

М.М. Солован, П.Д. Мар'янчук

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
2, вул. Коцюбинського, Чернівці, 58002, Україна
E-mail: m.solovan@chnu.edu.ua

Електричні і фотоелектричні властивості поверхнево-бар'єрних структур MoN/n-Si

Предмет і мета роботи. Предметом досліджень є електричні та фотоелектричні властивості гетероструктури MoN/n-Si, отриманої шляхом напилення тонкої плівки нітриду молібдену (n-типу провідності) методом реактивного магнетронного розпилення на монокристалічні пластини кремнію n-типу провідності. Метою роботи є виготовлення фоточутливих поверхнево-бар'єрних структур MoN/n-Si, визначення бар'єрних параметрів та домінуючих механізмів струмоперенесення через отриману гетероструктуру при прямому та зворотному зміщеннях, дослідження фотоелектричних властивостей та причин втрат фотогенерованих носіїв заряду в отриманих гетероструктурах.

Методи і методологія роботи. Виміряно прямі та зворотні вольт-амперні характеристики (ВАХ) гетероструктури MoN/n-Si при різних температурах, а також при опроміненні білим світлом інтенсивністю $P_{opt} = 80 \text{ мВт/см}^2$ та трьома лазерами $\lambda = 405, 646, 780 \text{ нм}$ інтенсивністю $I_{opt} = 5 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$.

Результати роботи. Виготовлено фоточутливі гетероструктури MoN/n-Si. Отримані гетеропереходи з високою потенціальною бар'єрою $\phi_0 = eV_{bi} = 0,37 \text{ еВ}$ володіють яскраво вираженими випрямляючими властивостями.

Визначено домінуючі механізми струмоперенесення через гетероперехід: при прямому зміщенні ВАХ добре описуються в рамках генераційно-рекомбінаційної та тунельно-рекомбінаційної моделей за участі поверхневих станів, а при зворотних зміщеннях – у рамках тунельної моделі.

Висновки. Встановлено, що в умовах опромінення білим світлом інтенсивністю $P_{opt} = 80 \text{ мВт/см}^2$ зворотний струм I_{light} зростає в порівнянні з його величиною у темряві I_{dark} більше ніж на порядок унаслідок розділення фотогенерованих електронно-діркових пар. Показано фоточутливість даної гетероструктури до монохроматичного освітлення лазерами з довжиною хвилі електромагнітного випромінювання $\lambda = 405, 646, 780 \text{ нм}$ інтенсивністю $I_{opt} = 5 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$. Отримані результати дозволяють зробити висновок, що виготовлену структуру можна використовувати як фоточутливий прилад. Л. 5. Бібліогр.: 16 назв.

Ключові слова: нітрид молібдену, кремній, гетероперехід, механізми струмоперенесення, рекомбінація.

Тонкі плівки нітриду молібдену (MoN), яким властиві висока електрична провідність, висока температура плавлення і хімічна стабільність, набули широкого практичного застосування в мікроелектроніці як дифузійний бар'єр між кремнієм і мідними електродами [1, 2], а також завдяки своїм фізичним властивостям є перспективними для виготовлення поверхнево-бар'єрних структур.

У [3] показано, що робота виходу електронів у тонких плівках MoN_x, що нанесені на підкладки окисненого кремнію (SiO₂/Si) методом реактивного магнетронного розпилення, змінюєть-

ся від 4,6 до 5,1 еВ залежно від співвідношення тисків робочих газів (аргону й азоту). Відомо, що при контакті матеріалу, який володіє більшою роботою виходу електронів, ніж кремній n-типу провідності, створюється потенціальний бар'єр. Тому, враховуючи фізичні властивості плівок MoN, цікаво створити та дослідити поверхнево-бар'єрні структури MoN/n-Si.

З літературних джерел відомо, що прилади на основі нітридів металів мають високу стабільність параметрів, а фізичні властивості нітридів металів дуже залежать від технології їх отримання [4, 5].

Незважаючи на досягнення у технології виготовлення ефективних та надійних приладів на основі нітридів металів, дослідженню їх електричних і фотоелектричних властивостей приділяють недостатньо уваги. Це обумовлено складністю інтерпретації експериментальних результатів унаслідок впливу електрично-активних поверхневих станів, розміщених на гетеромежі, густина яких змінюється під впливом зовнішніх факторів [6]. Ця обставина негативно впливає на подальше покращення параметрів напівпровідникових гетероструктур і практичне використання останніх. Отже, дослідження електричних і фотоелектричних параметрів поверхнево-бар'єрних структур на основі нітридів металів представляє значний інтерес.

1. Експериментальна частина. Для виготовлення поверхнево-бар'єрних структур використовували монокристалічний кремній *n*-типу провідності з орієнтацією поверхні (100) завтовшки 330 мкм. Значення питомого опору і концентрації носіїв заряду в цих кристалах при кімнатній температурі (293 К) становили $\rho = 6 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ і $n = 7,4 \dots 10^{14} \text{ см}^{-3}$ відповідно. Глибина рівня Фермі для базового матеріалу ($E_c - E_F = 0,27 \text{ eV}$) 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 шляхом нанесення плівок MoN на поліровану поверхню пластини Si ($5 \times 5 \times 0,33 \text{ мм}^3$) у вакуумній установці *Leybold-Heraeus L560* за допомогою реактивного магнетронного розпилення мішені з чистого молібдену в газовій суміші аргону й азоту при постійній напрузі. Молібденова мішень – шайба діаметром 100 мм і завтовшки 5 мм – розміщується на столику магнетрона з водяним охолодженням. Підкладки з монокристалічного кремнію розміщувалися над магнетроном з наступним обертанням столика для забезпечення однорідності плівок за товщиною. Перед початком процесу напилення повітря у вакуумній камері відкачувалося до залишкового тиску 10^{-4} Па .

Формування газової суміші аргону й азоту в необхідній пропорції здійснювалося з двох незалежних джерел протягом процесу напилення.

Для очищення поверхні мішені і підкладки використовували короткочасне протравлю-

вання бомбардуючими йонами аргону. Під час процесу напилення парціальні тиски у вакуумній камері становили 0,3 Па для аргону і 0,3 Па для азоту. Потужність магнетрона дорівнювала 30 Вт. Процес напилення тривав 1,5 хв за температури підкладки 573 К.

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

Напилення тонких плівок *ITO* проводилося методом магнетронного розпилення мішені *ITO* в атмосфері аргону за постійної напруги.

Під час напилення тиск аргону у вакуумній камері становив $\sim 0,4 \text{ Па}$. Потужність магнетрона дорівнювала $\sim 30 \text{ Вт}$. Процес напилення тривав $\sim 5 \text{ хв}$ за температури підкладок $\sim 420 \text{ К}$.

Щоб уникнути рекомбінації на тильній стороні пластин кремнію і забезпечити хороше збирання фотогенерованих носіїв заряду, ми використовували підкладки, які мали тильний контакт з вбудованим внутрішнім полем. Цей контакт був виготовлений шляхом напилення шару власного гідрогенізованого аморфного кремнію (*a-Si:H*) завтовшки $\sim 10 \text{ нм}$ для пасивації поверхні підкладки. Наступним був шар сильно легованого фосфором гідрогенізованого аморфного кремнію n^+ (*a-Si:H*) завтовшки $\sim 20 \text{ нм}$ для створення ізотипного переходу з висотою бар'єру $\sim 0,1 \text{ eV}$ на нижньому боці пластин кремнію; останнім наносили шар алюмінію методом термічного випаровування [14].

2. Результати та їх обговорення. На рис. 1 представлені темнові вольт-амперні характеристики (ВАХ) гетероструктур MoN/*n*-Si. Досліджувані гетеропереходи володіли яскраво вираженими діодними характеристиками.

Визначено висоту потенціального бар'єру ϕ_0 гетеропереходу шляхом екстраполяції лінійної ділянки ВАХ до перетину з віссю напруг. Висота потенціального бар'єру для гетероструктур MoN/*n*-Si за кімнатної температури дорівнює $\phi_0 = eV_{bi} = 0,37 \text{ eV}$, де V_{bi} – вбудований потенціал.

Аналіз побудованих у напівлогарифмічному масштабі прямих гілок ВАХ структур MoN/*n*-Si (рис. 2) показав, що на залежності $\ln I = f(V)$ спостерігаються дві прямолінійні ділянки – це

свідчить про експоненційну залежність струму від напруги. Отримане значення коефіцієнта неідеальності n для обох ділянок напруг: n змінюється від 2,6 до 2,4 з підвищенням температури у межах 294...350 К в області напруг $3kT/e < V < 0,2$ В; $n = 5$ в області напруг $0,2 < V < 0,4$ В.

У роботі [7] показано, що однією з умов домінування генераційно-рекомбінаційного струмоперенесення в області просторового заряду через глибокі енергетичні рівні (модель Саа–Нойса–Шоклі [8]) над надбар'єрним струмом через контакт «метал–напівпровідник» є $\phi_0 > (E_g/2 - \Delta\mu_n)$. У нашому випадку ця умова виконується, оскільки висота бар'єра дещо більша різниці половини ширини забороненої зони і глибини залягання рівня Фермі ($\phi_0 = 0,37$ eВ і $(E_g/2 - \Delta\mu_n) = 0,29$ eВ). Однак значення показника неідеальності в інтервалі прямих зміщень ($3kT/e < V < 0,2$ В) не рівне 2, а змінюється від 2,6 до 2,4 з підвищенням температури в інтервалі 295...358 К. Це свідчить про те, що у запропонований вище домінуючий механізм струмоперенесення, який обумовлений генераційно-рекомбінаційними процесами в області просторового заряду, роблять внесок електрично активні поверхневі стани на металургійній межі розділу досліджуваного гетеропереходу [9].

Експериментально отримане відхилення від вище згаданої умови домінування генераційно-рекомбінаційного механізму $n = 2$ може бути викликано тим, що ця умова була сформульована для контактів «метал–напівпровідник» [7] в рамках моделі Саа–Нойса–Шоклі, розробленої на основі p - n -переходу, а не для гетеропереходів з розривами зон та поверхневими станами. Слід зазначити, що відхилення від умови домінування генераційно-рекомбінаційного механізму вже зустрічалося в літературі при аналізі гетеропереходів [10, 11].

Концентрацію поверхневих станів (дислокацій невідповідності) N_{ss} на межі розділу гетеропереходу було оцінено таким чином. У першому наближенні $N_{ss} \sim x^{-2}$, де x – відстань між дислокаціями невідповідності, що визначається з виразу $x = a_{Si} a_{MoN} / (a_{Si} - a_{MoN})$. Величини постійної ґратки складових гетеропереходу дорівнюють: $a_{MoN} = 4,16$ Å [5] і $a_{Si} = 5,43$ Å [12], тому для x і N_{ss} отримали відповідно величини

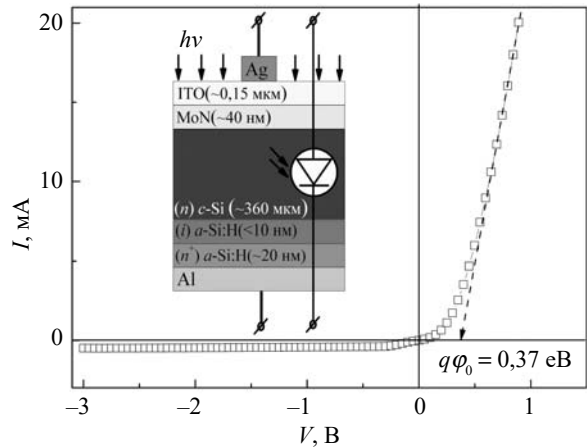


Рис. 1. Вольт-амперні характеристики гетеропереходів MoN/n-Si. На вставці наведено структурну схему гетероструктури MoN/n-Si

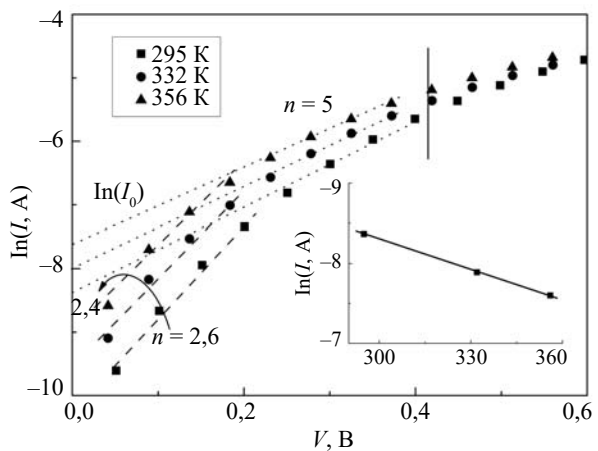


Рис. 2. Прямі гілки ВАХ гетеропереходу в напівлогічному масштабі. На вставці – температурна залежність струму відсічки

ни $17,78$ Å і $3,16 \times 10^{13}$ см $^{-2}$. За такої густини поверхневі стани можуть грати роль центрів захоплення або рекомбінації й істотно впливати на електричні властивості гетероструктур.

Аналіз проходження носіїв заряду крізь енергетичний бар'єр при прямих зміщеннях ($V > 0,2$) показує, що нахил прямолінійних ділянок $\Delta \ln(I) / \Delta V$ практично не залежить від температури і мають місце великі значення коефіцієнта неідеальності ($n = 5$). Ця обставина виключає можливість аналізу струмоперенесення на основі генераційно-рекомбінаційних процесів в області просторового заряду [13]. Постійний нахил залежностей $\ln(I) = f(V)$ при різних температурах можна розглядати як свідчення тунельної природи механізму струмоперенесення [14, 15]. Отже, домінуючим механізмом

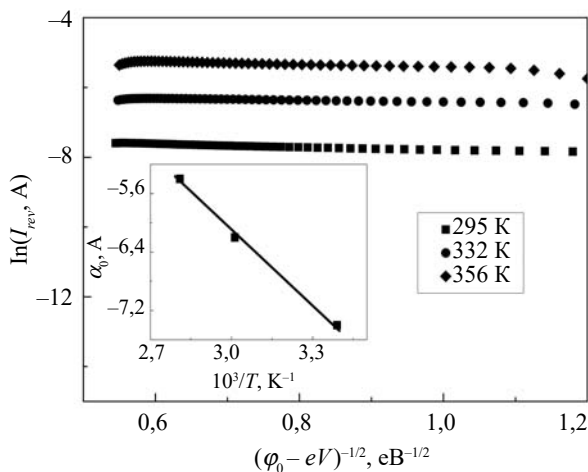


Рис. 3. Залежності $\ln I_{rev} = f(\phi_0 - eV)^{-1/2}$, які характеризують тунелювання через досліджуваний гетероперехід при зворотному зміщенні. На вставці – температурна залежність параметра a_0

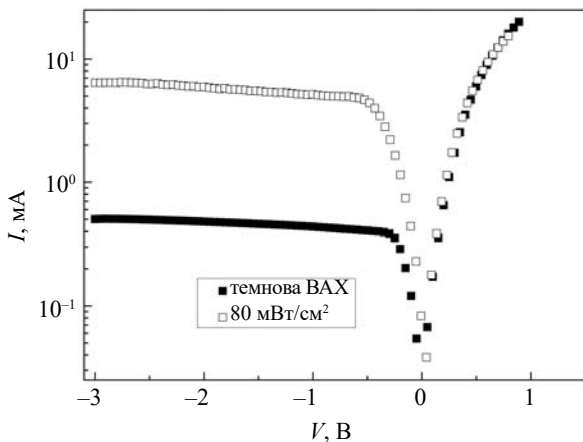


Рис. 4. Темнова і світлова ВАХ гетеропереходу MoN/n-Si в напівлогарифмічному масштабі

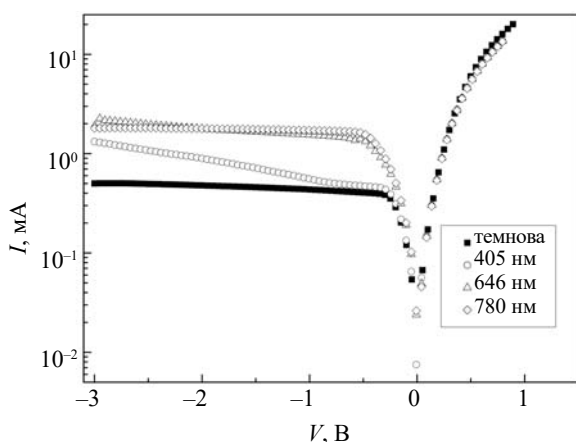


Рис. 5. Вольтамперна характеристика освітленого гетеропереходу MoN/n-Si при монохроматичному освітленні ($I_{opt} = 5 \text{ мВт см}^{-2}$)

струмоперенесення, враховуючи високу концентрацію дислокацій невідповідності N_{ss} , можна вважати тунельно-рекомбінаційні процеси за участю поверхневих станів на межі розділу MoN/Si.

У цьому випадку струм при прямому зміщенні можна визначити за допомогою виразу [14]:

$$I = B \exp(-A(\phi_0(T) - eV)), \quad (1)$$

де A – характеристика матеріалу; B – величина, яка майже не залежить від температури і напруги; ϕ_0 – висота потенціального бар'єру.

Вираз (1) можна записати в іншій формі:

$$I = B \exp(-A\phi_0(T)) \exp(AeV) = I_0 \exp(AeV), \quad (2)$$

де $I_0 = B \exp(-A\phi_0(T))$ – струм відсічки, який не залежить від прикладеної напруги (його температурну залежність наведено на вставці рис. 2). З виразу (2) видно, що нахил $\Delta \ln(I) / \Delta V$ початкових ділянок прямих гілок ВАХ (рис. 2) визначає коефіцієнт A , який набуває значення $7,1 \text{ eV}^{-1}$.

Аналіз механізмів струмоперенесення через досліджувану гетероструктуру MoN/n-Si при зворотному зміщенні показав, що залежність $I_{rev}(V)$ добре описується в рамках тунельної моделі струмоперенесення внаслідок дуже малих теплових складових.

У випадку різкого переходу вираз для тунельного струму при зворотному зміщенні має вигляд [14]:

$$I_{rev} \approx a_0 \exp\left(\frac{b_0}{\sqrt{\phi_0(T) - eV}}\right), \quad (3)$$

де a_0 – це параметр, що визначається ймовірністю заповнення енергетичних рівнів, з яких відбувається тунелювання; b_0 – визначає швидкість зміни струму з напругою. Таким чином, згідно з рівнянням (3), апроксимація зворотних гілок ВАХ прямими лініями в координатах $\ln(I_{rev}) = f(\phi_0 - eV)^{-1/2}$ (рис. 3) підтверджує домінування тунельного механізму струмоперенесення.

Як було зазначено вище, параметр a_0 визначається ймовірністю заповнення енергетичного рівня, з якого відбувається тунелювання при зворотному зміщенні. З нахилу температурної залежності $\ln(a_0) = f(10^3/T)$ можна ви-

значити глибину його залягання, яка складає 0,29 еВ (див. вставку на рис. 3).

На рис. 4 наведено темнову і світлову ВАХ гетероструктури MoN/n-Si. Як видно з рис. 4, при опроміненні білим світлом інтенсивністю $P_{opt} = 80$ мВт/см² зворотний струм I_{light} зростає в порівнянні з його величиною у темряві I_{dark} більше ніж на порядок унаслідок розділення фотогенерованих електронно-діркових пар. Зростання фотоструму в умовах збільшення зворотного зміщення обумовлене збільшенням ефективності поділу фотогенерованих носіїв заряду через розширення області просторового заряду.

На рис. 5 представлено ВАХ гетероструктури MoN/n-Si – темнову і при освітленні лазерами (монохроматичному освітленні). З рис. 5 видно, що у випадку опромінення зразка лазерами на різних довжинах хвилі значення фотоструму будуть різними. В умовах опромінення зразка лазером із синім світлом ($\lambda = 405$ нм) спостерігалось найменше значення фотоструму та його зростання зі збільшенням зворотного зміщення. Найнижче значення фотоструму при опроміненні синім лазером обумовлено поверхневою рекомбінацією, оскільки коефіцієнт поглинання для кремнію у короткохвильовій області спектра великий і кванти світла поглинатимуться у тонкій приповерхневій частині кремнію, де багато обірваних хімічних зв'язків. Унаслідок відносно малого значення часу життя неосновних носіїв заряду в низькоомному кремнії та великої кількості рекомбінаційних центрів у приповерхневому шарі фотогенеровані неосновні носії заряду не встигають розділитися внутрішнім електричним полем і не беруть участі у формуванні фотоструму. Зростання фотоструму зі збільшенням зворотного зміщення обумовлене збільшенням ефективності поділу фотогенерованих носіїв заряду через посилення внутрішнього поля.

Більші значення фотоструму при опроміненні зразка лазером із зеленим світлом ($\lambda = 646$ нм) обумовлені меншим коефіцієнтом поглинання в цій області спектра, оскільки значення коефіцієнта поглинання кремнію зменшується зі зростанням довжини хвилі падаючого випромінювання. Внаслідок цього зростає ефективна довжина проникнення фотонів у кремнієву підкладку і фотогенерація електронно-діркових пар відбувається на біль-

шій відстані від приповерхневої області (де багато центрів рекомбінації), а незначне зростання фотоструму зі збільшенням зворотного зміщення пов'язане з описаними вище процесами.

У випадку опромінення зразка лазером з червоним світлом ($\lambda = 780$ нм) значення фотоструму є найвищими і не зростають при збільшенні зворотного зміщення через найменший коефіцієнт поглинання кремнію у цій області спектра, а як наслідок має місце найменший вплив поверхневої рекомбінації.

Варто зазначити, що досліджений гетероперехід був отриманий без оптимізації технологічних умов і додаткового оброблення поверхні Si. Очевидно, що модифікація поверхні Si та застосування додаткових проміжних шарів можуть зменшити концентрацію поверхневих станів на межі розділу MoN/Si і таким чином підвищити ефективність фотоелектричного перетворення [14–16]. За умови виконання таких заходів та поліпшення вихідних фотоелектричних параметрів ця гетероструктура може бути успішно використана для виготовлення різних фотоелектричних напівпровідникових приладів (фотодіодів, сонячних елементів).

Висновок. Уперше отримано фоточутливі гетеропереходи MoN/n-Si методом реактивного магнетронного розпилення на постійному струмі. Встановлено, що отриманим гетероструктурам MoN/n-Si властиві яскраво виражені діодні характеристики з висотою потенціального бар'єру при кімнатній температурі $\phi_0 = eV_{bi} = 0,37$ еВ.

Аналіз прямих гілок ВАХ структури MoN/n-Si, які побудовані в напівлогарифмічному масштабі, показав, що значення показника неідеальності (n) в області напруг $3kT/e < V < 0,2$ В змінюються від 2,6 до 2,4 з підвищенням температури в інтервалі 295...358 К. Це свідчить про те, що домінуючим механізмом струмоперенесення є генераційно-рекомбінаційні процеси в області просторового заряду за наявності внеску електрично активних поверхневих станів на металургійній межі розділу досліджуваного гетеропереходу. Проходження носіїв заряду крізь енергетичний бар'єр в прямому напрямку при прямих зміщеннях ($V > 0,2$) показує, що нахил прямолінійних ділянок $\Delta \ln(I) / \Delta V$ практично не залежить від температури і величина коефіцієнта неідеальності $n = 5$. За таких умов

домінуючим механізмом струмоперенесення можна вважати тунельно-рекомбінаційні процеси за участю поверхневих станів на межі розділу MoN/Si.

Аналіз механізмів струмоперенесення через досліджувану гетероструктуру MoN/n-Si при зворотному зміщенні показав, що тунелювання є домінуючим механізмом струмоперенесення в даній структурі. Енергетичний рівень, з якого відбувається тунелювання, залягає на глибині 0,29 еВ.

Досліджено вплив світла на ВАХ гетеропереходу MoN/n-Si та встановлено, що в умо-

вах опромінення білим світлом інтенсивністю $P_{opt} = 80$ мВт/см² зворотний струм I_{light} зростає в порівнянні з його величиною у темряві I_{dark} більше ніж на порядок внаслідок розділення фотогенерованих електронно-діркових пар. Показано фоточутливість досліджуваної гетероструктури до монохроматичного освітлення лазерами з довжиною хвилі електромагнітного випромінювання $\lambda = 405, 646, 780$ нм інтенсивністю $I_{opt} = 5$ мВт см⁻². З вищесказаного можна зробити висновок, що виготовлену гетероструктуру можна використовувати як фоточутливий прилад.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

- 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. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(98\)01728-3](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(98)01728-3).
- Alén P., Ritala M., Arstila K., Keinonen J., Leskelä M. Atomic layer deposition of molybdenum nitride thin films for Cu metallizations. *J. Electrochem. Soc.* 2005. Vol. 152, Iss. 5. G361–G366. DOI: 10.1149/1.1882012.
- Bing-Yue T., Chih-Feng H., Chih-Hsun L. Investigation of Molybdenum Nitride Gate on SiO₂ and HfO₂ for MOSFET. *J. Electrochem. Soc.* 2006. Vol. 153, Iss. 3. G197–G202. DOI: 10.1149/1.2158576.
- Gagnon G., Currie J.F., Beique C., Brebner J.L., Gujrathi S.G., Onllet L. Characterization of reactively evaporated TiN layers for diffusion barrier applications. *J. Appl. Phys.* 1998. Vol. 75, Iss. 3. P. 1565–1570.
- Самсонов Г.В. *Нитриды*. Киев: Наукова думка, 1969. 380 с.
- Zhao L., Wang X., Zhang Z., Yang P., Chen J., Chen Y., Wang H., Shang Q., Zhang Y., Zhang Y., Liu X., Leng J., Liu Z., Zhang Q. Surface State Mediated Interlayer Excitons in a 2D Nonlayered–Layered Semiconductor Heterojunction. *Adv. Electron. Mater.* 2017. Vol. 3, Iss. 12. P. 1700373. DOI: <https://doi.org/10.1002/aelm.201700373>.
- Косяченко Л.А., Махний В.П., Потыкевич И.В. Генерация-рекомбинация в области пространственного заряда контакта метал – CdTe. *Укр. физ. журн.* 1978. Т. 23, № 2. С. 279–287.
- Chih-Tang S., Noyce R.N., Shockley W. Carrier Generation and Recombination in P-N Junctions and P-N Junction Characteristics. *Proc. IRE*. 1957. Vol. 45, Iss. 9. P. 1228–1243. DOI: 10.1109/JRPROC.1957.278528.
- Solovan M.N., Brus V.V., Maryanchuk P.D., Ilashchuk M.I., Kovalyuk Z.D. Temperature dependent electrical properties and barrier parameters of photosensitive heterojunctions n-TiN/p-Cd_{1-x}Zn_xTe. *Semicond. Sci. Technol.* 2015. Vol. 30, Iss. 7. P. 075006 (6 p.). doi:10.1088/0268-1242/30/7/075006.
- Solovan M.N., Brus V.V., Maryanchuk P.D., Ilashchuk M.I., Rappich J., Nickel N., Abashin S.L. Fabrication and characterization of anisotype heterojunctions n-TiN/p-CdTe. *Semicond. Sci. Technol.* 2013. Vol. 29, Iss. 1. P. 015007 (8 p.). DOI: 10.1088/0268-1242/29/1/015007.
- Kosyachenko L.A., Yatskiv R., Yurtsenyuk N.S., Maslyanchuk O.L., Grym J. Graphite/CdMnTe Schottky diodes and their electrical characteristics. *Semicond. Sci. Technol.* 2014. Vol. 29, Iss. 1. P. 015006 (10 p.). DOI: 10.1088/0268-1242/29/1/015006.
- Чопра К., Дас С. *Тонкопленочные солнечные элементы*. Пер. с англ. И.П. Гавриловой. Москва: Мир, 1986. 440 с.
- Brus V.V., Ilashchuk M.I., Kovalyuk Z.D., Maryanchuk P.D., Ulyanytskyi K.S. Electrical and photoelectrical properties of photosensitive heterojunctions n-TiO₂/p-CdTe. *Semicond. Sci. Technol.* 2011. Vol. 26, Iss. 12. P. 125006 (6 p.). DOI: 10.1088/0268-1242/26/12/125006.
- Sharma B.L., Purohit R.K. *Semiconductor heterojunctions*. Oxford, New York: Pergamon Press, 1974. 216 p.
- Fahrenbruch A.L., Bube R.H. *Fundamentals of solar cells. Photovoltaic solar energy conversion*. New York: Academic Press, 1983. 559 p.
- Sze S.M., Kwok K. *Physics of semiconductor devices*. 3rd ed. New Jersey: Wiley, 2007. 815 p.

Стаття надійшла 22.10.2018

REFERENCES

- Jui-Chang, C., Shuo-Lun, T., Mao-Chieh, C., 1999. Sputter-deposited Mo and reactively sputter-deposited Mo-N films as barrier layers against Cu diffusion. *Thin Solid Films*, **346**(1–2), pp. 299–306. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(98\)01728-3](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(98)01728-3).
- Alén, P., Ritala, M., Arstila, K., Keinonen, J., Leskelä, M., 2005. Atomic layer deposition of molybdenum nitride thin films for Cu metallizations. *J. Electrochem. Soc.*, **152**(5), G361–G366. DOI: 10.1149/1.1882012.

3. Bing-Yue, T., Chih-Feng, H., Chih-Hsun L., 2006. Investigation of Molybdenum Nitride Gate on SiO₂ and HfO₂ for MOSFET. *J. Electrochem. Soc.*, **153**(3), G197–G202. DOI: 10.1149/1.2158576.
4. Gagnon, G., Currie, J.F., Beique, C., Brebner, J.L., Gujrathi, S.G., Onlet L., 1998. Characterization of reactively evaporated TiN layers for diffusion barrier applications. *J. Appl. Phys.*, **75**(3), pp. 1565–1570.
5. Samsonov, G.V., 1969. *Nitrides*. Kiev: Naukova Dumka Publ. (in Russian).
6. Zhao, L., Wang, X., Zhang, Z., Yang, P., Chen, J., Chen, Y., Wang, H., Shang, Q., Zhang, Y., Zhang, Y., Liu, X., Leng, J., Liu, Z., Zhang, Q., 2017. Surface State Mediated Interlayer Excitons in a 2D Nonlayered–Layered Semiconductor Heterojunction. *Adv. Electron. Mater.*, **3**(12), pp. 1700373. DOI: <https://doi.org/10.1002/aelm.201700373>.
7. Kosyachenko, L.A., Makhniy, V.P., Potykevich, I.V., 1978. Generation-recombination in the space-charge region of a metal–CdTe contact. *Ukr. J. Phys.*, **23**(2), pp. 279–287 (in Russian).
8. Chih-Tang, S., Noyce, R.N., Shockley, W., 1957. Carrier Generation and Recombination in P-N Junctions and P-N Junction Characteristics. *Proc. IRE*, **45**(9), pp. 1228–1243. DOI: 10.1109/JRPROC.1957.278528.
9. Solovan, M.N., Brus, V.V., Maryanchuk, P.D., Ilashchuk, M.I., Kovalyuk, Z.D., 2015. Temperature dependent electrical properties and barrier parameters of photosensitive heterojunctions n-TiN/p-Cd_{1-x}Zn_xTe. *Semicond. Sci. Technol.*, **30**(7), pp. 075006 (6 p.). DOI: 10.1088/0268-1242/30/7/075006.
10. Solovan, M.N., Brus, V.V., Maryanchuk, P.D., Ilashchuk, M.I., Rappich, J., Nickel, N., Abashin S.L., 2013. Fabrication and characterization of anisotype heterojunctions n-TiN/p-CdTe. *Semicond. Sci. Technol.*, **29**(1), pp. 015007 (8 p.). DOI: 10.1088/0268-1242/29/1/015007.
11. Kosyachenko, L.A., Yatskiv, R., Yurtsenyuk, N.S., Maslyanchuk, O.L., Grym, J., 2014. Graphite/CdMnTe Schottky diodes and their electrical characteristics. *Semicond. Sci. Technol.*, **29**(1), pp. 015006 (10 p.). DOI: 10.1088/0268-1242/29/1/015006.
12. Chopra, K., Das, S., 1986. *Thin Film Solar Cells*. Translated from English by I.P. Gavrilova. Moscow: Mir Publ. (in Russian).
13. Brus, V.V., Ilashchuk, M.I., Kovalyuk, Z.D., Maryanchuk, P.D., Ulyanytskiy, K.S., 2011. Electrical and photoelectrical properties of photosensitive heterojunctions n-TiO₂/p-CdTe. *Semicond. Sci. Technol.*, **26**(12), pp. 125006 (6 p.). DOI: 10.1088/0268-1242/26/12/125006.
14. Sharma, B.L., Purohit, R.K., 1974. *Semiconductor heterojunctions*. Oxford, New York, Pergamon Press.
15. Fahrenbruch, A.L., Bube, R.H., 1983. *Fundamentals of solar cells. Photovoltaic solar energy conversion*. New York, Academic Press.
16. Sze, S.M., Kwok, K., 2007. *Physics of semiconductor devices*. 3rd ed. New Jersey: Wiley.

Received 22.10.2018

M.M. Solovan, P.D. Maryanchuk

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University
2, st. Kotsyubinsky, 58012, Chernivtsi, Ukraine
E-mail: m.solovan@chnu.edu.ua

ELECTRICAL AND PHOTOELECTRICAL PROPERTIES OF THE SURFACE-BARRIER STRUCTURES MoN/n-Si

Subject and purpose. The subject of research is the electrical and photoelectric properties of the heterojunctions MoN/n-Si were fabricated for the first time by means of the molybdenum nitride thin film deposition (n-type conductivity) by the reactive magnetron sputtering onto single crystal substrates of n-type Si. The purpose of the work is to fabricate of the photosensitivity surface-barrier structures MoN/n-Si, to determine the barrier parameters and dominant mechanisms of current transfer through the obtained heterostructure at direct and reverse biases, investigate the photoelectric properties and causes of losses of photogenerated charge carriers in the obtained heterostructures.

Method and methodology. Measurement of direct and reverse volt-ampere characteristics of the heterostructure of MoN/n-Si were measured at various temperatures, as well as with light intensity $P_{opt} = 80 \text{ mW/cm}^2$ and three lasers $\lambda = 405, 646, 780 \text{ nm}$ with intensity $I_{opt} = 5 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$.

Results. The obtained heterojunctions with height of the potential barrier $\phi_0 = eV_{bi} = 0.37 \text{ eV}$ possessed sharply defined rectifying properties.

The dominating current transport mechanisms through the heterojunctions under investigation were determined: at forward bias is well described within of generation-recombination and tunneling-recombination models with the participation of surface states, and at reverse bias within the tunnel model.

Conclusion. It was established that when illuminating with white light intensity $P_{opt} = 80 \text{ mW/cm}^2$, the reverse current I_{light} increases in size by more than an order of magnitude then reverse current I_{dark} in darkness due to the separation of photogenerated electron-hole pairs, as well as the photosensitivity of this heterostructure to monochromatic illumination by lasers from the wavelength of electromagnetic radiation $\lambda = 405, 646, 780 \text{ nm}$ with intensity $I_{opt} = 5 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$. From the above, we can conclude that the fabrication heterojunctions can be used as a photosensitive device.

Key words: molybdenum nitride, silicon, heterojunction, current transport mechanisms.

М.Н. Солован, П.Д. Мар'янчук

Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича
2, ул. Коцюбинского, Черновцы, 58012, Украина
E-mail: m.solovan@chnu.edu.ua

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУР MoN/n-Si

Предмет и цель работы. Предметом исследований являются электрические и фотоэлектрические свойства гетероструктуры MoN/n-Si, полученной путем напыления тонкой пленки нитрида молибдена (*n*-типа проводимости) методом реактивного магнетронного распыления на монокристаллические пластины кремния *n*-типа проводимости. Целью работы является изготовление фоточувствительных поверхностно-барьерных структур MoN/n-Si, определение барьерных параметров и доминирующих механизмов токопереноса сквозь полученную гетероструктуру при прямом и обратном смещениях, исследование фотоэлектрических свойств и причин потерь фотогенерированных носителей заряда в полученных гетероструктурах.

Метод и методология работы. Измерены прямые и обратные вольт-амперные характеристики (ВАХ) гетероструктуры MoN/n-Si при различных температурах, а также при облучении белым светом интенсивностью $P_{opt} = 80$ мВт/см² и тремя лазерами с $\lambda = 405, 646, 780$ нм интенсивностью $I_{opt} = 5$ мВт·см⁻².

Результаты работы. Полученные гетеропереходы с высотой потенциального барьера $\phi_0 = eV_{bi} = 0,37$ эВ обладают резко выраженными выпрямляющими свойствами.

Определены доминирующие механизмы токопереноса через гетеропереход: при прямом смещении ВАХ хорошо описываются в рамках генерационно-рекомбинационной и туннельно-рекомбинационной моделей с участием поверхностных состояний, а при обратных смещениях – в рамках туннельной модели.

Заключение. Установлено, что при освещении белым светом интенсивностью $P_{opt} = 80$ мВт/см² обратный ток I_{light} возрастает по сравнению с его величиной в темноте I_{dark} более чем на порядок вследствие разделения фотогенерированных электрон-дырочных пар. Показана фоточувствительность данной гетероструктуры к монохроматическому освещению лазерами с длиной волны электромагнитного излучения $\lambda = 405, 646, 780$ нм интенсивностью $I_{opt} = 5$ мВт·см⁻². Полученные результаты позволяют сделать вывод, что изготовленную гетероструктуру можно использовать как фоточувствительный прибор.

Ключевые слова: нитрид молибдена, кремний, гетеропереход, механизмы токопереноса, рекомбинация.