

*Виготовлено гетеропереходи  $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$  методом реактивного магнетронного розпилення. Виміряно вольт-амперні характеристики (ВАХ) гетероструктур при різних умовах обробки підкладки. Досліджено механізми струмопереносу через гетеропереходи  $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$*

*Ключові слова: гетероперехід, травлення, полікристал,  $\text{TiO}_2$*

*Изготовлены гетеропереходы  $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$  методом реактивного магнетронного распыления. Измерены вольт-амперные характеристики (ВАХ) гетероструктур при различных условиях обработки подложки. Исследованы механизмы токопереноса через гетеропереходы  $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$*

*Ключевые слова: гетеропереход, травления, поликристалл,  $\text{TiO}_2$*

## ВПЛИВ ОБРОБКИ ПІДКЛАДКИ НА ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГЕТЕРОСТРУКТУР $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$

**А.І. Мостовий**

Аспірант\*

Контактний тел.: 098-770-25-29

E-mail: mostovysya@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

\*Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича  
вул. Коцюбинського, 2, Чернівці, Україна, 58012

**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

### 1. Вступ

Кремній є найпоширенішим напівпровідниковим матеріалом в електроніці та фотовольтаїці. У зв'язку з великими запасами кремнію і повністю відпрацьованої технології можливе промислове виробництво сонячних елементів на його основі. На сьогоднішній день актуальним є використання дешевого полікристалічного кремнію. Відомо, що в даний час виготовляються високоєфективні сонячні елементи з р-п-переходами на основі полікристалічного кремнію [1].

У той же час неухильно зростає інтерес до напівпровідникових гетеропереходів завдяки ряду їх переваг в порівнянні з гомопереходами. Зараз гетеропереходи активно використовуються в електроніці, лазерах, фотовольтаїці [2]. Тому існує значний інтерес до досліджень електричних властивостей гетеропереходів на основі полікристалічного кремнію і широкозонних провідних прозорих оксидів.

В останні роки оксиди металів з напівпровідниковими властивостями, зокрема діоксид титану ( $\text{TiO}_2$ ), досить широко використовуються в різних приладах, особливо в галузі фотоелектричної техніки для різних цілей: прозорі шари (вікна) для сонячних елементів, антивідбиваюче покриття [3-4].

У даній роботі досліджуються електричні властивості анізотипних гетеропереходів  $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$ , отриманих нанесенням тонкоплівкового  $\text{TiO}_2$  на травлені та поліровані полікристалічні підкладки Si. Оскільки

електричні характеристики компонент гетеропереходів та металургійної границі розділу суттєво впливають на ефективність роботи напівпровідникових приладів на основі гетеропереходів, то такі дослідження мають важливе значення для подальшої розробки приладів на основі гетеропереходів  $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$  для електроніки та сонячної енергетики.

### 2. Експериментальна частина

Для підкладок використовували полікристалічний кремній. Кристали були р-типу провідності. Перед використанням кремнієві підкладки піддавалися механічній (шліфування, полірування) та хімічній (травлення) обробці. Для видалення поверхневих забруднень полікристалічні підкладки піддавались хімічному травленню у водному розчині  $\text{HF-HNO}_3$ . Концентрація носіїв заряду при температурі 295 К дорівнює:  $p = 1.19 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ .

Структури виготовляли нанесенням плівок  $\text{TiO}_2$  на підготовлені поверхні пластин Si (типорозміром  $5 \times 5 \times 0,7 \text{ мм}$ ) в універсальній вакуумній установці Leybold - Heraeus L560 за допомогою реактивного магнетронного розпилення мішені чистого титану в атмосфері суміші аргону і кисню при постійній напрузі. Титанова мішень (шайба діаметром 100 мм і товщиною 5 мм) розміщується на столику магнетрона з водяним охолодженням. Підкладки з полікристалічного

кремнію розміщуються над магнетроном з наступним обертанням столика для забезпечення однорідності плівок по товщині. Перед початком процесу наплення вакуумна камера відкачувалась до залишкового тиску  $10^{-4}$  Па [5].

Протягом процесу наплення парціальні тиску у вакуумній камері становили 0.7 Па для аргону і 0.02 Па для кисню. Встановлена потужність магнетрона - 300 Вт. Процес наплення тривав 20 хв при температурі підкладки  $300^{\circ}\text{C}$ .

Фронтальний електричний контакт з тонкою плівкою  $\text{TiO}_2$  формували методом термічного осадження індію при температурі підкладки  $150^{\circ}\text{C}$ . В якості тильного омичного контакту до p-Si використовували шар Al, наплений методом термічного випаровування у високому вакуумі.

Для ініціювання дифузії частини шару Al проводили термічний відпал (при температурі  $500^{\circ}\text{C}$  протягом 20 хв), при цьому утворюється  $\text{p}^+$ -шар, який знижує контактний опір [6].

Вольт-амперні характеристики гетероструктур n- $\text{TiO}_2$ /p-Si вимірювали за допомогою комплексу SOLARTRON SI 1286, SI 1255. Електричні властивості матеріалу досліджували двохзондовим методом на постійному струмі.

### 3. Результати та їх обговорення

ВАХ досліджуваних гетероструктур, виміряні при кімнатній температурі, приведено на рис. 1.

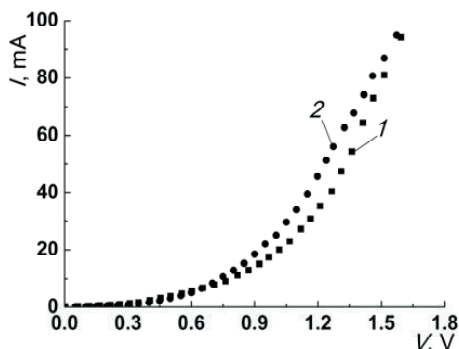


Рис. 1. Залежність ВАХ (I, V) гетероструктур при кімнатній температурі: 1 – полірована кремнієва підкладка, 2 – травлена кремнієва підкладка

Визначено коефіцієнти випрямлення для гетероструктур n- $\text{TiO}_2$ /p-Si при зовнішньому зміщенні 1,5 В, які рівні  $2 \cdot 10^2$  і 30 для полірованої і травленої підкладок, відповідно.

Шляхом екстраполяції лінійних ділянок ВАХ до перетину з віссю напруг V знайдено значення висоти потенціального бар'єру для досліджуваних гетероструктур.

Для гетероструктури n- $\text{TiO}_2$ /p-Si (полірована підкладка) він складає 1,02 eВ, а для гетероструктури n- $\text{TiO}_2$ /p-Si (травлена підкладка) – 0,85 eВ.

На рис. 2 представлена залежність диференціального опору  $R_{\text{dif}}$  від напруги V, на основі якої можна визначити величину послідовного опору гетероструктур  $R_s$ .

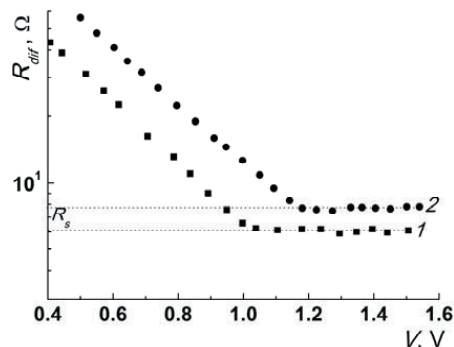


Рис. 2. Залежність диференціального опору  $R_{\text{dif}}$  гетеропереходів n- $\text{TiO}_2$ /p-Si від напруги V при кімнатній температурі: 1 – полірована кремнієва підкладка, 2 – травлена кремнієва підкладка

Видно, що в області напруг більше висоти потенціального бар'єру криві  $R_{\text{dif}}(V)$  виходять на насичення. Це свідчить про те, що напруга на бар'єрній області діода перестає змінюватися, тобто бар'єр практично відкритий, а струм через гетероперехід обмежується його послідовним опором  $R_s$ , який визначається шляхом екстраполяції області насичення до перетину з віссю диференціального опору [7].

Прямі гілки ВАХ досліджуваних гетероструктур у напівлогарифмічному масштабі при кімнатній температурі представлено на рис. 3. Як видно з рисунка, в області прямих зміщень  $V > 3kT/e$  спостерігаються прямолінійні ділянки, що свідчить про експоненційну залежність струму від напруги.

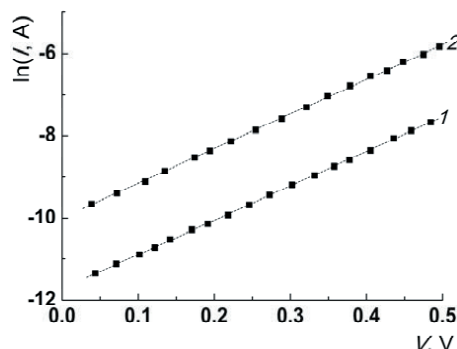


Рис. 3. Прямі гілки ВАХ (I, V) досліджуваних гетероструктур у напівлогарифмічному масштабі ( $3kT/e < V < 0.5$  В): 1 – полірована кремнієва підкладка, 2 – травлена кремнієва підкладка

Враховуючи високу концентрацію дислокацій невідповідності  $N_s$ , можна вважати єдиним механізмом струмопереносу багатоступінчасті тунельно-рекомбінаційні процеси за участю поверхневих станів на межі поділу  $\text{TiO}_2$ /Si [7]. Струм при прямому зміщенні визначається наступним виразом [6]:

$$I = B \exp(-\alpha(\phi_0(T) - eV)), \tag{1}$$

де B - величина, яка слабо залежить від температури і напруги,  $\phi_0$  - висота потенціального бар'єру. Перепишемо вираз (1) в іншому вигляді:

$$I = B \exp(-\alpha\phi_0(T)) \exp(\alpha eV) = I_0 \exp(\alpha eV), \tag{2}$$

де  $I_0 = \text{Вехр}(-\alpha\phi_0(T))$  – струм відсічки, який не залежить від прикладеної напруги. З виразу (2) випливає, що нахил  $\Delta \ln(I)/\Delta V$  початкових ділянок прямих гілок вольт-амперних характеристик (рис. 3) визначає коефіцієнт  $\alpha$ , який приймає значення  $7.3 \text{ eV}^{-1}$  для полірованої підкладки і  $7.35 \text{ eV}^{-1}$  для травленої підкладки, відповідно.

В області напруг  $V > 0.6 \text{ В}$  (рис. 4) залежність  $I(V)$  добре описується формулою Ньюмена для тунельного струму [6]:

$$I = I_t^0 \exp(\beta T) \exp(\alpha V) = I_t \exp(\alpha V), \quad (3)$$

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

З рис. 4 видно, що нахил  $\Delta \ln(I)/\Delta V$  початкових ділянок прямих гілок ВАХ визначає коефіцієнт  $\alpha$  (вираз (3)), який приймає значення  $2.9 \text{ eV}^{-1}$  (полірована підкладка) і  $2.95 \text{ eV}^{-1}$  (травлена підкладка).

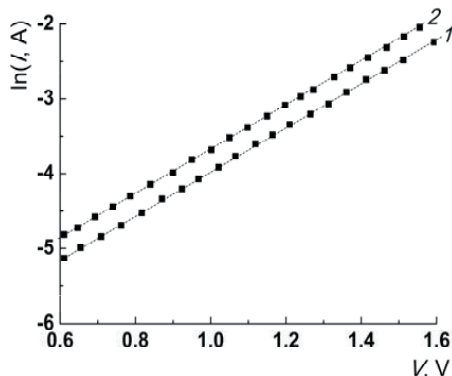


Рис. 4. Прямі гілки ВАХ ( $I, V$ ) гетеропереходів у напівлогарифмічних координатах ( $V > 0.6 \text{ В}$ ): 1 – полірована кремнієва підкладка, 2 – травлена кремнієва підкладка

Як видно з рис. 5 зворотний струм через досліджувані гетеропереходи  $I_{\text{rev}} \sim \exp[(\phi_0 - eV)^{-1/2}]$ , що свідчить

про домінування тунельного механізму струмопереносу при прикладанні зовнішньої напруги у зворотному напрямку [8].

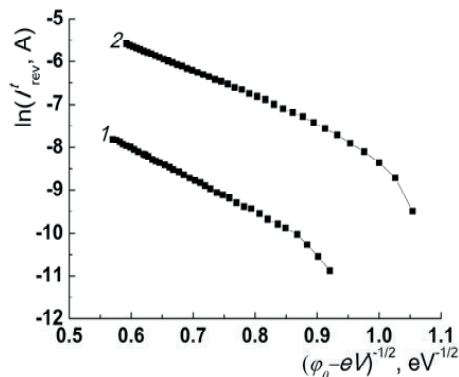


Рис.5. Залежність  $\ln(I_{\text{rev}})$  від  $(\phi_0 - eV)^{-1/2}$ : 1 – полірована кремнієва підкладка; 2 – травлена кремнієва підкладка

#### 4. Висновки

Досліджено вплив умов обробки підкладки на електричні властивості анізотипних гетеропереходів  $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$ , отриманих нанесенням тонко плівкового  $\text{TiO}_2$  на полікристалічні кремнієві підкладки.

Встановлено домінуючі механізми струмопереносу для досліджуваних гетеропереходів при прямому і зворотному зміщеннях.

Для  $3kT/e < V < 0.5 \text{ В}$  основним механізмом струмопереносу є багатоступінчасті тунельно-рекомбінаційні процеси за участю поверхневих станів на межі поділу  $\text{TiO}_2/\text{Si}$ , для  $V > 0.6 \text{ В}$  – тунелювання, яке описується формулою Ньюмена. При зворотному зміщенні головним механізмом переносу носіїв заряду через гетеропереходи є тунелювання крізь потенціальний бар'єр.

#### Література

1. Razykov T.M. Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects / T.M. Razykov, C.S. Ferekides, D. Morel, E. Stefanakos, H.S. Ullal, H.M. Upadhyaya // Solar Energy. – 2011. – №85. – С. 1580-1608.
2. Алферов, Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур [Текст] / Ж.И. Алферов // ФТП. – 1998. – Т. 32, №1. – С. 3-18.
3. Brus, V.V. Electrical and photoelectrical properties of photosensitive heterojunctions  $n\text{-TiO}_2/p\text{-CdTe}$  [Текст] / V.V. Brus, M.I. Pashchuk, Z.D. Kovalyuk, P.D. Maryanchuk, K.S. Ulyanytskiy // Semiconductor Science and Technology. – 2011. – Vol. 26. – 125006.
4. Barrera, M. Antireflecting-passivating dielectric films on crystalline silicon solar cells for space applications [Текст] / M. Barrera, J. Plá, C. Bocchi, A. Migliori // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2008. – Vol. 92(9). – Pages 1115-1122.
5. Брус, В.В. Механизмы токопереноса в анизотипных гетеропереходах  $n\text{-TiO}_2/p\text{-CdTe}$  [Текст] / В.В. Брус, М.И. Илащук, З.Д. Ковалюк, П.Д. Марьянчук, К.С. Ульяницкий, Б.Н. Грицюк // ФТП. – 2011. – Т. 45, №8. – С. 1109-1113.
6. Фаренбрух, А. Солнечные элементы: Теория и эксперимент [Текст] / А. Фаренбрух, Р. Бьюб. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
7. Мостовой, А.И. Механизмы токопереноса в анизотипных гетероструктурах  $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$  [Текст] / А.И. Мостовой, В.В. Брус, П.Д. Марьянчук // ФТП. – 2012, в печати.
8. Sharma B.L. Semiconductor Heterojunctions [Текст] / B.L. Sharma, R.K. Purohit. – New York: Pergamon, 1974. – p. 216.

#### Abstract

Recently, metal oxides with semiconducting properties, such as titanium dioxide ( $\text{TiO}_2$ ), have been widely used in various devices, especially in the photoelectric technology for various purposes. At the same time, the interest to the semiconductor heterojunctions is steadily growing due to their advantages in comparison with homojunctions. Nowadays the heterojunctions are widely used in electronics, lasers and photogalvanization.

The article studies the electrical properties of the anisotype heterojunctions  $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$  obtained by applying thin-film  $\text{TiO}_2$  on the etched and polished polycrystalline Si supports. Since the electrical characteristics of the components of the heterojunctions and metallurgical boundary affect significantly the performance of the semiconductor devices based on the heterojunctions, such studies are important for the further development of the devices based on the heterojunctions  $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$  for electronics and solar energy.

The dependence of the height of the potential barrier and the subsequent resistance on the method of processing of the silicon supports was studied. It was determined that the tunneling is a dominant mechanism of current transport through the heterostructures under different conditions of the Si surface processing

**Keywords:** heterojunction, etching, polycrystal,  $\text{TiO}_2$

Експериментально показано, що час досягнення стаціонарних значень контактної різниці потенціалів і роботи виходу електрона після обробки поверхні Si-пластин у кислотно-пероксидних розчинах менші, ніж в амоніачно-пероксидних. Отримані результати трактуються утворенням на поверхні Si відповідно оксидної плівки і гідроксидного шару, що під час анодування призводить до формування макропоруватого і мікро- чи мезопоруватого шару кремнію

Ключові слова: поруватий кремній, фінішна хімічна обробка, контактна різниця потенціалів, кремнієві пластини

Експериментально показано, что время достижения стационарных значений контактной разности потенциалов и работы выхода электрона после обработки поверхности Si-пластин в кислотно-пероксидных растворах меньше, чем в аммонийно-пероксидных. Полученные результаты трактуются образованием на поверхности Si соответственно оксидной пленки и гидроксидного слоя, что при анодировании приводит к формированию макропористого и микроили мезопористого слоя кремния

Ключевые слова: пористый кремний, финишная химическая обработка, контактная разность потенциалов, кремниевые пластини

УДК 544.653.22:538.975

## ДОСЛІДЖЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ Si- ПЛАСТИН ПЕРЕД ФОРМУВАННЯМ ПОРУВАТОГО ШАРУ

**М. М. Воробець**

Кандидат хімічних наук, асистент

Кафедра аналітичної хімії

Чернівецький національний університет

ім. Ю. Федьковича

вул. Коцюбинського 2, м. Чернівці, Україна,

58012

Контактний тел.: (0372) 58-48-97

E-mail: m.vorobets@chnu.edu.ua

### 1. Вступ

Базовим матеріалом в електронній техніці для створення люмінесцентних пристроїв, структурних елементів сонячних батарей, поверхнево чутливих сенсорів для потреб екології, медицини, біології є поверхнево-модифікований кремній. Важливий момент у технології формування поруватого кремнію – питання однорідності поверхні Si-пластин і стабільності її електронних властивостей.

Відомо [1], що після фізичного чи хімічного впливу на Si-поверхню її електронний стан, а, отже, і елек-

трофізичні параметри змінюються протягом певного часу. Тому, для вибору оптимальних умов міжопераційного зберігання Si-пластин, зокрема перед формуванням поруватого шару, необхідно контролювати тривалість релаксаційних явищ, які відбуваються на поверхні.

Метою роботи було дослідження впливу способу фінішної хімічної обробки Si-пластин у кислотно-пероксидних та амоніачно-пероксидних розчинах на часову стабільність електронного стану поверхні перед формуванням наноструктурованих і поруватих шарів кремнію.