

Електричні та фотоелектричні властивості поверхнево-бар'єрних структур $\text{MoO}_x/n\text{-Si}$

М.М. Солован

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2, 58012 Чернівці,
Україна

(Одержано 10.11.2017, опубліковано online 29.04.2018)

Виготовлено гетеропереходи $\text{MoO}_x/n\text{-Si}$ шляхом нанесення тонких плівок MoO_x методом реактивного магнетронного розпилення на підкладки кремнію. Виміряні вольт-амперні характеристики (ВАХ) отриманих гетеропереходів при різних температурах. Проаналізовано температурну залежність висоти потенціального бар'єру та послідовного опору гетеропереходу. Побудовано енергетичну діаграму досліджуваних гетеропереходів. Оцінено концентрацію поверхневих станів на межі розділу гетеропереходу та встановлено домінуючі механізми струмопереносу через досліджувані гетеропереходи при прямому і зворотному зміщеннях.

Встановлено, що гетероструктура $\text{MoO}_x/n\text{-Si}$, має максимальну напругу холостого ходу $V_{oc} = 0.167$ В, густину струму короткого замикання $I_{sc} = 8.56$ мА/см². Проаналізовано можливості застосування отриманої гетероструктури в якості фотодіоду.

Ключові слова: Гетероструктура, Потенціальний бар'єр, Механізми струмопереносу, Енергетична діаграма, MoO_x , Si.

DOI: [10.21272/jnep.10\(2\).02030](https://doi.org/10.21272/jnep.10(2).02030)

PACS numbers: 47.15.km, 72.20. – i

1. ВСТУП

Оксиди перехідних металів, до яких відноситься оксид молібдену, являють собою один із найбільш перспективних класів речовин. Прозорі провідні шари широко застосовуються для виготовлення приладів електроніки, оптоелектроніки і сонячної енергетики. В останні роки інтенсивно досліджуються напівпровідникові гетеропереходи на основі тонких плівок оксидів.

Оксид молібдену – це матеріал який вже давно знайшов практичне застосування в сонячних елементах як тиловий омичний контакт до напівпровідників з *p*-типом провідності [1], оскільки цей матеріал володіє високою роботою виходу електронів[2]. Також MoO_x володіє досить високим коефіцієнтом пропускання світла у видимій частині спектру[3] та низьким значенням питомого електричного опору[4]. Відомо, що матеріали, які володіють високою роботою виходу електронів, створюють омичний контакт з напівпровідниками *p*-типу провідності[5], а з напівпровідниками *n*-типу провідності – створюють бар'єр і володіють хорошими випрямляючими властивостями.

Нещодавно нами було створено випрямляючі гетероструктури на основі низькоомного та високоомного телуриду кадмію для використання в якості фотодіодів та детекторів X/γ променів[5,6].

Оскільки кремній є основним матеріалом електроніки було цікаво створити гетероструктури $\text{MoO}_x/n\text{-Si}$, а велика ширина забороненої зони оксиду молібдену забезпечить ефективне поглинання сонячного випромінювання фоточутливим шаром кремнію, що буде забезпечувати високу фоточутливість гетероструктури $\text{MoO}_x/n\text{-Si}$ в широкому спектральному діапазоні.

Наскільки нам відомо, в літературі відсутні результати створення та досліджень електричних і фотоелектричних властивостей гетеропереходів $\text{MoO}_x/n\text{-Si}$. Вище зазначені дослідження мають важливе значення для подальшої розробки приладів на

основі гетеропереходу $\text{MoO}_x/n\text{-Si}$ для електроніки і сонячної енергетики, оскільки на ефективність їх роботи суттєво впливають електричні характеристики компонент гетеропереходів та границі розділу.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Для виготовлення гетероструктур використовували монокристалічний кремній *n*-типу провідності з орієнтацією поверхні (100) товщиною 330 мкм. Значення питомого опору і концентрації носіїв заряду цих кристалів при кімнатній температурі (295 К) становили $\rho = 6$ Ом · см і $n = 7.4 \cdot 10^{14}$ см⁻³, відповідно. Глибина залягання рівня Фермі для базового матеріалу ($E_c - E_F = 0.27$ eВ) визначалася з виразу для концентрації рівноважних електронів: $n = 2(2\pi m_n kT/h^2)^{3/2} \exp(-(E_c - E_F)/kT)$.

Структури виготовляли нанесенням плівок MoO_x на попередньо поліровану поверхню пластин Si ($5 \times 5 \times 0.33$ мм³) в універсальній вакуумній установці Leybold – Heraeus L560 за допомогою реактивного магнетронного розпилення мішені чистого молібдену в атмосфері суміші аргону і кисню при постійній напрузі. Молібденова мішень – шайба діаметром 100 мм і товщиною 5 мм – розміщується на столику магнетрона з водяним охолодженням. Підкладки із монокристалічного кремнію розміщуються над магнетроном з наступним обертанням столика для забезпечення однорідності плівок по товщині. Перед початком процесу напилення вакуумна камера відкачувалася до залишкового тиску 10^{-4} Па.

Формування газової суміші аргону і кисню в необхідній пропорції відбувалося з двох незалежних джегел протягом процесу напилення.

Для видалення неконтрольованого забруднення поверхні мішені і підкладки використовували короткочасне протравлювання бомбардуючими іонами аргону. Під час процесу напилення парціальні тиски у вакуумній камері становили 0.24 Па для аргону і 0.034 Па для кисню. Встановлена потужність магнет-

рона – 30 Вт. Процес напилення тривав 3 хвилини при температурі підкладки 150 °С.

Після закінчення процесу напилення тонких плівок MoO_x, вакуумна камера поступово охолоджувалася до кімнатної температури і відкривалася для заміни молібденової мішені на мішень ІТО (In₂O₃-SnO₂ 90:10 по масі).

Напилення тонких плівок ІТО проводилося методом магнетронного розпилення мішені ІТО в атмосфері аргону при постійній напрузі.

Протягом процесу напилення тиск аргону у вакуумній камері становив ~ 0.4 Па. Встановлена потужність магнетрона ~ 30 Вт. Процес напилення тривав ~ 5 хв. при температурі підкладок ~ 150 °С.

Були напилені тонкі плівки MoO_x на склянні та керамічні підкладки для визначення оптичних і електричних параметрів тонкої плівки. Отримані плівки мали *n*-тип провідності. Виміряні значення питомої електропровідності і концентрації носіїв при 295 К для тонких плівок MoO_x дорівнювали $\sigma = 150 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ і $n = 8.47 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Фронтальний електричний контакт з тонкою плівкою MoO_x формували методом магнетронного розпилення молібдену при температурі підкладки 150 °С.

Щоб уникнути рекомбінації на тильовій стороні кремнію і забезпечити хороше збирання фотогенерованих носіїв заряду, ми використовували підкладки які вже мали тильовий контакт з вбудованим внутрішнім полем. Який був виготовлений, шляхом напилення шару власного гідрогенізованого аморфного кремнію (a-Si:H) товщиною ~ 10 нм для пасивації поверхні підкладки. Наступний шар сильно легovanого фосфором гідрогенізованого аморфного кремнію *n*⁺ (a-Si:H) товщиною ~20 нм для створення ізотипного переходу, з висотою бар'єру ~0,1 eV на задній стороні Si, і останнім наносили шар Al методом термічного випаровування.

Структурна схема отриманої гетероструктури приведена на вставці рис. 1.

Вольт-амперні характеристики досліджуваних гетероструктур вимірювали за стандартною методикою з використанням точного фемто/піко амперметра Keysight B2985A з вбудованим джерелом ($\pm 1000 \text{ В}$), а в якості вольтметра використовували Agilent 34410A.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Електричні властивості гетероструктури MoO_x/n-Si

На рис. 1 приведені прямі гілки вольт - амперної характеристики поверхнево-бар'єрних структур MoO_x/n-Si, виміряні при різних температурах.

Шляхом екстраполяції лінійних ділянок ВАХ до перетину з віссю напруг визначені значення висоти потенціального бар'єру ϕ_0 гетеропереходу при різних температурах ($\phi_0 = eV_{bi}$, де V_{bi} – контактна різниця потенціалів) (рис. 1). Встановлено, що температурна залежність висоти потенціального бар'єру поверхнево-бар'єрних структур MoO_x/n-Si добре описується рівнянням:

$$\phi_0(T) = \phi_0(0) - \beta_\phi \cdot T \quad (1)$$

де $\beta_\phi = 1,9 \cdot 10^{-3} \text{ eV K}^{-1}$ – температурний коефіцієнт висоти потенціального бар'єру, а $\phi_0(0) = 1,05 \text{ eV}$ – значення висоти потенціального бар'єру досліджуваної гетероструктури при абсолютному нулі температури.

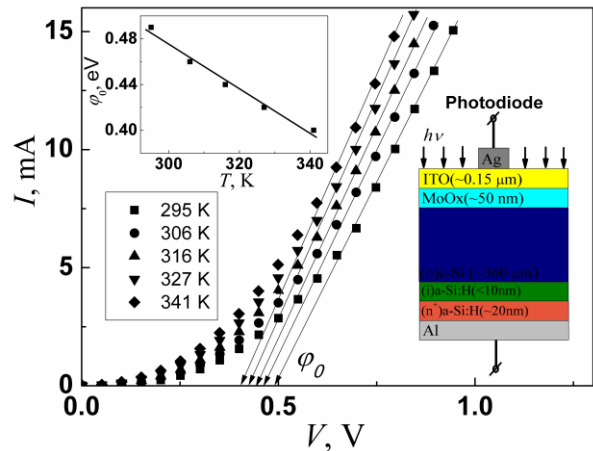


Рис. 1 – Вольт-амперні характеристики гетеропереходу MoO_x/n-Si. На вставках приведено температурну залежність висоти потенціального бар'єру та структурну схему гетеропереходу MoO_x/n-Si.

Величину послідовного R_s і шунтуючого R_{sh} опорів гетероструктури можна визначити із залежності її диференційного опору R_{dif} від напруги (рис. 2) [7]. Видно, що в області напруг, більших за висоту потенціального бар'єру, криві $R_{dif}(V)$ виходять на насичення.

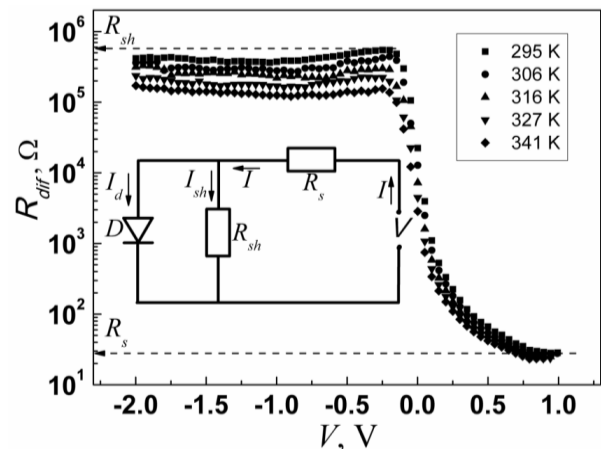


Рис. 2 – Залежність диференційного опору гетеропереходів MoO_x/n-Si від напруги. На вставці приведено еквівалентну схему досліджуваної структури

Це свідчить про те, що напруга на бар'єрній області діоду перестає змінюватись, тобто бар'єр практично відкритий, і струм через гетероперехід обмежується лише його послідовним опором R_s , величина якого визначається екстраполяцією області насичення до перетину з віссю диференційного опору.

Величину послідовного опору $R_s \sim \rho$, де ρ – питомий електричний опір, у випадку частково компенсованого напівпровідника визначають із виразу:

$$\rho = \frac{1}{e\mu_n n} = \frac{1}{e\mu_n N_c \frac{N_d - N_a}{2N_a} \exp\left(-\frac{E_D}{kT}\right)}, \quad (2)$$

де μ_n – рухливість електронів, N_c – ефективна густина станів в зоні провідності, N_a і N_d – концентрації акцепторних і донорних домішок, відповідно, E_D – енергія іонізації донорного рівня, що визначає рівноважну провідність напівпровідника. З останнього виразу видно, що температурна залежність послідовного опору визначається, в основному, експоненційним множником $R_s \sim \exp(-E_D/kT)$.

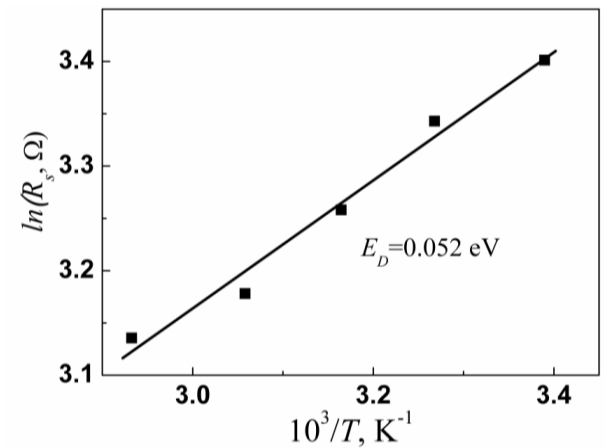


Рис. 3 – Залежність $\ln R_s = f(10^3/T)$

Таким чином нахил прямої $R_s(10^3/T)$ в напівлогарифмічних координатах визначає глибину залягання донорного рівня $E_D = 0.052$ eВ (рис. 3), яка добре узгоджується з глибиною залягання донорних рівнів у кремнії.

3.2 Механізми струмопереносу при прямих зміщеннях в поверхнево-бар'єрних структурах $MoO_x/n-Si$

Аналіз прямих гілок ВАХ структур $MoO_x/n-Si$, побудованих в напівлогарифмічному масштабі (рис. 4) з врахуванням впливу послідовного і шунтуючого опорів, показав, що залежність $\ln[I - (V - IR_s)/R_{sh}] = f(V - IR_s)$ складається із двох прямолінійних ділянок, що свідчить про експоненційну залежність струму від напруги і наявність двох домінуючих механізмів переносу заряду в досліджуваному інтервалі напруг. Визначені значення коефіцієнта неідеальності $(\Delta \ln[I - (V - IR_s)/R_{sh}]/\Delta(V - IR_s) = e/nkT$, де n – коефіцієнт неідеальності) для обох ділянок напруг приведено в таблиці 1.

Невелике значення висоти потенціального бар'єру, як правило призводить до протікання надбар'єрного струму. В області напруг ($3kT/e < V < 0,2$ В) В залежність $I(V)$ добре описується виразом для емісійно-рекомбінаційного механізму струмопереносу з урахуванням впливу послідовного і шунтуючого опорів (пряма рекомбінація носіїв заряду через енергетичні стани на поверхні розділу, яка визначається висотою потенціального бар'єру) [8]:

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{e(V - IR_s(T))}{nkT}\right) - 1 \right] + \frac{V - IR_s}{R_{sh}}, \quad (3)$$

де

$$I_s = B_0 \exp\left(-\frac{\phi_0(T)}{nkT}\right), \quad (4)$$

B_0 – коефіцієнт, який слабо залежить від температури, коефіцієнт n , як правило, змінюється від 1 до 2, що добре корелює з експериментально отриманими значеннями (див. таблиця 1).

В таблиці 1 приведено експериментально визначені параметри з вимірювань температурних залежностей ВАХ поверхнево-бар'єрних структур $MoO_x/n-Si$.

Таблиця 1 Параметри гетероструктури $MoO_x/n-Si$

T, K	$e\phi_0, eV$	R_s, Ω	R_{sh}, Ω	$RR_{V=1V}$	$n1$	$n2$
295	0.49	30	5.5×10^5	4.7×10^3	1,51	3,41
306	0.46	28.3	4.3×10^5	3.6×10^3	1,55	3,35
316	0.44	26	2.9×10^5	2.4×10^3	1,58	3,31
327	0.42	24	2.2×10^5	1.7×10^3	1,63	3,28
341	0.4	23	1.5×10^5	1.2×10^3	1,66	3,22

У випадку домінування емісійно-рекомбінаційної механізму вважають, що центри рекомбінації рівномірно розподілені по енергії і зосереджені у вузькій області біля границі розділу.

Прологарифмувавши вираз (3) отримуємо:

$$\ln\left(I - \frac{V - IR_s(T)}{R_{sh}}\right) = I_s + \frac{q(V - IR_s(T))}{nkT} \quad (5)$$

З останнього виразу видно, що залежності $\ln[I - (V - IR_s)/R_{sh}] = f(V - IR_s)$ повинні апроксимуватися прямими лініями з нахилом, який залежить від температури, що і спостерігається в дійсності (рис. 4).

В області напруг $0,2 < V < 0,4$ В невеликий постійний нахил (велике значення показника неідеальності $n > 2$) експериментальних залежностей $\ln(I) = f(V)$ при різних температурах можна розглядати як свідчення тунельної природи механізму струмопереносу [9]. Прямолінійні ділянки ВАХ з однаковими нахилами починаються при досить великих зміщеннях, при яких область просторового заряду досить тонка для прямого тунелювання, яке описується формулою Ньюмена для тунельного механізму струмопереносу з урахуванням впливу послідовного опору [9]:

$$I = I_t^0 \exp(\beta T) \cdot \exp[\alpha(V - IR_s)], \quad (6)$$

I_t^0, α, β – постійні.

3.3 Механізми струмопереносу при зворотніх зміщеннях на гетероструктурі $MoO_x/n-Si$

Залежність $I_{rev}(V)$ добре описується в рамках моделі, заснованої на емісії Френкеля-Пула. Суть процесів, які відбуваються у цьому випадку, полягає в полегшеному електричним полем термічному вивільненні захоплених поверхневими пастками носіїв заряду [10, 11]. Наявність досить сильного електричного поля в області переходу розраховується з рівняння (6):

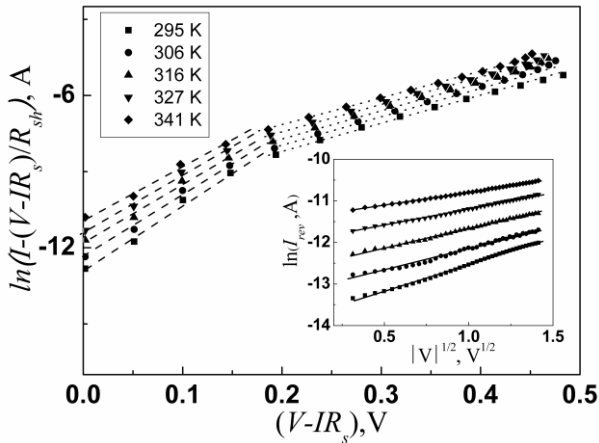


Рис. 4 – Прямі гілки ВАХ гетеропереходу при з врахуванням впливу послідовного і шунтуючого опорів. На вставці представлено емісію Френкеля - Пула через гетероперехід $\text{MoO}_x/n\text{-Si}$ при зворотньому зміщенні

$$E = \frac{V_{bi} - V}{W} = \sqrt{\frac{eN_A(V_{bi} - V)}{2\epsilon_p\epsilon_0}} \quad (6)$$

W – ширина області просторового заряду.

Оскільки концентрація носіїв заряду в оксиді молибдену значно вища ніж в кремнії, то можна вважати, що область просторового заряду гетероструктури $\text{MoO}_x/n\text{-Si}$ повністю формується в Si.

Для асиметричного різкого гетеропереходу ширина області просторового заряду визначається з наступного виразу [10]:

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_n(\varphi_0 \pm eV)}{eN_D}} \quad (7)$$

де ϵ_0 – абсолютна діелектрична проникність вакууму, ϵ_n – відносна діелектрична проникність N_D – концентрація донорів в Si.

Отримане значення ширини області просторового заряду W при $V = 0$ В становить $9,4 \cdot 10^{-7}$ м.

Вираз, який пов'язує величину зворотного струму з прикладеною напругою, в цьому випадку має наступний вигляд [10, 11]:

$$I_{rev} \propto |V| \exp\left[2\beta\sqrt{|V|/T}\right], \quad (8)$$

β – постійна. Побудована в координатах $\ln(I_{rev})$ від $|V|^{1/2}$ залежність зворотного струму від напруги ($0,12 < |V| < 0,7$ В) наведена на вставці рис. 4 і добре апроксимується прямими лініями, що підтверджує правильність запропонованого механізму струмопереносу.

3.4 Енергетичні параметри поверхнево-бар'єрних структур $\text{MoO}_x/n\text{-Si}$

Енергетична діаграма досліджуваних поверхнево-бар'єрних структур $\text{MoO}_x/n\text{-Si}$, була побудована з врахуванням впливу поверхневих станів на основі експериментально оціненої висоти потенціального бар'єру та значень енергетичних параметрів кремнію, взятих з літературних джерел [12] (рис. 5). Положення рівнів Фермі $\Delta\mu_n$ визначені з урахуванням

експериментально отриманих значень концентрацій носіїв заряду в MoO_x і Si, відповідно.

Концентрацію поверхневих станів (дислокації невідповідності) N_{ss} на межі розділу гетеропереходу можна оцінити знаючи постійні ґратки компонент гетероструктури. У першому наближенні $N_{ss} \sim x^{-2}$ [10], де x – відстань між дислокаціями невідповідності, визначається з наступного виразу:

$$x = a_{Si} a_{\text{MoO}_x} / (a_{Si} - a_{\text{MoO}_x}), \quad (9)$$

Значення постійної ґратки ($a_{\text{MoO}_x} = 3,9 \text{ \AA}$) [13] і $a_{Si} = 5,43 \text{ \AA}$ [12], для x і N_{ss} отримаємо $13,84 \text{ \AA}$ і $5,22 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, відповідно. При такій густині поверхневі стани можуть грати роль центрів захоплення, або рекомбінації і суттєво впливати на електричні властивості гетероструктур.

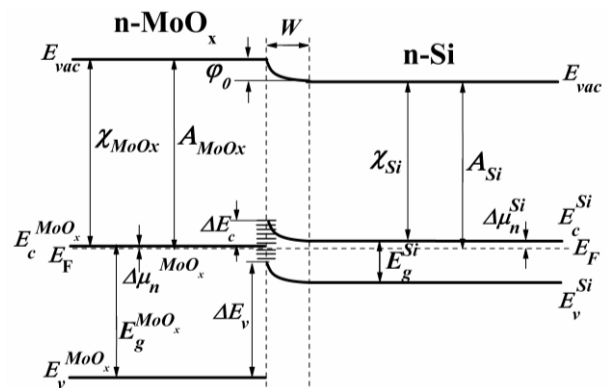


Рис. 5 – Енергетична діаграма ізотипної гетероструктури $n\text{-MoO}_x/n\text{-Si}$: $E_g^{\text{MoO}_x} = 3.4$ eВ, $\chi_{\text{MoO}_x} \approx 4.81$ eВ, $A_{\text{MoO}_x} \approx 4.81$ eВ, $E_g^{\text{Si}} = 1.12$ eВ, $\chi_{\text{Si}} = 4.05$ eВ, $A_{\text{Si}} = 4.32$ eВ, $\Delta\mu_n^{\text{Si}} \approx 0.006$ eВ, $\Delta\mu_n^{\text{Si}} = 0.27$ eВ, $\Delta E_c = 0.76$ eВ, $\Delta E_v = 3.04$ eВ, $\varphi_0 = 0.49$ eВ

3.5 Фотоелектричні властивості гетероструктури $\text{MoO}_x/n\text{-Si}$

На рис. 6 представлено темнову і світлову вольт-амперну характеристики гетероструктури $\text{MoO}_x/n\text{-Si}$.

З освітленої ВАХ встановлено, що гетероструктура має максимальну напругу холостого ходу $V_{oc} = 0.167$ В і струм короткого замикання $I_{sc} = 8.56$ мА/см² при освітленні білим світлом інтенсивністю $P_{opt} = 80$ мВт/см².

Як видно з рис. 6, при освітленні, зворотний струм I_{light} зростає в порівнянні з його величиною у темряві I_{dark} внаслідок розділення фотогенерованих електрон-діркових пар. Невелике збільшення фотоструму при малих зворотних зміщеннях $V_{rev} < 0.2$ В обумовлене збільшенням ефективності поділу фотогенерованих носіїв заряду через розширення області просторового заряду.

Велике співвідношення фотоструму та темного зворотного струму I_{light}/I_{dark} показує, що досліджувану гетероструктуру можна успішно використовувати як фотодіод у фотодіодному режимі роботи (рис. 7).

Оцінити продуктивність фотоприймача більш кількісно можна за допомогою визначення чутливості (R) і детективності (D^*), які відображають чутливість фотоприймача до падаючого випромінювання[14]:

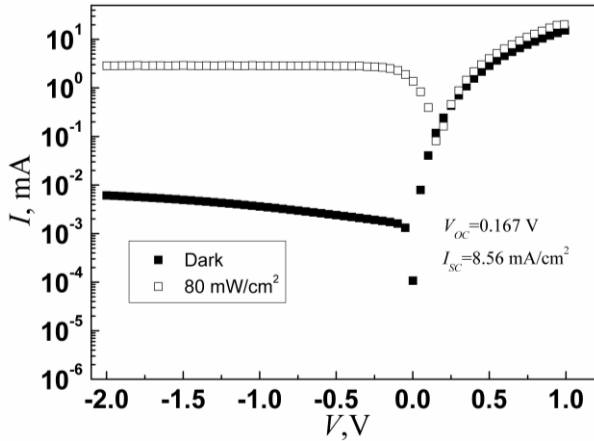


Рис. 6 – Темнова і світлова ВАХ гетеропереходу $\text{MoO}_x/n\text{-Si}$ в напівлогірифічному масштабі

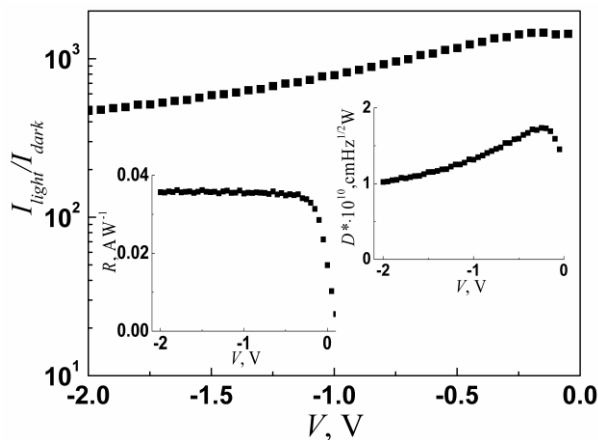


Рис. 7 – Залежність співвідношення I_{light}/I_{dark} від напруги. На вставках приведено залежності чутливості (R) та детективності (D^*) від напруги

$$R = (I_{light} - I_{dark}) / P_{opt}, \quad (10)$$

$$D^* = \sqrt{\frac{A}{2qI_{dark}}} R, \quad (11)$$

На вставках рис. 7 приведено $R = f(V_{rev})$ та

Электрические и фотоэлектрические свойства поверхностно-барьерных структур $\text{MoO}_x/n\text{-Si}$

М.Н. Солован

Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского 2, 58012 Черновцы, Украина

Изготовлено гетеропереходы $\text{MoO}_x/n\text{-Si}$ путем нанесения тонких пленок MoO_x методом реактивного магнетронного распыления на подложки кремния. Измерены вольт-амперные характеристики (ВАХ) полученных гетеропереходов при различных температурах. Проанализированы температурные зависимости высоты потенциального барьера и последовательного сопротивления гетероперехода. Построено энергетическую диаграмму исследуемых гетеропереходов. Оценено концентрацию поверхностных состояний на границе раздела гетероперехода и установлено доминирующие механизмы токопереноса через исследуемые гетеропереходы при прямом и обратном смещениях. Установлено, что гетероструктура $\text{MoO}_x/n\text{-Si}$, имеет максимальное напряжение холостого хода $V_{oc} = 0.167$ В и плотность тока короткого замыкания $I_{sc} = 8.56$ мА/см². Проанализировано возможности применения полученной гетероструктуры в качестве фотодиода.

Ключевые слова: Гетероструктура, Потенциальный барьер, Механизмы токопереноса, Энергетическая диаграмма, MoO_x , Si.

$D^* = f(V_{rev})$ з яких видно, що чутливість (R) при зміщеннях $V_{rev} > 0.2$ В виходить на насичення і практично не залежить від напруги, а детективність (D^*), яка описує нормовану потужність опромінення, необхідну для отримання сигналу від фотоприймача на рівні шуму, зменшується при $V_{rev} > 0.2$ В, що обумовлено зростанням темнового зворотнього струму I_{dark} .

Однак, необхідні додаткові дослідження для однозначного визначення домінуючих рекомбінаційних втрат фотогенерованих носіїв заряду в гетеропереходах $\text{MoO}_x/n\text{-Si}$.

4. ВИСНОВОК

Методом реактивного магнетронного розпилення були отримані фоточутливі гетеропереходи $\text{MoO}_x/n\text{-Si}$.

Досліджені електричні властивості гетероструктур $\text{MoO}_x/n\text{-Si}$, проаналізовано температурні залежності висоти потенціального бар'єру та послідовного і шунтуючого опорів для гетеропереходів $\text{MoO}_x/n\text{-Si}$.

Із аналізу температурних залежностей прямих гілок ВАХ гетероструктури, встановлено, що домінуючим механізмом струмопереносу при малих зміщеннях ($3kT/e < V < 0,2$ В) є емісійно-рекомбінаційний механізм струмопереносу. При більших зміщеннях ($0,2 < V < 0,4$ В) домінуючим механізмом струмопереносу є тунелювання.

При зворотному зміщенні домінуючими механізмами перенесення носіїв заряду через гетероструктуру $\text{MoO}_x/n\text{-Si}$ є емісія Френкеля-Пулла.

Оцінено концентрацію поверхневих станів N_{ss} на межі розділу гетеропереходу яка рівна $5.22 \cdot 10^{13}$ см⁻² та побудовано енергетичну діаграму досліджуваних поверхнево-бар'єрних структур $\text{MoO}_x/n\text{-Si}$ з врахуванням впливу поверхневих станів і експериментально оціненої висоти потенціального бар'єру гетеропереходу.

Встановлено, що гетероструктура $\text{MoO}_x/n\text{-Si}$, має максимальну напругу холостого ходу $V_{oc} = 0.167$ В та густину струму короткого замикання $I_{sc} = 8.56$ мА/см².

Показано, що досліджувану гетероструктуру можна успішно використовувати як фотодіод у фотодіодному режимі роботи.

Electrical and Photoelectrical Properties of Surface Barrier Structures MoO_x/n-Si

M.M. Solovan

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, 2, Kotsyubynskogo Str., 58012 Chernivtsi, Ukraine

MoO_x/n-Si heterojunctions were prepared by the deposition of MoO_x thin films by means of the reactive magnetron sputtering technique onto silicon substrates. Current-voltage characteristics (*I-V*) of the prepared heterojunctions were measured at different temperatures. The temperature dependence of the height of the potential barrier and series resistance was analyzed. The energy diagram of the heterojunctions under investigation was developed. The concentration of the surface states at the heterojunction was estimated and the dominant charge transport mechanisms were determined at forward and reverse bias.

The heterojunctions under investigation generate open-circuit voltage $V_{oc} = 0.167$ V and short-circuit current $I_{sc} = 8.56$ mA/cm² under illumination 80 mW/cm².

Keywords: Heterostructure, Potential barrier, Charge transport mechanisms, Energy diagram, MoO_x, Si.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Paudel Naba Raj, Xiao Chuanxiao, Yan Yanfa, *Prog. Photovolt: Res. Appl.* **23**, 437 (2015).
2. A.J. Irfan, Z.Turinske, Y. Gao Bao, *Appl. Phys. Lett.* **101**, 093305 (2012).
3. S. Subbarayudu, V.Madhavi, S. Uthanna, *Adv. Mat. Lett.* **4**(8), 637 (2013).
4. L.D. Lopez-Carreno, A. Pardo, M. Zuluaga, O.L. Cortes-Bracho, J. Torres, J.E. Alfonso, *phys. status solidi (c)* **4**, 4064 (2007).
5. M.M. Solovan, V.V. Brus, A.I. Mostovyi, P.D. Maryanchuk, E. Tresso, N.M. Gavaleshko, *phys. status solidi (RRL)* **10**(4), 346 (2016).
6. O.L. Maslyanchuk, M.M. Solovan, V.V. Kulchynsky, V.V. Brus, P.D. Maryanchuk, I.M. Fodchuk, V.A. Gnatyuk, T. Aoki, C. Potiriadis, Y. Kaissas, *IEEE T. Nuclea Sci.* **64**, 1168 (2017).
7. L.A. Kosyachenko, X. Methew, V.V. Motushchuk, V.M. Sklyarchuk, *Sol. Energ.* **80**, 148 (2006).
8. V.V. Brus, P.D. Maryanchuk, M.I. Ilashchuk, J. Rappich, I.S. Babichuk, Z.D. Kovalyuk, *Sol. Energ.* **112**, 78 (2015).
9. V.V. Brus, M.I. Ilashchuk, Z.D. Kovalyuk, P.D. Maryanchuk, O.A. Parfenyuk, *Semicond. Sci. Technol.* **28**, 015014 (2013).
10. S.M. Sze, K.K. Ng, *Physics of semiconductor devices*, 832 (Wiley: New Jersey: 2007).
11. V.V. Brus, M.I. Ilashchuk, V.V. Khomyak, Z.D. Kovalyuk, P.D. Maryanchuk, K.S. Ulyanytsky, *Semiconductors* **46**, 1152 (2012).
12. NIST Chemistry WebBook, SRD, 69, Database (<http://webbook.nist.gov>).
13. Peng-Ru Huang, Yao He, Chao Cao, Zheng-Hong Lu. *Sci. Rep.* **4**, 7131 (2014).
14. X. Zhang, D. Hu, Z. Tang, D. Ma, *Appl. Surf. Sci.* **357**, 1939 (2015).