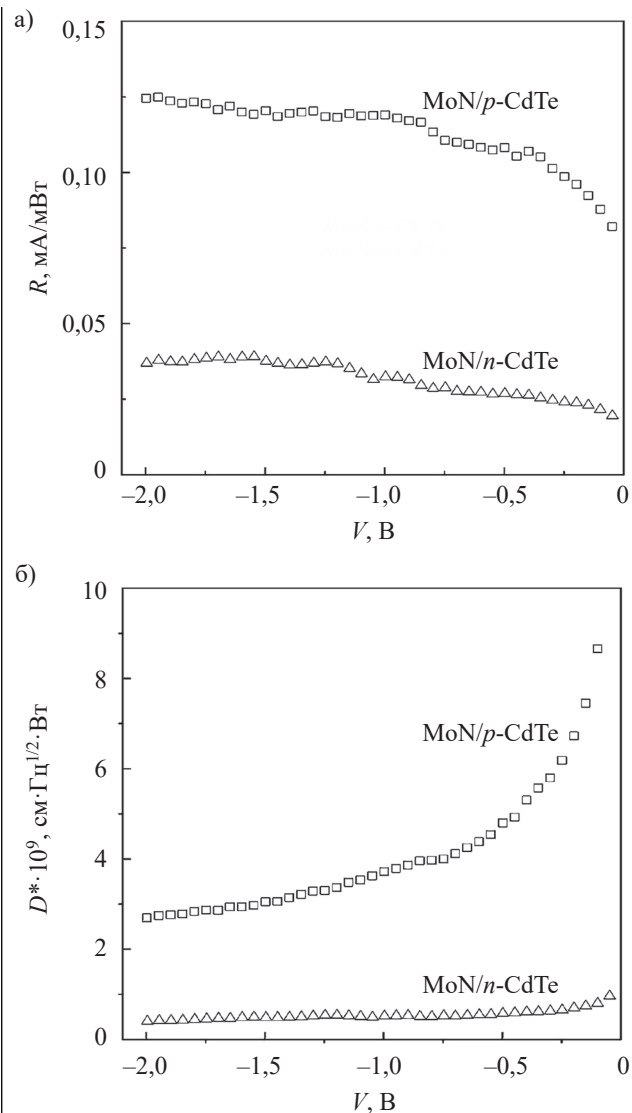
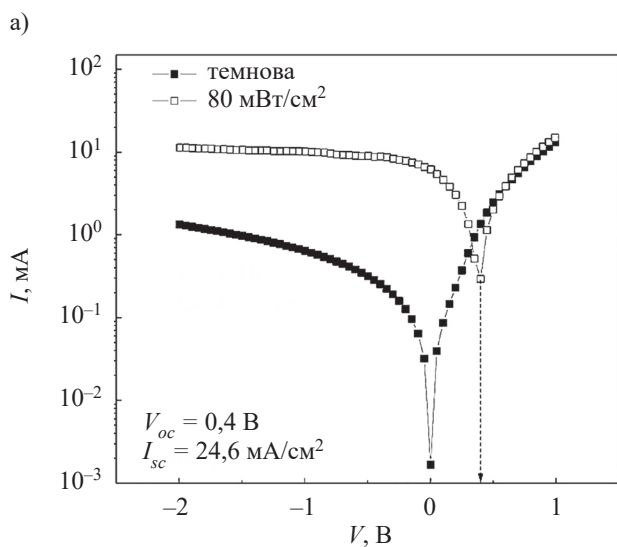


Рис. 7. Залежності чутливості R та детективності D^* фотоприймача від напруги

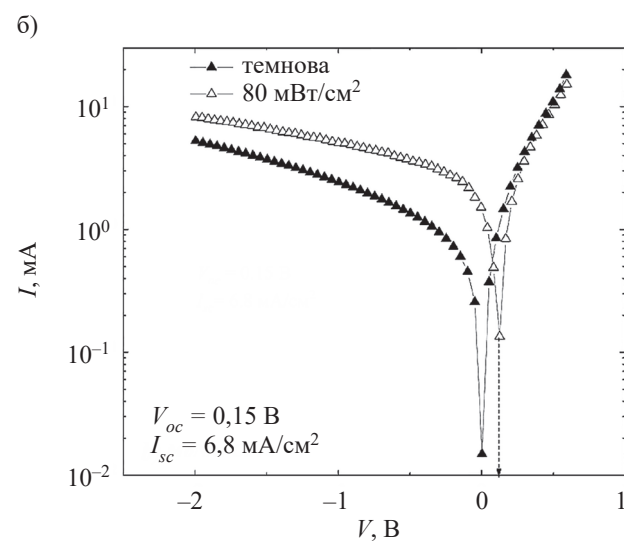


Рис. 6. Темнова та світлова ВАХ гетероструктур MoN/p-CdTe (а) та MoN/n-CdTe (б)

сті R та детективності D^* , які показують його чутливість до падаючого випромінювання:

$$R = \frac{I_{light} - I_{dark}}{P_{opt}}, \quad (3)$$

$$D^* = \sqrt{\frac{A}{2qI_{dark}}} \cdot R, \quad (4)$$

де P_{opt} — інтенсивність випромінювання при освітленні білим світлом;

A — активна площа фотоприймача.

На рис. 7 приведено графіки функцій $R = f(V_{rev})$ та $D^* = f(V_{rev})$, з яких видно, що чутливість R для двох гетероструктур плавно збільшується при зростанні зворотного зміщення, що обумовлено розширенням області просторового заряду (і висоти потенціального бар'єру), внаслідок чого зростає ефективність розділення фотогенерованих електрон-діркових пар. Детективність D^* , яка описує нормовану потужність опромінення, необхідну для отримання сигналу від фотоприймача на рівні шуму, зменшується при збільшенні зворотного зміщення, що обумовлено зростанням темного зворотного струму I_{dark} . При цьому фотоелектричні параметри кращі у гетероструктурі MoN/*p*-CdTe.

Висновки

Дослідження гетероструктур MoN/*p*-CdTe та MoN/*n*-CdTe, виготовлених методом реактивного магнетронного напилення тонких плівок MoN, ІТО на підкладки з кристалів CdTe *p*- та *n*-типу провідності, показали наступне. Значення висоти потенціального бар'єру є більшими для гетероструктури MoN/*p*-CdTe, що обумовлено різним типом провідності компонентів гетеропереходу. Домінуючим механізмом струмопереносу в обох досліджуваних гетероструктурах є тунельно-рекомбінаційний. Фотоелектричні параметри гетероструктури MoN/*p*-CdTe є кращими, ніж MoN/*n*-CdTe. Для MoN/*p*-CdTe напруга холостого ходу $V_{oc} = 0,4$ В, струм короткого замикання $I_{sc} = 24,6$ мА/см² при інтенсивності освітлення 80 мВт/см². При цьому варто відзначити, що ці фотоелектричні параметри отримано для гетерострук-

тури, виготовленої без оптимізації технологічних умов. Очевидно, що така оптимізація призведе до підвищення ефективності фотоелектричного перетворення, і таку гетероструктуру можна буде успішно використовувати для виготовлення різних фотоелектричних напівпровідникових приладів (фотодіодів, сонячних елементів).

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Green M.A., Hishikawa Y., Warta W. et al. Solar cell efficiency tables (version 50). *Progress in Photovoltaics*, 2017, vol. 25, iss. 7, p. 668–676. <https://doi.org/10.1002/pip.2909>
2. Armani N., Ferrari C., Salviati G. et al. Defect-induced luminescence in high-resistivity high-purity undoped CdTe crystals. *J. Phys.: Condens. Matter*, 2002, vol. 14, iss. 48, p. 13203–13209. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/14/48/369>
3. Krustoka J., Collanb H., Hjelteb K. et al. Photoluminescence from deep acceptor-deep donor complexes in CdTe. *J. Luminesc.*, 1997, vol. 72–74, p. 103–105. [https://doi.org/10.1016/S0022-2313\(97\)00061-6](https://doi.org/10.1016/S0022-2313(97)00061-6)
4. Алферов Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур. *ФТП*, 1998, №32/1, с. 3–18.
5. Jui-Chang C., Shuo-Lun T., Mao-Chieh C. Sputter-deposited Mo and reactively sputter-deposited Mo-N films as barrier layers against Cu diffusion. *Thin Solid Films*, 1999, vol. 346, iss. 1–2, p. 299–306. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(98\)01728-3](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(98)01728-3)
6. Hallett L., Charaev I., Agarwal A. et al. Superconducting MoN thin films prepared by DC reactive magnetron sputtering for nanowire single-photon detectors. *Superconductor Science and Technology*, 2021, vol. 34, 035012. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/abda5f>
7. Solovan M.M., Maryanchuk P.D. Electrical and photoelectrical properties of MoN/n-Si surface-barrier structures. *Radio physics and electronics*, 2019, vol. 24, iss. 2, p. 49–56. <https://doi.org/10.15407/rej2019.02.049>
8. Granqvist C.G., Hultaker A. Transparent and conducting ITO films: new developments and applications. *Thin Solid Films*, 2002, vol. 411, p. 1–5. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(02\)00163-3](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(02)00163-3)
9. Solovan M.N., Mostovyi A.I., Brus V.V. et al. Effect of surface treatment on the quality of ohmic contacts to single-crystal *p*-CdTe. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2017, vol. 11, no. 1, p. 276–279. <https://doi.org/10.1134/S1027451017010347>
10. Solovan M.M., Gavaleshko N.M., Brus V.V. et al. Fabrication and investigation of photosensitive MoO_x/*n*-CdTe heterojunctions. *Semiconductor Science and Technology*, 2016, vol. 31, no. 10, 105006. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/31/10/105006>

Дата надходження рукопису до редакції 01.12.2020 р.

Ukraine, ¹Chernivtsi National University, Department of electronics and energy engineering,
²Czech Republic, Charles University in Prague, Faculty of Mathematics and Physics

E-mail: t.kovalyuk@chnu.edu.ua

ELECTRICAL AND PHOTOELECTRIC PROPERTIES
OF MoN/p-CdTe AND MoN/n-CdTe HETEROJUNCTIONS

Due to the physical properties of MoN and ITO thin films, it was decided to create MoN/p-CdTe and MoN/n-CdTe heterostructures and investigate their electrical and photoelectric properties. The method of reactive magnetron sputtering was used to create thin MoN and ITO films on single crystal CdTe substrates with different conductivity types. To manufacture test heterostructures, the following CdTe crystal substrates were used: 1) p-type conductivity, grown by Bridgman technique at low cadmium vapor pressures; 2) n-type conductivity, grown by Bridgman technique at high cadmium vapor pressures. During the deposition process, the argon pressure in the vacuum chamber was 0.4 Pa. The power of the magnetron was 30 W, the sputtering process continued 5 min at a substrate temperature of 150°C. I-V characteristics of the heterostructures at different temperatures were measured, the height of the potential barrier, the values of the series and shunt resistance were determined.

Electrical and photoelectric properties of the heterostructures were studied, and the dominant mechanisms of current transfer at forward displacements was established. The tunnel-recombination mechanism was found to be the dominant mechanism of current transfer in the MoN/p-CdTe and MoN/n-CdTe heterostructures.

It was shown that the photoelectric parameters for the MoN/p-CdTe heterostructure are higher than those for MoN/n-CdTe. MoN/p-CdTe heterojunctions have the following photoelectric parameters: open-circuit voltage $V_{oc} = 0.4$ V, short-circuit current $I_{sc} = 24.6$ mA/cm² at an illumination intensity of 80 mW/cm². This makes them a promising material for the manufacture of detectors of various radiation types.

Keywords: CdTe, molybdenum nitride, heterojunctions, thin film, current transport mechanisms. Keywords: CdTe, molybdenum nitride, heterojunctions, thin film, current transport mechanisms.

REFERENCES

- Green M.A., Hishikawa Y., Warta W. et al. Solar cell efficiency tables (version 50). *Progress in Photovoltaics*, 2017, vol. 25, iss. 7, pp. 668–676. <https://doi.org/10.1002/pip.2909>
- Armani N., Ferrari C., Salviati G. et al. Defect-induced luminescence in high-resistivity high-purity undoped CdTe crystals. *J. Phys.: Condens. Matter*, 2002, vol. 14, iss. 48, pp. 13203–13209. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/14/48/369>
- Krustoka J., Collanb H., Hjelb K. et al. Photoluminescence from deep acceptor-deep donor complexes in CdTe. *J. Luminesc.*, 1997, vol. 72–74, pp. 103–105. [https://doi.org/10.1016/S0022-2313\(97\)00061-6](https://doi.org/10.1016/S0022-2313(97)00061-6)
- Alferov Zh. I. The history and future of semiconductor heterostructures. *Semiconductors* 1998, vol. 32, iss. 1, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1134/1.1187350>
- Jui-Chang C., Shuo-Lun T., Mao-Chieh C. Sputter-deposited Mo and reactively sputter-deposited Mo-N films as barrier layers against Cu diffusion. *Thin Solid Films*, 1999, vol. 346, iss. 1–2, pp. 299–306. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(98\)01728-3](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(98)01728-3)
- Hallett L., Charaev I., Agarwal A. et al. Superconducting MoN thin films prepared by DC reactive magnetron sputtering for nanowire single-photon detectors. *Superconductor Science and Technology*, 2021, vol. 34, 035012. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/abda5f>
- Solovan M.M., Maryanchuk P.D. Electrical and photoelectric properties of MoN/n-Si surface-barrier structures. *Radio physics and electronics*, 2019, vol. 24, iss. 2, pp. 49–56. <https://doi.org/10.15407/rev2019.02.049>
- Granqvist C.G., Hultaker A. Transparent and conducting ITO films: new developments and applications. *Thin Solid Films*, 2002, vol. 411, pp. 1–5. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(02\)00163-3](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(02)00163-3)
- Solovan M.N., Mostovyi A.I., Brus V.V. et al. Effect of surface treatment on the quality of ohmic contacts to single-crystal p-CdTe. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2017, vol. 11, no. 1, pp. 276–279. <https://doi.org/10.1134/S1027451017010347>
- Solovan M.M., Gavaleshko N.M., Brus V.V. et al. Fabrication and investigation of photosensitive MoO_x/n-CdTe heterojunctions. *Semiconductor Science and Technology*, 2016, vol. 31, no. 10, 105006. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/31/10/105006>

Опис статті для цитування:

Ковалюк Т. Т., Солован М. М., Мар'янчук П. Д. Електричні та фотоелектричні властивості гетеропереходів MoN/p-CdTe та MoN/n-CdTe. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2021, № 1–2, с. 33–38. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.1-2.33>

Cite the article as:

Kovaliuk T. T., Solovan M. N., Maryanchuk P. D. Electrical and photoelectric properties of MoN/p-CdTe and MoN/n-CdTe heterojunctions. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2021, no. 1–2, pp. 33–38. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.1-2.33>