

---

# ФІЗИЧНІ, ХІМІЧНІ ТА ІНШІ ЯВИЩА, НА ОСНОВІ ЯКИХ МОЖУТЬ БУТИ СТВОРЕНІ СЕНСОРИ

---

## PHYSICAL, CHEMICAL AND OTHER PHENOMENA, AS THE BASES OF SENSORS

---

---

УДК.621.315.592

DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2018.2.136882>

### ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ, ЩО ЗУМОВЛЮЮТЬ ПОВЕДІНКУ СТРУМУ В ГЕТЕРОПЕРЕХОДАХ $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$ , СТВОРЕНИХ ВЧ МАГНЕТРОННИМ РОЗПИЛЕННЯМ

*В. В. Хомяк*

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича  
вул. Коцюбинського 2, v.khomyak@chnu.edu.ua

### ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ, ЩО ЗУМОВЛЮЮТЬ ПОВЕДІНКУ СТРУМУ В ГЕТЕРОПЕРЕХОДАХ $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$ , СТВОРЕНИХ ВЧ МАГНЕТРОННИМ РОЗПИЛЕННЯМ

*В. В. Хомяк*

**Анотація.** Нанесенням тонких плівок ZnO на p-Si підкладки методом реактивного високочастотного магнетронного розпилювання при різних температурах вирощування і співвідношеннях парціальних тисків кисню та аргону створено гетероструктури  $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$ . Регулювання кількості кисню в період зростання дає можливість контролювано керувати фізичними властивостями тонких плівок ZnO, включаючи і гетеропереходи  $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$ . Вольт-амперні характеристики створених структур володіли чітко вираженими випрямляючими властивостями. Для з'ясування фізичних процесів, що зумовлюють поведінку струму при прямому і зворотному зміщеннях, побудовано та проведено аналіз зонних енергетичних діаграм, створених електричних переходів.

**Ключові слова:** гетероструктури  $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$ , вольт-амперні характеристики, механізми струмопереносу, тунелювання

## PHYSICAL PROCESSES THAT DETERMINE THE BEHAVIOR OF CURRENT IN *n*-ZnO/*p*-Si HETEROJUNCTIONS CREATED BY RF MAGNETRON SPUTTERING

V. V. Khomyak

**Abstract.** By setting down of ZnO thin films onto *p*-Si substrates by reactive high-frequency magnetron sputtering method at different growth temperatures and ratios of oxygen and argon partial pressures *n*-ZnO/*p*-Si heterostructures have been obtained. Adjustment of the oxygen amount during growth enables to control the physical properties of ZnO thin films as well as *n*-ZnO/*p*-Si heterojunctions. Current-voltage characteristics of these structures had distinct rectifying properties. To find out the physical processes that determine the behavior of current at forward and reverse bias the energy band diagrams of created electrical junctions have been built and analyzed.

**Keywords:** *n*-ZnO/*p*-Si heterostructures, current-voltage characteristics, current-transport mechanisms, tunneling

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ПОВЕДЕНИЕ ТОКА В ГЕТЕРОПЕРЕХОДАХ *n*-ZnO/*p*-Si, СОЗДАНЫХ ВЧ МАГНЕТРОННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ

В. В. Хомяк

**Аннотация.** Нанесением тонких пленок ZnO на *p*-Si подложки методом реактивного высокочастотного магнетронного распыления при различных температурах выращивания и соотношениях парциальных давлений кислорода и аргона созданы гетероструктуры *n*-ZnO/*p*-Si. Регулирование количества кислорода в период роста дает возможность контролируемо управлять физическими свойствами тонких пленок ZnO, включая и гетеропереходы *n*-ZnO/*p*-Si. Вольт-амперные характеристики созданных структур обладали четко выраженными выпрямляющими свойствами. Для выяснения физических процессов, обуславливающих поведение тока при прямом и обратном смещениях построено и проведен анализ зонных энергетических диаграмм, созданных электрических переходов.

**Ключевые слова:** гетероструктуры *n*-ZnO/*p*-Si, вольт-амперные характеристики, механизмы токопереноса, тунелирование

### Вступ

Одними із перспективних, економічно ефективних та гнучких технологій, поєднаних з кремнієвою, є створення тонкоплівкових випрямляючих структур, фотодіодів, ультрафіолетових випромінювачів і сонячних елементів на основі гетеропереходів *n*-ZnO/*p*-Si [1-7]. Більшість робіт, як правило, присвячено дослідженню структур *n*-ZnO/*p*-Si як світловопромінювачів та фотодіодів [1-4].

В багатьох роботах показано, що температура і матеріал підкладки, а також проведення легування та післяростового відпалу сильно впливають на структурні й фізичні властивості тонких плівок ZnO, включаючи і створювані гетеропереходи *n*-ZnO/*p*-Si [1,2,7-12]. Зокрема відомо що, властивості вирощених плівок багато в чому визначаються температурою вирощування, а також концентрацією вільних носіїв, контрольованих кисневими вакансіями [8,13]. Отже регулювання кількості кисню в

період зростання або зміна температури росту чи проведення післяростового відпалу може слугувати важливим фактором контрольованого керування фізичними властивостями як ZnO, так і створюваних структур  $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$  [8,9,12-17].

Широко використовуваним в даний час методом формування тонких плівок ZnO є реактивне магнетронне розпилення [8,9,18,19]. Метод дозволяє в широких діапазонах варіювати умови осадження, що визначають електрофізичні та структурні властивості плівок, що наносяться. Однак, незважаючи на велику кількість робіт, взаємозв'язок між умовами осадження тонких плівок ZnO та електричними властивостями гетеропереходів  $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$  є ще на сьогодні не цілком зрозумілим і навіть дискусійним, що спричинено складним характером механізмів переносу носіїв через межу розділу. Тому, не втрачає актуальності створення випрямляючих структур  $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$ , при різних технологічних умовах, з метою оптимізації і поліпшення їх електричних параметрів.

Метою даної роботи є створення гетероструктур  $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$  методом реактивного ВЧ магнетронного розпилювання, при різних умовах осадження ZnO, та з'ясування фізичних процесів, що зумовлюють поведінку струму в цих структурах, на основі аналізу побудованих зонних енергетичних діаграм.

## Експеримент

Нанесення тонких плівок ZnO проводили на  $s\text{-Al}_2\text{O}_3$ , сіталові та  $p\text{-Si}$  (100), леговані бором ( $p \sim 3,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $\rho \sim 10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ) підкладки (типорозміром  $5 \times 5 \times 0,3 \text{ мм}$ ), на промисловій установці ВУП-5 М методом реактивного ВЧ магнетронного розпилювання з частотою ВЧ-генерації 13,56 МГц. Розпилення проводилося при двох фіксованих температурах підкладок ( $T_s$ ) – кімнатній (КТ) і  $350^\circ\text{C}$  та при співвідношеннях парціальних тисків високоочищеного кисню і аргону  $P_{\text{O}_2}/P_{\text{Ar}} = 1,0$  і  $2,0$ . Для розпилення використовували мішень, виготовлену у вигляді диска діаметром 40 мм із цинку класу чистоти (6N). Питомий опір і концентрація електронів плівок ZnO вимірювалися при кімнатній температурі компенсаційним методом

на постійному струмі, а також з допомогою чотиризондового методу. Омичні електричні контакти до плівок ZnO для холлівських вимірювань, а також фронтальні та тильові контакти до гетеропереходів створювалися методом термічного осадження алюмінію при  $100^\circ\text{C}$ . Вольт-амперні характеристики (ВАХ) гетероструктур  $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$  досліджувалися при кімнатній температурі.

## Результати і обговорення

Спектри дифракції рентгенівських променів вказали, що всі плівки були полікристалічними високотекстурованими з переважаючою кристалографічною орієнтацією в площині (002) уздовж  $c$ -осі, перпендикулярної до поверхні підкладки.

Виміряні концентрації електронів ( $n$ ) та питомий опір ( $\rho$ ) плівок ZnO, вирощених при різних температурах підкладки  $T_s$  та при різних процентних співвідношеннях парціальних тисків кисню і аргону в робочій камері сильно залежать як від  $T_s$ , так і співвідношення  $P_{\text{O}_2}/P_{\text{Ar}}$ .

Гетеропереходи  $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$  були створені за схемою наведеною на рис. 1.

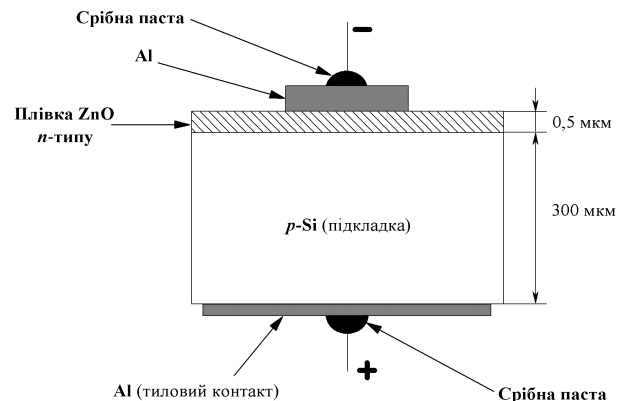


Рис. 1. Схема створення гетеропереходів  $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$ .

Якість алюмінієвих контактів до ZnO перевіряли з допомогою вимірювання ВАХ в інтервалі напруг  $-0,3 \text{ В} < U < 0,3 \text{ В}$  при кімнатній температурі. Залежності  $I(U)$  контактів були лінійними (вставка на рис. 2), що вказує на їх омичність.

Створені гетеропереходи  $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$  з плівками ZnO, вирощеними при різних темпера-

турах та співвідношеннях парціальних тисків кисню та аргону  $P_{O_2}/P_{Ar}$ , володіли чітко вираженими випрямляючими властивостями.

Типові ВАХ структур, створених при  $T_s = \text{КТ}$  і  $350^\circ\text{C}$  і різних співвідношеннях парціальних тисків кисню та аргону  $P_{O_2}/P_{Ar} = 1,0$  і  $2,0$  при прямому і зворотному зміщеннях в напівлогарифмічному масштабі, наведені на рис. 2. В табл.1 наведені визначені нами значення концентрації електронів і оптичної ширини забороненої  $E_g$  плівок ZnO, вирощених при цих технологічних умовах.

Діодні коефіцієнти випрямлення, визначені як відношення величин прямих струмів до зворотних струмів при напругах 5 В і -5 В відповідно, знаходились в межах від  $3,4 \times 10^4$  до  $6,2 \times 10^4$ .

[20,21], для пояснення поведінки струму при прямому і зворотному зміщеннях в отриманих структурах  $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$ . Зазначимо, що структури створювалися нанесенням плівок ZnO на  $p\text{-Si}$  при  $T_s = \text{КТ}$  і  $350^\circ\text{C}$  і  $P_{O_2}/P_{Ar} = 1,0$  і  $2,0$ , тобто з низькими концентраціями носіїв в шарах ZnO (відповідно ( $n \sim 8,1 \cdot 10^{16}$ ;  $3,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  і  $n \sim 4,2 \cdot 10^{15}$ ;  $6,0 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , табл. 1). Подібні зонні діаграми для  $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$  гетеропереходу були запропоновані також в роботах [2,6,10]. Для їх побудови використані такі енергетичні параметри напівпровідників: значення ширини забороненої зони  $E_g(\text{Si}) = 1,12 \text{ eV}$  [21] і  $E_g(\text{ZnO})$ , розраховані нами за спектрами поглинання, спорідненість до електрона  $\chi(\text{Si}) = 4,05 \text{ eV}$  і

Таблиця 1.

Параметри плівок ZnO, вирощених реактивним ВЧ магнетронним розпилюванням

Зразок	Температура підкладки $T_s$ , $^\circ\text{C}$	Співвідношення $P_{O_2}/P_{Ar}$	Концентрація електронів, $\text{см}^{-3}$	Ширина забороненої зони $E_g$ , eV
1	КТ	1,0	$8,1 \cdot 10^{16}$	3,31
2	350	1,0	$4,2 \cdot 10^{15}$	3,30
3	КТ	2,0	$3,3 \cdot 10^{16}$	3,31
4	350	2,0	$6,0 \cdot 10^{14}$	3,30

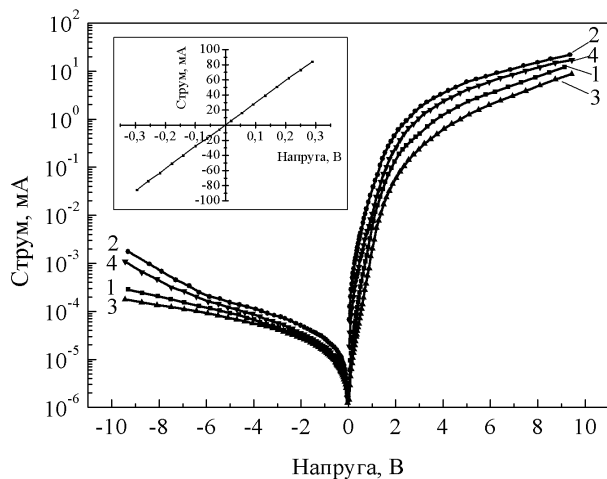


Рис. 2. ВАХ гетеропереходів  $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$  при прямому і зворотному зміщеннях в напівлогарифмічному масштабі, створених при різних температурах  $T_s$  і співвідношеннях парціальних тисків кисню та аргону  $P_{O_2}/P_{Ar}$  (нумерація зразків відповідно до табл. 1). На вставці наведена ВАХ Al/ZnO контакту.

На рис. 3 наведені зонні енергетичні діаграми, з використанням моделі Андерсона

$\chi(\text{ZnO}) = 4,35 \text{ eV}$  [2,10]. Абсолютні значення розривів дозволених енергетичних зон визначалися згідно співвідношень:

$$\Delta E_c = \chi(\text{ZnO}) - \chi(\text{Si}), \quad (1)$$

$$\Delta E_v = E_v(\text{ZnO}) - E_v(\text{Si}) = [\chi(\text{ZnO}) + E_g(\text{ZnO})] - [\chi(\text{Si}) + E_g(\text{Si})] = E_g(\text{ZnO}) - E_g(\text{Si}) + \Delta E_c. \quad (2)$$

Величина розриву зони провідності  $\Delta E_c = 0,3 \text{ eV}$ , а величина розриву валентної зони  $\Delta E_v$  – змінюється від 2,54 до 2,48 eV зі зміною парціального тиску кисню через зміну  $E_g(\text{ZnO})$ . Обидва розриви зон  $\Delta E_v$  і  $\Delta E_c$  з'являються через різницю в електронній спорідненості і значенні ширини забороненої зони двох матеріалів, що утворюють перехід. Треба зазначити, що розрив валентної зони ( $\Delta E_v$ ) значно перевищує розрив зони провідності ( $\Delta E_c$ ).

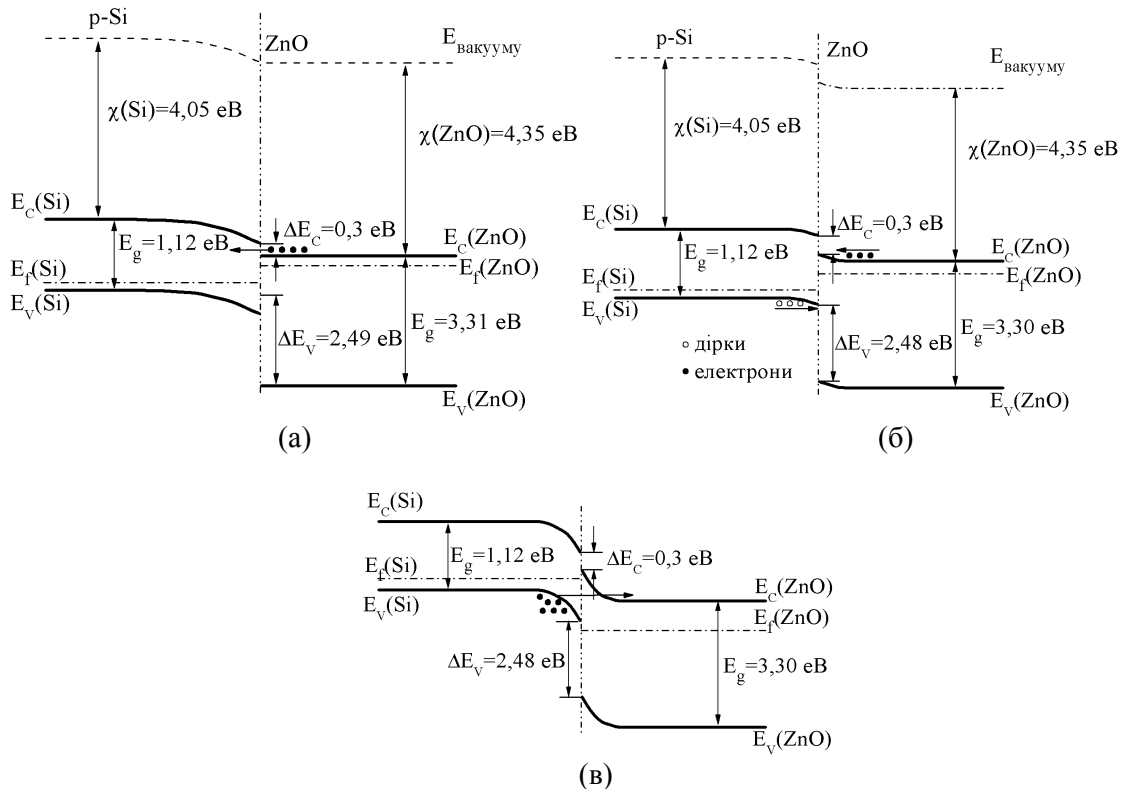


Рис. 3. Зонні енергетичні діаграми гетеропереходів  $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$  з плівками ZnO, вирощеними при  $T_s = \text{KT}$  і  $350^\circ\text{C}$  з низькими концентраціями носіїв: (а) і (б) – пряме зміщення,  $T_s = \text{KT}$  і  $350^\circ\text{C}$  відповідно; (в) – зворотне зміщення,  $T_s = 350^\circ\text{C}$ .

Для гетеропереходів 1 і 3, створених при  $\text{KT}$ , концентрація носіїв заряду в плівках ZnO ( $\sim 8,1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  і  $\sim 3,3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ) приблизно в 30 – 10 разів більша відповідно ніж в Si (див. табл. 1) і майже вся збіднена область знаходиться з боку Si. Отже, при прямому зміщенні, тунельно-рекомбінаційний струм формується в основному тунелюванням електронів з боку ZnO в сторону Si, як показано на рис. 3 (а). Для структур 2 і 4 з плівками ZnO, вирощеними при  $T_s = 350^\circ\text{C}$ , тобто з більш низькими концентраціями носіїв ( $\sim 4,2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  і  $\sim 6,0 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ), збіднена область знаходиться по обидва боки переходу, тобто як з боку Si, так і з боку ZnO. Тунельно-рекомбінаційний струм складаються з тунелювання електронів і дірок, як показано на рис. 3 (б).

Зворотний струм всіх гетеропереходів, створених при  $\text{KT}$ , трохи менший ніж створених при  $350^\circ\text{C}$  (рис. 1). Це пояснюється тим, що тим більша частина вбудованої або зовнішньої напруги спадає на збідненій області ZnO з більш низькою концентрацією носіїв

(див. табл.1). При значному зворотному зміщенні дно зони провідності ZnO опускається навіть нижче ніж вершина валентної зони Si (рис. 3 (в)). У цьому випадку, велика кількість електронів може тунелювати в середину зони провідності ZnO, як показано на рис. 3 (в), і єдиним джерелом інжекції електронів з боку  $p\text{-Si}$  в  $n\text{-ZnO}$  є тунелювання і струми, обмежені просторовим зарядом. Із проведених досліджень випливає, що електричні характеристики гетеропереходів  $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$  є доволі складними. Вони залежить, в першу чергу, від концентрації носіїв, щільності дефектів в обох шарах матеріалів і структури енергетичних зон гетеропереходу. Це вказує на необхідність проведення ретельного підбору параметрів осадження плівок ZnO для поліпшення характеристик гетеропереходів  $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$ .

## Висновок

Створено гетеропереходи  $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$  з плівками ZnO, вирощеними при різних тех-

нологічних умовах, та досліджені їх електричні властивості. Всі структури володіли чітко вираженими випрямляючими властивостями. Діодні коефіцієнти випрямлення, визначені при напругах 5 В і -5 В, знаходились в межах від  $3,4 \times 10^4$  до  $6,2 \times 10^4$ .

Побудовано енергетичні діаграми *n-ZnO/p-Si* і показано, що основні механізми переносу заряду через поверхнево-бар'єрні структури *n-ZnO/p-Si* при прямих зміщеннях добре описуються в рамках моделей тунельно-рекомбінаційних струмів. Тунельно-рекомбінаційний струм формується в основному тунелюванням електронів з боку ZnO в сторону Si, при більш високих концентраціях електронів в ZnO ( $\sim 8,1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  і  $\sim 3,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ). Для структур з плівками ZnO, вирощеними з більш низькими концентраціями носіїв ( $\sim 4,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  і  $\sim 6,0 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ), збіднена область знаходиться по обидва боки переходу, тобто як з боку Si, так і з боку ZnO. Тунельно-рекомбінаційний струм складаються з тунелювання електронів з ZnO і дірок з Si.

При значних зворотних зміщеннях джерелом інжекції електронів з боку *p-Si* в *n-ZnO* є тунелювання і струми, обмежені просторовим зарядом.

### Список використаної літератури

- [1]. Y. W. Zhang, X. M. Li, W. D. Yu, X. D. GaO, Y. F. Gu, C. Yang, J. L. Zhao, X. W. Sun, S. T. Tan, J. F. Kong, and W. Z. Shen. Epitaxial growth and luminescence properties of ZnO – based heterojunction light-emitting diode on Si (111) substrate by pulsed laser deposition // J. Phys. D: Appl. Phys., 41, p. 205105 (2008).
- [2]. J. D. Ye, S. L. Gu, S. M. Zhu, W. Liu, S. M. Liu, R. Zhang, Y. Shi, Y. D. Zheng. Electroluminescent and transport mechanisms of *n-ZnO/p-Si* heterojunctions // Appl. Phys. Lett., 88, pp. 182112-(1-3) (2006).
- [3]. J. Y. Lee, Y. S. Choi, W. H. Choi, H. W. Yeom, Y. K. Yoon, J. H. Kim, S. Im. Characterization of films and interfaces in *n-ZnO/p-Si* photodiodes // Thin Solid Films, 420 – 421, pp. 112 – 116 (2002).
- [4]. Y. S. Choi, J. Y. Lee, S. Im. Photoresponse characteristics of *n-ZnO/p-Si* heterojunction photodiodes // J. Vac. Sci. Technol. B, 20, pp. 2384 – 2387 (2002).
- [5]. Baik D. G., Cho S. M., Application of sol-gel derived films for ZnO/*n-Si* junction solar cells // Thin Solid Films, 354, pp. 227–231 (1999).
- [6]. R. S. Ajimsha, M. K. Jayaraj, and L. M. Kukreja. Electrical characteristics of *n-ZnO/p-Si* heterojunction diodes grown by pulsed laser deposition at different oxygen pressures // J. Elektron. Mater., 37(5), pp. 770 – 775 (2008).
- [7]. S-H. Jeong, B-S. Kim, B-T. Lee. Photoluminescence dependence of ZnO films grown on Si (100) by radio-frequency magnetron sputtering on the growth ambient // Appl. Phys. Lett., 82(16), pp. 2625 – 2627 (2003).
- [8]. V. V. Khomyak, M. M. Slyotov, I. I. Shteplyuk, G. V. Lashkarev, O. M. Slyotov, P. D. Marianchuk, V. V. Kosolovskiy. Annealing effect on the near-band edge emission of ZnO // J. Phys. Chem. Sol., 74 pp. 291-297 (2013).
- [9]. V. Khomyak, M. Slyotov, I. Shteplyuk, O. Slyotov, V. Kosolovskiy. Effect of Se Isoelectronic Impurity on the Luminescence Features of the ZnO // Acta Physica Polonica A, 122(6), pp. 1039 – 1041 (2012).
- [10]. P. L. Chen, X. Y. Ma, and D. R. Yang. Ultraviolet electroluminescence from ZnO/*p-Si* heterojunctions // J. Appl. Phys., 101, pp. 053103-(1-4) (2007).
- [11]. J. W. Sun, Y. M. Lu, Y. C. Liu, D. Z. Shen, Z. Z. Zhang, B. H. Li, J. Y. Zhang, B. Yao, D. X. Zhao, and X. W. Fan. Excitonic electroluminescence from ZnO-based heterojunction light emitting diodes // J. Phys. D: Appl. Phys., 41, pp. 155103-(1-5) 2008.
- [12]. T. Yen, D. Strome, C. J. Kim, A. N. Cartwright and W. A. Anderson. Annealing studies on zinc oxide thin films deposited by magnetron sputtering // J. Elektron. Mater., 37(5), pp. 764–769 (2008).
- [13]. K. Ellmer, A. Klein, B. Rech. Transparent conductive zinc oxide: Basics and applications in thin film solar cells. – Springer, 445 p. (2008).
- [14]. Ü. Özgür, Ja. I. Alilov, C. Lin, A. Teke, M. A. Reshchikov, S. Dogan, V. Avrutin, S. -J. Cho, H. Morkoe. A comprehensive review of ZnO materials and devices // J. Appl. Phys., 98, pp. 041301-(1-103) (2005).
- [15]. F. K. Shan, G. X. Liu, W. J. Lee, B. C. Shin. The role of oxygen vacancies in epitaxial-deposited ZnO thin films // J. Appl. Phys., 101, pp. 053106-(1-8) (2007).

- [16]. C-H. Min, S. Cho, S-H. Lee, D-Y. Cho, W. G. Park, J. G. Chung, E. Lee, J. C. Lee, B. Anass, J. H. Lee, C. S. Hwang, S-J. Oh. Effect of oxygen partial pressure on the Fermi level of ZnO<sub>1-x</sub> films fabricated by pulsed laser deposition // Appl. Phys. Lett., 96, pp. 201907 (2010).
- [17]. S. Lee, Y. E. Jeong, D. Lee, J. S. Bae, W. J. Lee, K. H. Park, S. D. Bu, S Park. Oxygen partial pressure dependent electrical conductivity type conversion of phosphorus-doped ZnO thin films // J. Phys. D: Appl. Phys., 47, pp. 065306 (1-5) (2014).
- [18]. R. Ondo-Ndong, F. Pascal-Delannoy, A. Boyer, A. Giani, A. Foucaran. Structural properties of zinc oxide thin films prepared by r. f. magnetron sputtering // Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology. Elsevier, 97(1), pp. 68-73 (2003).
- [19]. W. Gao, Z. Li. ZnO thin films produced by magnetron sputtering // Ceramics International. 30, pp. 1155-1159 (2004).
- [20]. A. Milns, D. Foiht. Geteroperehody i perehody v poluprovodnikah. Mir, M. 432 s. (1975).
- [21]. S. M. Sze. Physics of Semiconductor Devices, 2nd ed. Wiley, New York. 868 p. (1981).

Стаття надійшла до редакції 14.05.2018 р.

UDC 621.315.592

DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2018.2.136882>

## PHYSICAL PROCESSES THAT DETERMINE THE BEHAVIOR OF CURRENT IN *n*-ZnO/*p*-Si HETEROJUNCTIONS CREATED BY RF MAGNETRON SPUTTERING

*V. V. Khomyak*

Fedkovich Chernivtsi national university, 2 Kotsubinsky str., 58012 Chernivtsi, Ukraine  
e-mail: [v.khomyak@chnu.edu.ua](mailto:v.khomyak@chnu.edu.ua)

### Summary

**The purpose** of this paper is the growth of *n*-ZnO/*p*-Si heterostructures by the method of reactive radio-frequency (rf) magnetron sputtering at different conditions of ZnO deposition, and reveal of the physical processes which determine the behavior of the current in these structures, based on the analysis of the plotted band energy diagrams.

**Methods of research.** Specific resistance and concentration of electrons (*n*) in ZnO films were measured at room temperature by compensating method at a direct current and with the help of a four probe method. The current-voltage characteristics of *n*-ZnO/*p*-Si film were studied within the standard procedure at room temperature.

**Results of research.** All structures revealed the straightening properties. Energy diagrams, constructed for *n*-ZnO/*p*-Si, show that the main mechanisms of charge transfer through *n*-ZnO/*p*-Si surface-barrier structures, at direct bias, are well described in the models of tunneling-recombination currents. For the structures with bigger concentration of electrons in ZnO ( $\sim 8,1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  and  $\sim 3,3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ), the current is formed, mainly, by tunneling of electrons from ZnO into Si. For the structures grown with smaller carrier concentrations ( $\sim 4,2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  and  $\sim 6,0 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ) in ZnO, the current is formed by tunneling of electrons from ZnO and holes from Si.

At the essential reverse bias of electrons, produced by injection source in *p*-Si into *n*-ZnO, there is tunneling and currents limited by spatial charge.

**Conclusions.** The results of research prove that electric characteristics of  $n$ -ZnO/ $p$ -Si heterojunctions are rather complicated. They depend on the concentration of carriers, the density of defects in both materials and the structure of the energy bands of heterojunction. These features indicate that one should carefully select the deposition parameters of ZnO film in order to improve the characteristics of  $n$ -ZnO/ $p$ -Si heterojunctions.

**Keywords:**  $n$ -ZnO/ $p$ -Si heterostructures, current-voltage characteristics, current-transport mechanisms, tunneling

УДК 621.315.592

DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2018.2.136882>

## ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ, ЩО ЗУМОВЛЮЮТЬ ПОВЕДІНКУ СТРУМУ В ГЕТЕРОПЕРЕХОДАХ $n$ -ZnO/ $p$ -Si, СТВОРЕНИХ ВЧ МАГНЕТРОННИМ РОЗПИЛЕННЯМ

В. В. Хомяк

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича  
вул. Коцюбинського 2, v.khomyak-chnu.edu.ua

### Реферат

**Метою** даної роботи є створення гетероструктур  $n$ -ZnO/ $p$ -Si методом реактивного ВЧ магнетронного розпилювання, при різних умовах осадження ZnO, та з'ясування фізичних процесів, що зумовлюють поведінку струму в цих структурах, на основі аналізу побудованих зонних енергетичних діаграм.

**Методи дослідження.** Питомий опір і концентрація електронів ( $n$ ) плівок ZnO вимірювалися при кімнатній температурі компенсаційним методом на постійному струмі, а також з допомогою чотиризондового методу. Вольт-амперні характеристики  $n$ -ZnO/ $p$ -Si досліджувалися за стандартною методикою при кімнатній температурі.

**Результати дослідження.** Всі структури володіли випрямляючими властивостями. Побудовано енергетичні діаграми  $n$ -ZnO/ $p$ -Si і показано, що основні механізми переносу заряду при прямих зміщеннях добре описуються в рамках моделей тунельно-рекомбінаційних струмів. Для структур з більшими концентраціями електронів в ZnO ( $\sim 8,1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  і  $\sim 3,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) струм формується в основному тунелюванням електронів з ZnO в Si. Для структур, вирощених з меншими концентраціями носіїв в ZnO ( $\sim 4,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  і  $\sim 6,0 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ), струм формується з тунелювання електронів з ZnO і дірок з Si.

При значних зворотних зміщеннях джерелом інжекції електронів з  $p$ -Si в  $n$ -ZnO є тунелювання і струми, обмежені просторовим зарядом.

**Висновки.** Із проведених досліджень випливає, що електричні характеристики гетеропереходів  $n$ -ZnO/ $p$ -Si є доволі складними. Вони залежить від концентрації носіїв, щільності дефектів в обох матеріалах і структури енергетичних зон гетеропереходу. Це вказує на необхідність проведення ретельного підбору параметрів осадження плівок ZnO для поліпшення характеристик гетеропереходів  $n$ -ZnO/ $p$ -Si.

**Ключові слова:** гетероструктури  $n$ -ZnO/ $p$ -Si, вольт-амперні характеристики, механізми струмопереносу, тунелювання