

УДК 621.315.592

*Виготовлені гетероструктури n-TiN/n-Si методом реактивного магнетронного розпилення. Виміряно вольт-амперні характеристики (ВАХ) гетероструктури при різних температурах.*

*Досліджено механізми струмопереносу через гетеропереходи n-TiN/n-Si*

*Ключові слова: гетероперехід, послідовний опір, TiN*

*Изготовлены гетероструктуры n-TiN/n-Si методом реактивного магнетронного распыления. Измерены вольт-амперные характеристики (ВАХ) гетероструктуры при различных температурах.*

*Исследованы механизмы токопереноса сквозь гетеропереходы n-TiN/n-Si*

*Ключевые слова: гетеропереход, последовательное сопротивление, TiN*

# ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ІЗОТИПНИХ ГЕТЕРОСТРУКТУР n-TiN /n-Si

**М.М. Солован**

Аспірант\*

Контактний тел.: 096-821-92-43

E-mail: solovan-86@mail.ru

**П.Д. Мар'янчук**

Доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри

Кафедра електроніки і енергетики\*

Контактний тел.: (03722) 4-68-77

E-mail: p.maryanchuk@chnu.edu.ua

**В.В. Брус**

Аспірант

Чернівецьке відділення

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН

України

вул. Ірини Вільде, 5, м. Чернівці, Україна, 58000

Контактний тел.: (0372) 55-12-32

E-mail: victorbrus@mail.ru

\*Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича

вул. Коцюбинського, 2, Чернівці, Україна, 58012

## 1. Вступ

Нітрид титану (TiN) – знайшов широке практичне застосування завдяки вдалій сукупності фізико-хімічних параметрів: низький питомий опір, досить високій коефіцієнт пропускання у видимій частині спектру, висока твердість, висока зносостійкість, хороша хімічна інертність і стійкість до корозії[1].

Кремній є найпоширенішим напівпровідниковим матеріалом в електроніці. У зв'язку з великими запасами кремнію і досконалістю відпрацьованих технологій є можливим промислове виробництво фотоелектричних приладів на його основі.

Завдяки своїм фізичним властивостям TiN і Si є перспективними матеріалами для застосування в різних фотоелектричних приладах.

## 2. Експериментальна частина

Для виготовлення гетероструктури використовували монокристалічний кремній n-типу провідності. Напилення тонкої плівки n-TiN, проводилося на свіжо поліровану поверхню монокристалічної підкладки n-Si методом реактивного магнетронного розпилення мішені чистого титану в суміші газів аргону та азоту при постійній напрузі.

Парціальні тиски аргону та азоту складають 0,35 Па та 0,7 Па, відповідно, при постійній потужності магнетрона - 120 Вт. Протягом процесу напилення температура підкладки підтримується на

рівні 473 К. Отримані плівки TiN володіли p-типом провідності.

Фронтальний електричний контакт до тонкої плівки нітриду титану формується методом термічного осадження індію при температурі підкладки 150°C. Тиловий омичний контакт до n-Si отримували нанесенням шару Al методом термічного випаровування у високому вакуумі.

Вольт – амперні характеристики гетероструктури TiN/Si вимірювалися за допомогою вимірювального комплексу SOLARTRON SI 1286, SI 1255.

## 3. Результати та їх обговорення

На рис. 1 приведені прямі гілки вольт - амперної характеристики ізотипного гетеропереходу n-TiN/p-Si, виміряні при різних температурах.

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

$$\phi_0(T) = \phi_0(0) - \beta_\phi \cdot T, \tag{1}$$

де  $\beta_\phi = 3.3 \cdot 10^{-3} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$  - температурний коефіцієнт висоти потенціального бар'єру, а  $\phi_0(0) = 2.12 \text{ eV}$  - зна-

чення висоти потенціального бар'єру досліджуваної гетероструктури при абсолютному нулі температури.

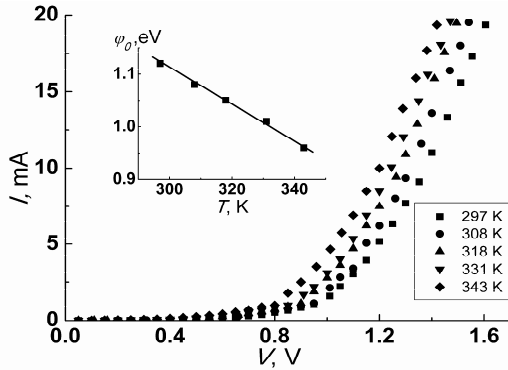


Рис. 1. Прямі гілки ВАХ гетероструктури n-TiN/p-Si. На вставці приведено температурну залежність висоти потенціального бар'єра

Варто зауважити, що великі значення  $\beta_\phi$  і  $\phi_0(0)$ , зумовлені високою концентрацією поверхневих станів (дислокації невідповідності)  $N_{ss}$  на межі розділу гетеропереходу. У першому наближенні  $N_{ss} \sim x^{-2}$  [2, 3], де  $x$  - відстань між дислокаціями невідповідності, визначається з наступного виразу:

$$x = a_{Si} a_{TiN} / (a_{Si} - a_{TiN}). \quad (2)$$

Значення постійної ґратки ( $a_{TiN} = 4.24 \text{ \AA}$ ) [4] і  $a_{Si} = 5.43 \text{ \AA}$  [3], для  $x$  і  $N_{ss}$  отримаємо  $19.3 \text{ \AA}$  і  $2.67 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , відповідно. При такій густині поверхневі стани, можуть відігравати роль центрів захоплення, або рекомбінації і суттєво впливати на електричні властивості гетероструктур [7,8,10].

Величину послідовного опору гетероструктури  $R_s$  можна визначити з нахилу прямої гілки вольтамперної характеристики. Видно, що в області напруг більше висоти потенціального бар'єру криві  $I = f(V)$  переходять з експоненційної залежності в лінійну. Це свідчить про те, що напруга на бар'єрній області гетеропереходу перестає змінюватися, тобто бар'єр практично відкритий, а струм через гетероперехід обмежується його послідовним опором  $R_s$ . Визначене значення  $R_s$  становить 20 Ом.

Відомо, що з нахилу температурної залежності  $\ln(R_s) = f(10^3/T)$  можна визначити глибину залягання робочого донорного рівня, який визначає властивості базового матеріалу. [9, 10]. Але отримані експериментальні дані свідчать про температурної незалежності послідовного опору. Це обумовлено тим, що робочий донорний рівень є виснаженим в інтервалі досліджуваних температур.

Умови проходження струму через гетероперехід n-TiN/p-Si ускладнюються внаслідок відносно високої концентрації поверхневих станів оціненої за формулою (2).

На рис. 2 зображені прямі гілки ВАХ досліджуваного гетеропереходу. Видно, що ВАХ при прямих зміщеннях ( $3kT/e < V, V$ ) добре апроксимуються прямолінійними лініями в напівлогарифмічних координатах, що свідчить про експоненціальну залежність струму від напруги.

Відсутність температурної залежності нахилу ВАХ і вище згадана висока концентрація поверхневих станів на металургійній границі розділу гетеропереходу свідчать про домінування тунельного механізму струмопереносу [5, 6]. ВАХ при прямих зміщеннях ( $3kT/e < V, V$ ) добре описується рівнянням (3):

$$I = I_0 \exp\left(\frac{E}{kT}\right) \exp[\alpha(V_{bi} - V)], \quad (3)$$

де  $E$  - енергія активації,  $\alpha$  - коефіцієнт, який характеризує можливість тунелювання.

Перепишемо вираз (3) в іншій формі:

$$I = I_0 \exp\left(\frac{E}{kT}\right) \exp(\alpha V_{bi}) \exp(-\alpha V) = I_{00} \exp(-\alpha V), \quad (4)$$

де  $I_{00} = I_0 \exp(E/kT) \exp(\alpha V_{bi})$  - струм відсічки. З виразу (4) видно, що нахил  $\Delta \ln(I)/V$  прямих гілок вольт-амперних характеристик зображених на рис. 3 визначає коефіцієнт  $\alpha$ , який приймає значення  $6.5 \text{ eV}^{-1}$ .

Прологарифмувавши вираз струму відсічки отримуємо:

$$\ln I_{00} = \ln I_0 + \frac{E}{kT} + \alpha V_{bi} = \ln A + \alpha V_{bi}, \quad (5)$$

де  $A = I_0 \exp(E/kT)$ . Побудувавши температурну залежність  $\ln(A) = f(10^3/T)$  (вставка рис. 2), визначили коефіцієнти  $I_0$  і  $E$ ,  $9.9 \cdot 10^{-3} \text{ A}$  і  $0.43 \text{ eV}$ , відповідно.

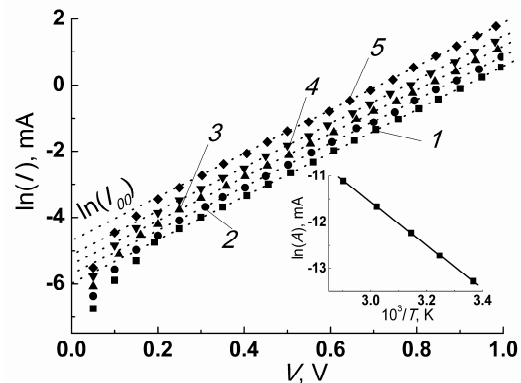


Рис. 2. Прямі гілки ВАХ гетеропереходу у напівлогарифмічному масштабі: 1 – 297 К, 2 – 308 К, 3 – 318 К, 4 – 331 К, 5 – 343 К. На вставці – залежність параметра А з формули (5) від оберненої температури

## 7. Висновки

Виготовлені гетероструктури n-TiN/p-Si методом реактивного магнетронного розпилення.

Виміряно вольт-амперні характеристики (ВАХ) гетероструктури при різних температурах. Досліджено температурну залежність висоти потенціального бар'єра та послідовного опору гетеропереходу.

Встановлено, що домінуючим механізмом струмопереносу через гетеропереходи n-TiN/p-Si при прямому зміщенні є тунелювання через область просторового заряду за участю поверхневих станів.

## Література

1. Gagnon, G. Characterization of reactively evaporated TiN layers for diffusion barrier applications [Текст] / G. Gagnon, J.F. Currie, C. Beique, J.L. Brebner, S.G. Gujrathi, L. Onllet // J. Appl. Phys., 1994, Vol. 75(3), pp. 1565-1570.
2. А. Фаренбрух, Р. Бьюб. Солнечные элементы: Теория и эксперимент (М., Энергоатомиздат, 1987) [Пер. с англ.: A.L. Fahrenbruch, R.H. Bube. Fundamentals of solar cells. Photovoltaic solar energy conversion (New York, 1983).
3. К.Чопра, С. Дас. Тонкопленочные солнечные элементы (М.: Мир, 1986) [Пер. с англ. с сокращениями: K.L. Chopra, S.R. Das, Thin film solar cells (Plenum Press, New York, 1981)].
4. Г. В. Самсонов. Нитриды (М. Наукова думка, 1969) С. 133-158.
5. Б.Л. Шарма, Р.К. Пурухит. Полупроводниковые гетеропереходы (М., Сов. Радио, 1979) [Пер. с англ.: V.L. Sharma, R.K. Purohit. Semiconductor heterojunctions (Pergamon Press, 1974)].
6. Brus V.V. Electrical and photoelectrical properties of photosensitive heterojunctions n-TiO<sub>2</sub>/p-CdTe / V.V. Brus, M.I. Plashchuk, Z.D. Kovalyuk, P.D. Maryanchuk, K.S. Ulyanytskiy // Semiconductor Science and Technology. – 2011. – Vol. 26. – 125006.
7. Брус, В.В. Электрические свойства анизотипных гетеропереходов n-CdZnO/p-CdTe [Текст] / В.В. Брус, М.И. Илашук, В.В. Хомяк, З.Д. Ковалюк, П.Д. Марьянчук, К. С. Ульяницкий // ФТП. – 2012. – Том. 46, Вып. 9. – С. 1175-1180.
8. Brus, V.V. Light-dependent I–V characteristics of TiO<sub>2</sub>/CdTe heterojunction solar cells [Текст] / V.V. Brus, M.I. Plashchuk, Z.D. Kovalyuk, P.D. Maryanchuk // Semicond. Sci. Technol. – 2012. – Vol. 27. – 055008.
9. Solovan, M.N. Electrical and Optical Properties of TiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub>:Fe Thin Films [Текст] / M.N. Solovan, P.D. Maryanchuk, V.V. Brus, O.A. Parfenyuk // Inorganic Materials, 2012, Vol. 48(10), pp. 1026–1032.
10. Брус, В.В. Механизмы токопереноса в анизотипных гетеропереходах n-TiO<sub>2</sub>/p-CdTe [Текст] / В.В. Брус, М.И. Илашук, З.Д. Ковалюк, П.Д. Марьянчук, К.С. Ульяницкий, Б.Н. Грицюк // ФТП. – 2011. – Том. 45, Вып. 8. – С. 1109-1113.

**Abstract**

*Titanium nitride and silicon are promising materials for use in various photoelectric devices due to their physical properties, so the research of the isotype heterojunctions n-TiN/n-Si is of considerable interest.*

*The article studies the electrical properties of the heterojunctions formed by deposition of thin-film TiN of conductivity of n-type on single crystal supports of Si of conductivity of n-type by the method of reactive magnetron sputtering of pure titanium target in mixtures of argon and nitrogen at continuous voltage. The partial pressures of argon and nitrogen are 0.35 Pa and 0.7 Pa, respectively, at constant magnetron power 120 watts.*

*The volt - ampere characteristics of the heterojunction TiN / Si were measured by the measuring complex SOLARTRON SI 1286, SI 1255.*

*There is an analysis of temperature dependence of height of potential barrier and successive resistance of the heterojunction. The concentration of surface states (mismatch dislocations)  $N_{ss}$  at the heterojunctions interface constitutes  $2.67 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ .*

*It was determined that the dominant mechanism of current flow through the heterojunction n-TiN/n-Si at direct bias is well described in the tunnel model*

**Keywords:** heterojunction, series resistance, TiN