

Механізми струмопереносу в анізотипних гетеропереходах p -NiO/ n -SiC

Г.П. Пархоменко, М.М. Солован, П.Д. Мар'янчук

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

(Одержано 20.11.2017, опубліковано online 29.04.2018)

Виготовлені гетероструктури p -NiO/ n -SiC методом реактивного магнетронного напылення тонких плівок оксиду нікелю на підкладки з кристалів n -SiC. Досліджено їх темнові вольт-амперні характеристики в широкому діапазоні температур. Встановлено, що основними механізмами струмопереносу при прямому зміщенні є генераційно-рекомбінаційний і тунелювання. При зворотних зміщеннях основним механізмом струмопереносу є тунелювання через потенціальний бар'єр за участю енергетичного рівня з глибиною залягання 0.47 еВ.

Ключові слова: Гетероперехід, Механізми струмопереносу, NiO, SiC.

DOI: [10.21272/jnep.10\(2\).02028](https://doi.org/10.21272/jnep.10(2).02028)

PACS number: 72.20. – i

1. ВСТУП

Більшість традиційних інтегральних схем, які використовують кремнієві пристрої, не можуть працювати при температурах вище 250 °С, особливо коли високі робочі температури поєднуються з потужними, високочастотними і високо радіаційними середовищами. Саме тому велика увага була приділена карбїду кремнію (SiC), який в даний час є найбільш дослідженим напівпровідником з широким діапазоном ширини забороненої зони (2,0 еВ $< E \sim 7,0$ еВ) та в якості матеріалу добре підходить для роботи в умовах високих температур та радіації. Карбїд кремнію широко використовують в ядерній енергетиці та космічних дослідженнях. Крім того є великий потенціал для застосування в потужних, високочастотних і радіаційно-стійких пристроях [1-2].

Карбїд кремнію, нітрид алюмінію (AlN), нітрид галію (GaN), нітрид бору (BN), алмаз і селенід цинку (ZnSe) є лише деякими з широкозонних напівпровідників, які в даний час використовуються в вищезазначених пристроях. Проте SiC має ряд переваг в порівнянні з іншими широкозонними напівпровідниками, а саме: комерційну доступність складових, відомі технології обробки.

Існує більше 100 політипів карбїду кремнію, але тільки політипи 4H-SiC та 6H-SiC доступні для використання в серійному виробництві напівпровідникових приладів. У більшості випадків для виготовлення напівпровідникових приладів перевага надається політипу 4H-SiC завдяки більшій рухливості носіїв заряду [3-4].

Інтерес до плівок оксиду нікелю (NiO) зростає завдяки можливості їх застосування в напівпровідникових приладах [5]. Його широко використовують в якості антиферромагнітного шару, електродів для електрохромних пристроїв, прозорих провідних шарів, газових сенсорів. Оксид нікелю є широкозонним напівпровідниковим матеріалом з шириною забороненої зони 3.5-4.0 еВ і має при цьому p -тип провідності [6-8].

Тому метою даної роботи було створення гетероструктур на основі n -SiC і тонких плівок NiO, а також дослідження їх електричних властивостей та

встановлення домінуючих механізмів струмопереносу при прямому і зворотному зміщеннях.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Для створення гетеропереходів використовувалися підкладки карбїду кремнію політипу 4H-SiC n -типу провідності. Значення питомої електропровідності і концентрації носіїв заряду базового матеріалу при кімнатній температурі (295 К) складали $\sigma = 1,4 \times 10^{-2} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ і $n = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ відповідно. Глибина залягання рівня Фермі ($E_c - E_F = 0,28$ еВ) для базового матеріалу визначалася з виразу для концентрації рівноважних електронів: $n = 2(2\pi m_n k T / h^2)^{3/2} \exp(-(E_c - E_F) / kT)$.

Нанесення плівок NiO проводилося на підкладки SiC (типорозміром $5 \times 5 \times 1$ мм) в універсальній вакуумній установці Leybold-Heraeus L560 за допомогою реактивного магнетронного розпилення мішені чистого нікелю в атмосфері суміші аргону і кисню при постійній напрузі.

Перед початком напылення вакуумна камера відкачувалася до залишкового тиску $5 \cdot 10^{-5}$ mbar. Для напылення плівок NiO нікелева мішень (99.99) (шайба діаметром 100 мм і товщиною 1 мм) розміщувалася на столику магнетрону з водяним охолодженням на відстані 7 см від підкладок. Перед процесом напылення використовувалося короткочасне протравлювання бомбардуючими іонами аргону поверхні мішені і підкладок для видалення неконтрольованого забруднення.

Під час напылення у вакуумній камері парціальні тиски газів складали $\sim 4 \cdot 10^{-3}$ mbar для аргону і $\sim 4 \cdot 10^{-3}$ mbar для кисню, при потужності магнетрону ~ 100 Вт. Процес напылення тривав ~ 10 хвилин при температурі підкладок ~ 373 К.

Напылені плівки оксиду нікелю володіли p -типом провідності, а концентрація носіїв заряду і електрична провідність при $T = 295$ К складали: $p = 4,2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ та $\sigma = 0,56 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ відповідно.

Фронтальний електричний контакт до тонкої плівки NiO формувался за допомогою реактивного магнетронного напылення нікелю при температурі підкладки 373 К.

Тиловий омичний контакт до n -SiC був сформова-

ний шляхом нанесення на нього шару Ni методом магнетронного напылення. Дифузію атомів Ni в приповерхневу область SiC проводили шляхом термічного відшарування при температурі ~ 1223 K протягом 10 хв.

Вольт-амперні характеристики досліджуваних гетероструктур вимірювали за стандартною методикою з використанням точного фемтопіко амперметра Keysight B2985A з вбудованим джерелом (± 1000 V), а в якості вольтметра використовували Agilent 34410A

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Прямі гілки вольт-амперної характеристики анізотипного гетеропереходу p -NiO/ n -SiC, виміряні при різних температурах і представлені на рисунку 1.

Екстраполяцією лінійних ділянок вольт-амперних характеристик до перетину з віссю напруг визначено значення висоти потенціального бар'єру ϕ_0 гетеропереходу при різних температурах ($\phi_0 = eV_{bi}$, де V_{bi} – контактна різниця потенціалів) (рис. 1 вставка). Температурна залежність висоти потенціального бар'єру гетероструктури p -NiO/ n -SiC добре описується рівнянням $\phi_0(T) = \phi_0(0) - \beta_\phi T$, де $\beta_\phi = 4.24 \cdot 10^{-3}$ eV K⁻¹ – температурний коефіцієнт висоти потенціального бар'єру, а $\phi_0(0) = 2,43$ eV – значення висоти потенціального бар'єру при абсолютному нулі температури.

Величина послідовного опору гетероструктур була визначена з нахилу вольт-амперних характеристик $R_s \approx 15$ Ом. З нахилу температурної залежності $\ln(R_s) = f(10^3/T)$ можна визначити глибину залягання донорного рівня, який визначає властивості базового матеріалу [9]. Але отримані експериментальні дані вказують на температурну незалежність послідовного опору, що свідчить про виснаження донорного рівня базового матеріалу в досліджуваному інтервалі температур.

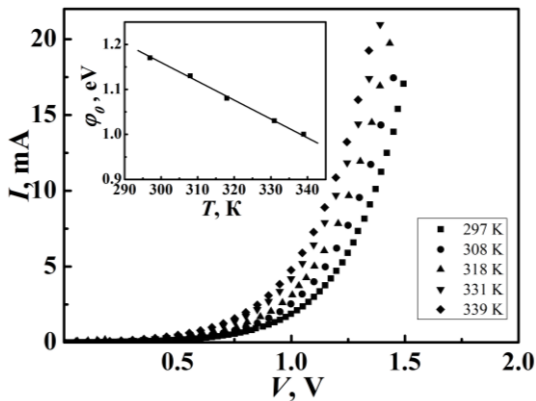


Рис. 1 – Вольт-амперні характеристики гетеропереходу p -NiO/ n -SiC: На вставці – температурна залежність висоти потенціального бар'єру

Для зручності аналізу домінуючих механізмів струмопереносу прямі гілки ВАХ були побудовані у напівлогарифмічних координатах з врахування послідовного і шунтуючого опорів (рис. 2). 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 струмопереносу в досліджуваному інтервалі напруг. Значення коефіцієнта неідеальності

($\Delta \ln(I)/\Delta V = e/nkT$, де n – коефіцієнт неідеальності) для обох ділянок напруг становлять $n \approx 2,5$ ($0 < V < 0,4$ V) і $n \approx 7$ ($0,4 < V < 1$ V).

Однією з умов домінування генераційно-рекомбінаційного механізму струмопереносу в області просторового заряду через глибокі рівні (модель Саа-Нойса-Шоклі [10]) над надбар'єрним струмом через контакт метал-напівпровідник є $\phi_0 > (E_g/2 - \Delta\mu_\phi)$ [11]. У нашому випадку ця умова не виконується оскільки, висота бар'єра дещо менша різниці половини ширини забороненої зони і глибини залягання рівня Фермі ($\phi_0 = 1,17$ eV і $(E_g/2 - \Delta\mu_\phi) = 1,34$ eV).

Цей факт мав би свідчити про домінування надбар'єрного струму через гетероперехід p -NiO/ n -SiC [11]. Однак значення показника неідеальності в інтервалі прямих зміщень $0 < V < 0.4$ V рівне 2.5 і не залежить від температури, що характерно для домінування генераційно-рекомбінаційного механізму струмопереносу.

Експериментально отримане відхилення від вище згаданої умови домінування генераційно-рекомбінаційного механізму $\phi_0 > (E_g/2 - \Delta\mu_\phi)$ може бути викликано тим, що ця умова була сформульована для контактів метал-напівпровідник в рамках моделі Саа-Нойса-Шоклі розробленої на основі р-п-переходу, а не для гетеропереходів з розривами зон та поверхневими станами.

Температурна залежність нахилу прямолінійних ділянок експериментальних залежностей $\ln I - (V - IR_s)/R_{sh} = f(V - IR_s)$ в області напруг $0 < V < 0.4$ V і значення показника неідеальності $n \approx 2.5$ дають можливість припустити, що основний механізм струмопереносу визначається генераційно-рекомбінаційними процесами в області просторового заряду, і струм описується виразом Саа-Нойса-Шоклі [10]:

$$I = I_{gr}^0 \left(\exp \left[\frac{eV}{nkT} \right] - 1 \right) + \left(\frac{V - IR_s}{R_{sh}} \right), \quad (1)$$

де I_{gr}^0 – генераційно-рекомбінаційний струм відсічки при $V = 0$.

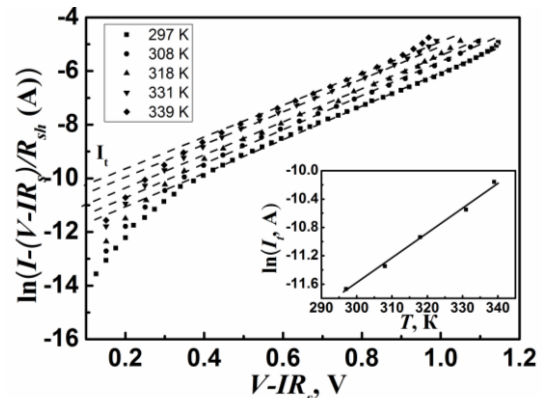


Рис. 2 – Прямі гілки ВАХ гетеропереходу p -NiO/ n -SiC з врахуванням послідовного і шунтуючого опорів. На вставці зображена температурна залежність струму відсічки

В області напруг $V > 0.4$ V нахил прямолінійних ділянок $\Delta \ln(I)/\Delta V$ не залежить від температури. Тому виключається можливість аналізу механізмів струмо-

переносу ґрунтуючись на генераційно-рекомбінаційних процесах в області просторового заряду, адже для цього випадку повинна спостерігатися температурна залежність нахилу прямолінійних ділянок вольт-амперних характеристик в напівлогарифмічному масштабі.

Невеликий постійний нахил (велике значення показника неідеальності $n \approx 7$) експериментальних залежностей $\ln I - (V - IR_s)/R_{sh} = f(V - IR_s)$ при різних температурах можна розглядати як свідчення тунельної природи механізму струмопереносу. 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 [11,12]:

$$I = I_t \exp(\gamma V) + \left(\frac{V - IR_s}{R_{sh}} \right), \quad (2)$$

де $I_t = I_t^0 \exp(\beta T)$ – струм відсічки, γ, β – константи.

З останнього виразу видно, що нахил $\Delta \ln(I)/\Delta V$ прямих гілок ВАХ визначає коефіцієнт γ (вираз (2)), який приймає значення $\sim 5 \text{ eV}^{-1}$.

Екстраполяцією прямолінійних ділянок залежності $\ln I - (V - IR_s)/R_{sh} = f(V - IR_s)$ до перетину з віссю ординат було отримано значення $\ln(I_t)$. Температурна залежність струму відсічки має лінійний характер (вставка рис. 2), що дозволяє визначити коефіцієнти $I_t^0 = 3.86 \cdot 10^{-12} \text{ A}$, $\beta = 5.5 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$.

Аналіз механізмів струмопереносу при зворотних зміщеннях показав, що залежність зворотного струму від напруги добре описується в рамках тунельної моделі струмопереносу.

У випадку різкого гетеропереходу вираз для тунельного струму при зворотному зміщенні має вигляд [13]:

$$I_{rev} \approx a_0 \exp\left(\frac{b_0}{\sqrt{\phi_0(T) - eV}}\right), \quad (5)$$

де a_0 – параметр, який визначає ймовірність заповнення енергетичних рівнів, з яких відбувається тунелювання, b_0 – визначає швидкість зміни струму з напругою. Таким чином апроксимація зворотніх гілок ВАХ прямими лініями в координатах $\ln(I_{rev}) = f(\phi_0 - eV)^{1/2}$

(рис. 3) підтверджує домінування тунельного механізму струмопереносу.

На вставці рисунка 3 представлена залежність параметра a_0 в координатах $\ln a_0 = f(10^3/T)$, з нахилу даної залежності можна визначити глибину залягання енергетичного рівня з якого відбувається тунелювання при зворотному зміщенні [14,15]. Визначена енергія залягання енергетичного рівня складає 0.47 eV .

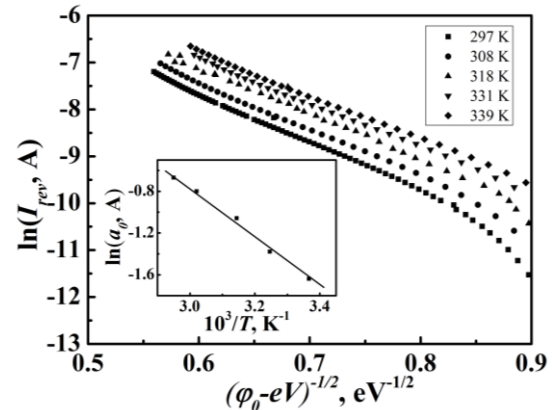


Рис. 3 – Залежності $\ln I_{rev} = f(\phi_0 - eV)^{1/2}$, що характеризують тунельний механізм струмопереносу при зворотному зміщенні. На вставці температурна залежність параметра a_0

4. ВИСНОВОК

Виготовлені гетероструктури $p\text{-NiO}/n\text{-SiC}$ шляхом наплення тонких плівок оксиду нікелю на підкладку карбиду кремнію методом реактивного магнетронного наплення.

Встановлено, що електричний струм через досліджувану гетероструктуру при прямому зміщенні ($3kT/e < V < 0.4 \text{ V}$) формується з допомогою генераційно-рекомбінаційних процесів в області просторового заряду, а при більшому прямому зміщенні ($V > 0.4 \text{ V}$) основним механізмом струмопереносу є тунелювання через область просторового заряду, яке добре описується формулою Ньюмена для тунельного струму.

При зворотних зміщеннях основним механізмом струмопереносу є тунелювання через потенціальний бар'єр за участю енергетичного рівня з глибиною залягання 0.47 eV .

Механизмы токопереноса в анизотипных гетеропереводах $p\text{-NiO}/n\text{-Si}$

Г.П. Пархоменко, М.Н. Солован, П.Д. Марьянчук

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

Изготовлены гетероструктуры $p\text{-NiO}/n\text{-SiC}$ методом реактивного магнетронного напыления тонких пленок оксида никеля на подложки из кристаллов $n\text{-SiC}$. Исследованы их темновые вольт-амперные характеристики в широком диапазоне температур. Установлено, что основными механизмами токопереноса при прямом смещении являются генерационно-рекомбинационный и тунелирование. При обратных смещениях основным механизмом токопереноса является тунелирование через потенциальный барьер с участием энергетического уровня с глубиной залегания 0.47 eV .

Ключевые слова: Гетеропереход, Механизмы токопереноса, NiO, SiC.

Mechanisms of Charge Transport in Anisotype Heterojunctions p -NiO/ n -Si

H.P. Parkhomenko, M.M. Solovan, P.D. Maryanchuk

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

Heterostructure p -NiO/ n -SiC was fabricated by reactive magnetron sputtering thin films nickel oxide on substrates with crystal n -SiC. Studied their the dark current-voltage characteristics in a wide temperature range. It was found that the main charge transport mechanisms when a forward bias is generation-recombination and tunneling. In reverse bias, the main mechanism of current transfer is tunneling through a potential barrier involving an energy level with a depth of 0.47 eV.

Keywords: Heterojunction, Charge transport mechanisms, NiO, SiC.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. M.E. Levinstein, S.L. Rumyantsev, M.S. Shur. *Properties of Advanced Semiconductor Materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe* (John Wiley & Sons: 2001).
2. J. Hornberger, A.B. Lostetter, K.J. Olejniczak, T. McNutt, S.M. Lal, A. Mantooth *Aerospace Conference, 2004. Proceedings. 2004 IEEE 4*, 2538 (2004).
3. R. Cheung, *Silicon carbide microelectromechanical systems for harsh environments*. (World Scientific, 2006).
4. D. Nakamura, I. Gunjishima, S. Yamaguchi, T. Ito, A. Okamoto, H. Kondo, Sh. Onda, K. Takatori, *Nature* **430**, 1009 (2004).
5. M.D Irwin, D.B. Buchholz, A.W. Hains, R.P. Chang, T.J. Marks, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **105**(8), 2783 (2008).
6. Y.M. Lu, W.S. Hwang, J.S. Yang, H.C. Chuang, *Thin Solid Films* **420**, 54 (2002).
7. A.S. Kondrateva, P.G. Bespalova, L.A. Filatov, E.M. Tanklevskaya, S.I. Pavlov, S.E. Alexandrov, *Russ. J. Appl. Chem.* **90**(6), 846 (2017).
8. H.P. Parkhomenko, M.N. Solovan, A.I. Mostovoi, I.G. Orletskii, O.A. Parfenyuk, P.D. Maryanchuk, *Opt. Spectroscop.* **122**(6), 944 (2017).
9. S.M. Sze, K. Kwok. *Physics of semiconductor devices 3rd ed.* (New Jersey: Wiley, 2007).
10. K.R. McIntosh, P.P. Altermatt, G. Heiser, *Proceedings of the 16th european photovoltaic solar energy conference* (pp. 251-254) (2000).
11. V.V. Brus, Z.D. Kovalyk, V.V. Khomyak, V.M. Kaminskiy, *Phys. Chem. Solid State* **13**(3), 798 (2012).
12. B.L. Sharma, R.K. Purohit, *Semiconductor heterojunctions Vol. 5*. (Elsevier: 2015).
13. V.V. Brus, P.D. Maryanchuk, *Appl. Phys. Lett.* **104**(17), 173501 (2014).
14. T. Makin, Y. Segawa, M. Kawasaki, A. Ohtomo, R. Shiroki, T. Tamura, T. Yasuda, H. Koinuma, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 1237 (2001).
15. P.M. Gorley, Z.M. Grushka, V.P. Makhniy, O.G. Grushka, O.A. Chervinsky, P.P. Horley, Yu.V. Vorobiev, J. González-Hernández, *phys. status solidi (c)*, **5**(12), 3622 (2008).