

ОПТИЧНІ, ОПТОЕЛЕКТРОННІ І РАДІАЦІЙНІ СЕНСОРИ

OPTICAL AND OPTOELECTRONIC AND RADIATION SENSORS

PACS: 68.55.Ln, 71.55.Ak, 68.37.Hk, 68.37.–d, 78.20.Ci, 72.20.–i; УДК 539.216:621.383.51
DOI: 10.18524/1815–7459.2022.3.265294

ВПЛИВ ТОВЩИНИ ПЛІВКИ ГРАФІТУ НА ЕЛЕКТРИЧНІ ТА ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГЕТЕРОПЕРЕХОДІВ ТИПУ ДІОДІВ ШОТТКІ ГРАФІТ/N-SI

С. І. Курищук, А. І. Мостовий, І. П. Козярський, М. М. Солован

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,
58012 Чернівці, Україна
E-mail: kuryshchuk.serhii@chnu.edu.ua

ВПЛИВ ТОВЩИНИ ПЛІВКИ ГРАФІТУ НА ЕЛЕКТРИЧНІ ТА ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГЕТЕРОПЕРЕХОДІВ ТИПУ ДІОДІВ ШОТТКІ ГРАФІТ/N-SI

С. І. Курищук, А. І. Мостовий, І. П. Козярський, М. М. Солован

Анотація. Виготовлено діоди Шотткі графіт/n-Si методом електронно-променевого випаровування графіту на підкладки кремнію n-типу провідності. Досліджено вплив товщини плівок графіту на фотоелектричні та електричні властивості даних діодів. Визначено, що виготовлені діоди Шотткі можна буде використовувати у якості фотодіодів та сонячних елементів. Також було досліджено температурні залежності шунтуючого та послідовного опорів діодів.

При прямому та зворотному зміщенні були визначені домінуючі механізми струмопереносу через досліджувані діоди. Також було обчислено чутливість та детективність виготовлених діодів Шотткі графіт/n-Si.

Досліджувані гетеропереходи володіють яскраво вираженими діодними характеристиками з коефіцієнтом випрямлення для структури із тоншою плівкою $RR \approx 5 \cdot 10^2$, а для структури із товстішою плівкою $RR \approx 10^2$.

Ключові слова: графіт, діод Шотткі, Si, коефіцієнт випрямлення

INFLUENCE OF GRAPHITE FILM THICKNESS ON ELECTRICAL AND PHOTOELECTRIC PROPERTIES OF GRAPHITE/N-SI SCHOTTKY-TYPE HETEROJUNCTION

S. I. Kuryshchuk, A. I. Mostovyi, I. P. Koziarskyi, M. M. Solovan

Abstract. Graphite /n-Si Schottky diodes were fabricated by electron beam evaporation of graphite thin films on n-type silicon substrates. The influence of the thickness of graphite films on the photoelectric and electrical properties of these diodes has been studied. It is determined that our Schottky diodes can be used as photodiodes and solar cells. The temperature dependences of shunt and series resistances of diodes were also investigated.

In the case of forward and reverse bias, the dominant mechanisms of current transfer through the studied diodes were determined. The responsivity and detectivity of graphite/n-Si Schottky diodes were also calculated.

The studied heterojunctions have pronounced diode characteristics with a rectification coefficient for a structure with a thinner film $RR \approx 5 \cdot 10^2$, and for a structure with a thicker film $RR \approx 10^2$.

Keywords: graphite, Schottky diode, Si, rectification coefficient

ВСТУП

Розробка нових оптоелектронних приладів на основі вуглецевих матеріалів є актуальною науково-технічною задачею. Одним із найпоширеніших елементів у всесвіті по масі після водню, гелію і кисню являється вуглець. Атоми вуглецю володіють властивістю гібридизації своїх електронних орбіталей при формуванні хімічних зв'язків, що приводить до існування різних алотропних форм. Найпоширеніші з них є графіт та алмаз, які володіють кардинально різними фізичними властивостями. Однак найбільш широке застосування в електроніці та оптоелектроніці вуглецевих та вуглецевмісних матеріалів бере свій початок після того як було відкрито сімейство вуглецевих наноматеріалів: вуглецеві нанотрубки, фуллерени та графен [1–5]. У 2010р. за вивчення властивостей матеріалу «графен» була присвоєна Нобелівська премія з фізики. Її отримали Андре Гейм і Костянтин Новосьолов.

На сьогодні кремній вважається основним матеріалом для сучасної напівпровідникової електроніки, тому є актуальним завдання створити діоди Шотткі графіт/n-Si та дослідити вплив товщини плівок графіту на електричні та фотоелектричні властивості створених діодів [6–8].

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Для виготовлення діодів Шотткі використовували монокристалічний кремній із n-типом провідності та з орієнтацією поверхні (100) товщина – 330 мкм. Концентрація носіїв заряду та питомий опір даних кристалів при кімнатній температурі (295 К) мали такі значення: $n = 7.4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ $\rho = 6 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ відповідно. Глибина залягання рівня Фермі E_F для базового матеріалу визначалась із виразу для концентрації рівноважних електронів: $n = 2(2\pi m_n kT/h^2)^{3/2} \exp(-(E_C - E_F)/kT)$ і була рівна $E_F = 0,27 \text{ еВ}$. Для того, щоб зменшити рекомбінацію на тилловій стороні n-кремнію, використовувались підкладки, які вже мали тилловий контакт із вбудованим внутрішнім полем. Тилловий контакт виготовляли шляхом напилення шару власного гідрогенізованого аморфного кремнію (a-Si: H) товщиною ~10 нм для пасивації поверхні підкладки. Наступний шар сильно легованого гідрогенізованого аморфного кремнію фосфором n^+ (a-Si: H) товщина ~20 нм для створення ізотипного переходу, висота бар'єру ~ 0,1 еВ на тилловій стороні Si, і вкінці наносили шар алюмінію за допомогою методу термічного випаровування.

Виготовлення діодів Шотткі графіт/n-Si проводилося методом осадження тонких графітових плівок на підкладку Si (100) розміром 5x5x0,33 мм за допомогою універсальної

вакуумної установки Leybold-Heraeus L560 за рахунок випаровування чистого масивного полікристалічного графіту електронним пучком. Контроль швидкості осадження, товщини плівки та інтенсивності пучка виконувався за допомогою INFICON ХТС контролера осадження. Залишковий тиск у вакуумній камері за час процесу осадження, становив близько 5×10^{-5} мбар. Процес осадження для структури № 1 відбувався 1,5 хв при середній швидкості осадження 0,27 нм/с (товщина плівки d дорівнює близько 25 нм) при температурі підкладки 450 °С, а для структури № 2 процес осадження тривав 2,5 хв (товщина плівки d рівна 40 нм) при тій же температурі.

ВАХ наших діодів Шотткі вимірялись стандартною методикою із використанням Keysight B2985A – фемто/піко амперметра із вбудованим джерелом ($\pm 10^3$ В), а вольтметром слугував Agilent 34410A.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Дослідження електричних властивостей діодів Шотткі графіт/n-Si

На рисунку 1 показано темнову вольт-амперну характеристику діодів Шотткі графіт/n-Si з різною товщиною графітових плівок (25 нм та 40 нм). Із рисунка видно, що зі збільшенням товщини плівки пряма гілка ВАХ діода Шотткі графіт/n-Si стає майже паралельною вісі струмів, що свідчить про формування хорошої гетероструктури з мінімальним послідовним опором.

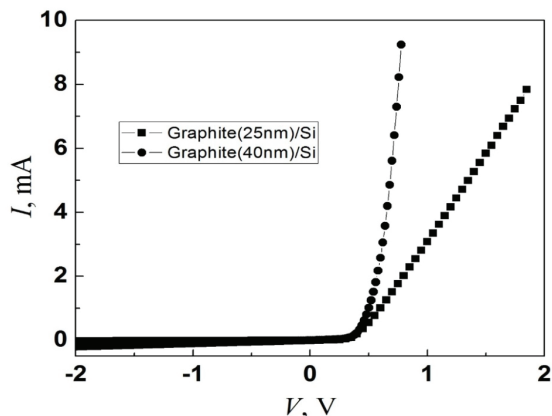


Рис. 1. Вольт-амперні характеристики діодів Шотткі графіт/n-Si виміряні при кімнатній температурі з різною товщиною плівки графіту.

На рисунку 2 зображено темнові ВАХ діодів Шотткі графіт/n-Si із різною товщиною плівки графіту: а) $d = 25$ нм, б) $d = 40$ нм. Із рисунка визначили коефіцієнт випрямлення для обох структур. Для структури із тоншою плівкою коефіцієнт випрямлення рівний $RR \approx 5 \cdot 10^2$, а для структури із товстішою плівкою $RR \approx 10^2$.

Шляхом екстраполяції прямолінійної ділянки ВАХ до перетину з віссю напруг було визначено висоту потенціального бар'єру для двох структур: структура № 1 при $d = 25$ нм $\phi_0 = 0,46$ еВ (де $\phi_0 = eV_{bi}$, а V_{bi} – контактна різниця потенціалів), структура № 2 при $d = 40$ нм $\phi_0 = 0,56$ еВ. Температурні залежності ВАХ не наводились у роботі, тому що у діапазоні температур від 294 К до 328 К спостерігалась мала зміна значення висоти потенціального бар'єру для обох структур. Дана інформація свідчить про хорошу температурну стабільність діодів Шотткі графіт/n-Si, які ми виготовили.

Величину шунтуючого R_{sh} та послідовного R_s опорів діодів Шотткі визначали із залежності диференційного опору R_{dif} від напруги U (рис. 3) [9]. Із рисунка видно, що в області напруг, які більші за висоту потенціального бар'єру, криві $R_{dif}(V)$ виходять на насичення. Це вказує на те, що бар'єр вже відкритий, а струм через діод Шотткі обмежується лише його послідовним опором R_s . Екстраполяцією із областей насичення до перетину із віссю диференційного опору визначили величину послідовного опору (рис. 3) [10].

Задля встановлення домінуючих механізмів струмопереносу в даних діодах Шотткі графіт/n-Si були проаналізовані температурні залежності вольт-амперних характеристик (вставка до рис. 2). Аналізуючи прямі гілки вольт-амперних характеристик наших діодів Шотткі графіт/n-Si з різною товщиною графітових плівок, побудованих в напівлогарифмічному масштабі, визначили, що на залежності $\ln I = f(V)$ присутні прямолінійні ділянки, а це свідчить про експоненціальну залежність струму від напруги.

В цьому випадку виміряні вольт-амперні характеристики описуються за допомогою формули:

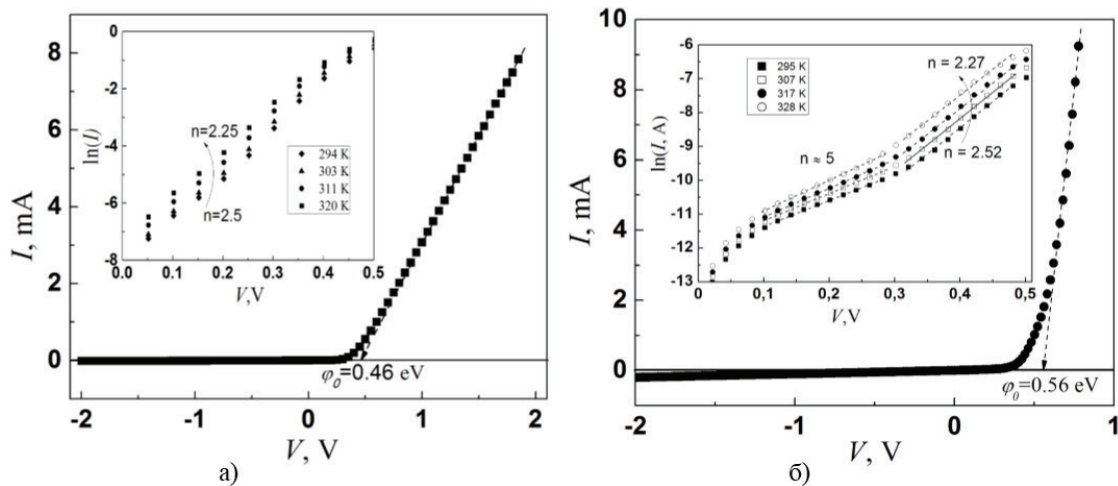


Рис. 2. ВАХ діодів Шотткі графіт/n-Si з різною товщиною плівки графіту: а) $d = 25$ нм; б) $d = 40$ нм. На вставці – прямі гілки ВАХ діодів Шотткі графіт/n-Si у напівлогарифмічному масштабі.

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

де, I_0 – струм насичення, n – коефіцієнт неідеальності, T – абсолютна температура, k – постійна Больцмана.

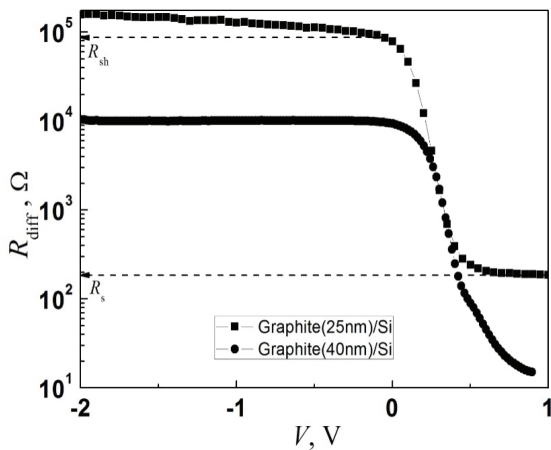


Рис. 3. Залежність диференційного опору гетеропереходів графіт/n-Si від напруги.

Із рівняння (1) були отримані значення показника неідеальності n ($\Delta \ln(I)/\Delta(V) = e/nkT$) для обох структур. Для структури № 1 із товщиною графітової плівки $d = 25$ нм показник неідеальності змінюється від 2,5 до 2,25 ($3kT/e < V < 0,5$ В) із підвищенням температури в інтервалі 294–320 К. А для структури № 2 із товщиною плівки графіту $d = 40$ нм значення показника неідеальності змінюється від 2.52

до 2.27 із підвищенням температури в межах від 295 К до 328 К.

Вищі значення показника неідеальності, але близькі до 2, а також зменшення його при зростанні температури свідчать про те, що у нашому випадку домінуючим механізмом струмопереносу є генераційно-рекомбінаційні процеси в ОПЗ за участі електрично активних поверхневих станів, які розташовані на металургійній межі розділу наших досліджуваних діодів [11].

Зворотні гілки вольт-амперних характеристик діодів Шотткі графіт/n-Si у напівлогарифмічному масштабі в межах температури від 295 до 328 К для структури № 2 із товщиною плівки $d = 40$ нм зображено на рис. 4. На вставці до рис. 4 зображено залежності в інтервалі температур 294–320 К для структури № 1 при товщині графітової плівки $d = 25$ нм. Прямі лінії зображені на рисунку 4 свідчать про те, що в обох структурах наявне тунелювання носіїв заряду крізь потенціальний бар'єр.

Дослідження фотоелектричних властивостей діодів Шотткі

На рис. 5 зображено темнові та світлові (при інтенсивності освітлення 80 мВт/см²) ВАХ діодів Шотткі графіт/n-Si. Із дослідження вольт-амперних характеристик при освітленні показано, що виготовлені діоди Шотткі є фоточутливими, як видно з рис. 5. У випадку

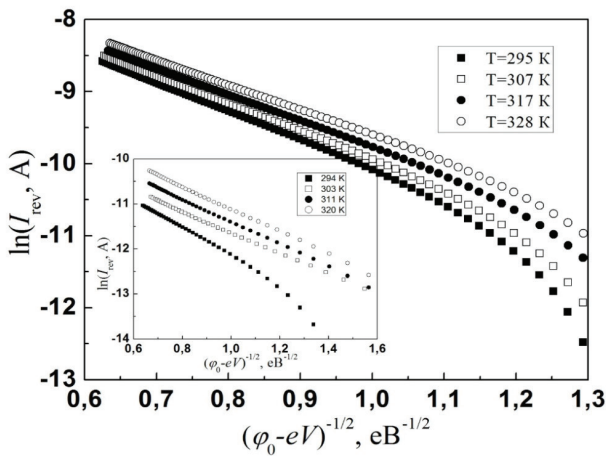


Рис. 4. Зворотні гілки вольт-амперних характеристик діодів Шотткі графіт/n-Si у напівлогарифмічному масштабі для структури № 2 при $d = 40$ нм. На вставці для структури № 1 при $d = 25$ нм.

графітової плівки товщиною 25 нм при освітленні зразка білим світлом, яке має інтенсивність 80 мВт/см^2 , зворотний струм I_{light} збільшується в порівнянні з його величиною у темряві I_{dark} практично на два порядки, тоді як для плівки з товщиною 40 нм зворотний струм I_{light} збільшується в порівнянні з його величиною у темряві I_{dark} тільки на один порядок.

Щоб оцінити фотоприймач та його продуктивність більш кількісно можна визначити його значення чутливості (R) та детективності (D^*), які будуть показувати чутливість фотоприймача до падаючого випромінювання [12,13]:

$$R = (I_{light} - I_{dark}) / P_{opt}, \quad (2)$$

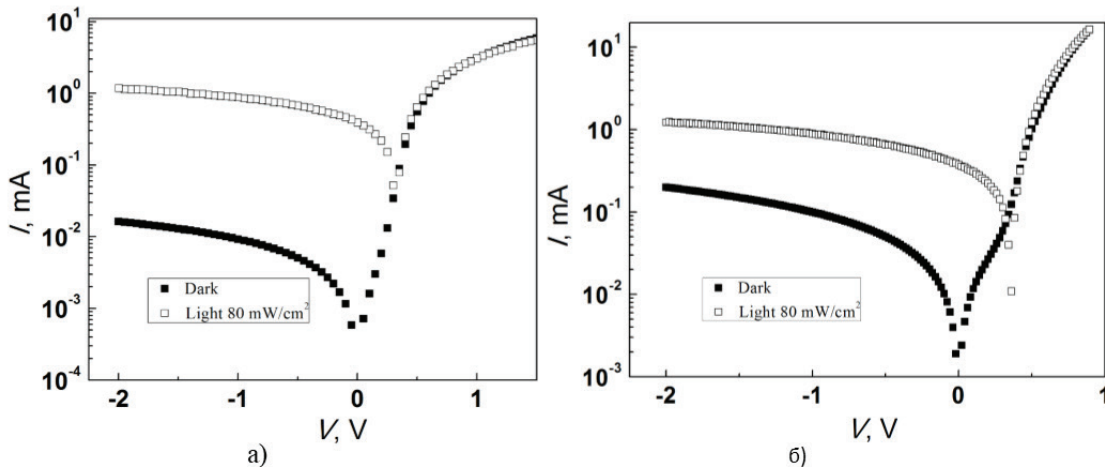


Рис. 5. Темнові та при інтенсивності освітлення 80 мВт/см^2 ВАХ діодів Шотткі графіт/n-Si: а) $d = 25$ нм; б) $d = 40$ нм.

$$D^* = \sqrt{\frac{A}{2qI_{dark}}} R, \quad (3)$$

де A – це активна площа фотоприймача.

На рис. 6 (а) приведено залежності чутливості від напруги зворотнього зміщення $R=f(V_{rev})$ для діодів Шотткі графіт/n-Si, а на рис. 6 (б) зображено залежності детективності від напруги зворотнього зміщення для вищезгаданих діодів Шотткі $D^*=f(V_{rev})$.

Із залежностей видно, що при збільшенні зворотнього зміщення V_{rev} чутливість (R) плавно

збільшується, що зумовлено розширенням ОПЗ (збільшення висоти потенціального бар'єру), унаслідок чого і зростає ефективність розділення фотогенерованих електрон-діркових пар. Детективність (D^*) в свою чергу, яка відповідає за нормовану потужність опромінення, необхідну для отримання сигналу від фотоприймача на рівні шуму, стає меншою, що обумовлено причиною зростання темного зворотного струму I_{dark} , який у даному випадку виступає як електричний шум. Значення детективності для тоншої плівки є вищими на відміну від товстішої плівки.

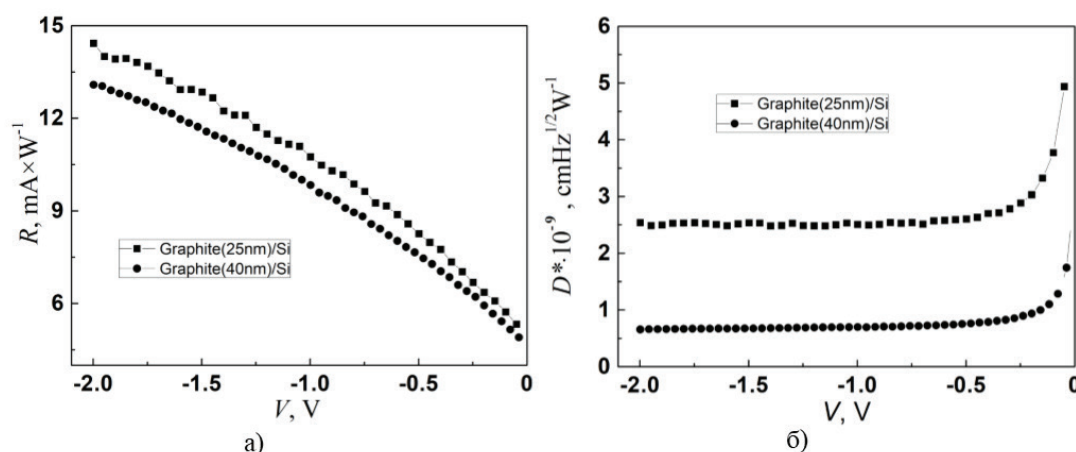


Рис. 6. Залежність чутливості (R) (а) та детективності (D^*) (б) від напруги зворотного зміщення для діодів Шоттки графіт/n-Si.

ВИСНОВКИ

1. За допомогою методу електронно-променевого випаровування виготовлено фоточутливі діоди Шоттки графіт/n-Si із різною товщиною плівок графіту: структура № 1 $d = 25$ нм, структура № 2 $d = 40$ нм.

2. Встановлено, що виготовлені діоди Шоттки графіт/n-Si володіють висотою потенціального бар'єру: для структури № 1 $\phi_0 = 0,46$ еВ, для структури № 2 $\phi_0 = 0,56$ еВ. При прямих зміщеннях домінуючі механізми струмопереносу гарно описуються в рамках генераційно-рекомбінаційної моделі.

3. Із досліджень освітлених ВАХ показано, що такі діоди Шоттки є фоточутливими. При освітленні на зразок білим світлом з інтенсивністю 80 мВт/см^2 , зворотний струм I_{light} більший від величини струму у темряві I_{dark} практично на два порядки для структури із меншою товщиною плівки, а для структури із більшою товщиною плівки – збільшується тільки на один порядок.

Список використаної літератури

[1]. S. K. Tiwari, V. Kumar, A. Huczko, R. Oraon, A. D. Adhikari, G. Nayak. Magical allotropes of carbon: prospects and applications. *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, **41** (4), pp. 257–317 (2016).

[2]. L. Liao, H. Peng, Z. Liu. Chemistry makes graphene beyond graphene. *J. Am. Chem. Soc.*, **136** (35), pp. 12194–12200 (2014).

[3]. Y. Peng, Z. Wang, K. Zou. Friction and wear properties of different types of graphene nanosheets as effective solid lubricants. *Langmuir*, **31** (28), pp. 7782–7791 (2015).

[4]. B. Mi. Graphene oxide membranes for ionic and molecular sieving. *Science*, **343** (6172), pp. 740–742 (2014).

[5]. J. Poon, C. Batchelor-McAuley, K. Tschulik, R. G. Compton. Single graphene nanoplatelets: capacitance, potential of zero charge and diffusion coefficient. *Chem. Sci.*, **6** (5), pp. 2869–2876 (2015).

[6]. X. Li, H. Zhu, K. Wang, A. Cao, J. Wei, C. Li, Y. Jia, Z. Li, and D. Wu. Graphene-On-Silicon Schottky Junction Solar Cells. *Adv. Mater.*, **22**, pp. 2743–2748 (2010).

[7]. V. V. Brus, P. D. Maryanchuk. Photosensitive Schottky-type heterojunctions prepared by the drawing of graphite films. *Appl. Phys. Lett.*, **104**, pp. 173501 (2014).

[8]. S. Tongay, T. Schumann, A. F. Hebard. Graphite based Schottky diodes formed on Si, GaAs, and 4H-SiC substrates. *Appl. Phys. Lett.*, **95**, pp. 222103 (2009).

[9]. L. Lancellotti, N. Lisi, P. Delli Veneri, E. Bobeico, I. Maticena, P. Guerriero. Graphene-on-Silicon solar cells with graphite contacts. *IEEE*, **106**, pp. 19118483 (2019).

[10]. A. I. Mostovyi, S. I. Kuryshchuk, T. T. Kovaliuk, I. P. Koziarskyi, M. M. Solovan. Fabrication and investigation photosensitive of Graphite/PEDOT: PSS/n-CdZnTe organic-

inorganic heterojunction. SPIE Proceedings, **12126**, (2021).

[11]. A. Belaidi, R. Bayon, L. Dloczik, K. Ernst, M. Ch. Lux-Steiner, R. Konenkamp. Comparison of different thin film absorbers used in eta-solar cells. *This Solid Films*, **431–432**, pp. 488–491 (2003).

[12]. H. P. Parkhomenko, M. N. Solovan, P. D. Maryanchuk. Electrical properties of p-NiO/

n-Si heterostructures based on nanostructured silicon. *Semiconductors*, **52** (7), pp. 859–863 (2018).

[13]. S. N. Moger, M. G. Mahesha. Investigation on ZnTe/Cd_xZn_{1-x}Te heterostructure for photodetector applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, **315**, pp. 112294 (2020).

Стаття надійшла до редакції 05.07.2022 р.

PACS: 68.55.Ln, 71.55.Ak, 68.37.Hk, 68.37.–d, 78.20.Ci, 72.20.–i; UDC539.216:621.383.51

DOI: 10.18524/1815-7459.2022.3.265294

INFLUENCE OF GRAPHITE FILM THICKNESS ON ELECTRICAL AND PHOTOELECTRIC PROPERTIES OF GRAPHITE / N-SI SCHOTTKY-TYPE HETEROJUNCTION

S. I. Kuryshchuk, A. I. Mostovyi, I. P. Kozziarskyi, M. M. Solovan

Chernivtsi National University, Department of Electronics and Energy Engineering,
2 Kotsyubynsky str., 58012 Chernivtsi, Ukraine
E-mail: kuryshchuk.serhii@chnu.edu.ua

Summary

Graphite/n-Si Schottky diodes were fabricated by electron beam evaporation of graphite on n-type silicon substrates. The influence of the thickness of graphite films on the photoelectric and electrical properties of these diodes has been studied. It is determined that our Schottky diodes can be used in the form of photodiodes and solar cells. The temperature dependences of shunt and series resistances of diodes were also investigated.

In the case of forward and reverse bias, the dominant mechanisms of current transfer through the studied diodes were determined. The responsivity and detectivity of our Schottky graphite/n-Si diodes were also calculated.

The studied heterojunctions have pronounced diode characteristics with a rectification coefficient for a structure with a thinner film $RR \approx 5 \cdot 10^2$, and for a structure with a thicker film $RR \approx 10^2$.

Schottky graphite/n-Si photosensitive diodes with different thicknesses of graphite films were fabricated using the electron beam evaporation method: structure № 1 $d = 25$ nm, structure № 2 $d = 40$ nm. It was established that the Schottky graphite/n-Si diodes produced have a potential barrier height: for structure № 1 $\varphi_0 = 0,46$ eV, for structure № 2 $\varphi_0 = 0,56$ eV. In direct displacements, the dominant mechanisms of current transfer are well described within the framework of the generation-recombination model. Research has shown that such Schottky diodes are photosensitive. When the sample is illuminated by white light with an intensity of 80 mW/cm², the reverse current I_{light} is greater than the current in the dark I_{dark} by almost two orders of magnitude for a structure with a smaller film thickness, and for a structure with a larger film thickness, it increases by only one order of magnitude.

Keywords: graphite, Schottky diode, Si, rectification coefficient

PACS: 68.55.Ln, 71.55.Ak, 68.37.Hk, 68.37.–d, 78.20.Ci, 72.20.–i; УДК 539.216:621.383.51
DOI: 10.18524/1815-7459.2022.3.265294

ВПЛИВ ТОВЩИНИ ПЛІВКИ ГРАФІТУ НА ЕЛЕКТРИЧНІ ТА ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГЕТЕРОПЕРЕХОДІВ ТИПУ ДІОДІВ ШОТТКІ ГРАФІТ/N-SI

С. І. Курищук, А. І. Мостовий, І. П. Козярський, М. М. Солован

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,
58012 Чернівці, Україна
E-mail: kuryshchuk.serhii@chnu.edu.ua

Реферат

Було виготовлено діоди Шотткі графіт/n-Si методом електронно-променевого випаровування графіту на підкладки кремнію n-типу провідності. Досліджено вплив товщини плівок графіту на фотоелектричні та електричні властивості даних діодів. Визначено, що виготовлені діоди Шотткі можна буде використовувати у вигляді фотодіодів та сонячних елементів. Також було досліджено температурні залежності шунтуючого та послідовного опорів діодів.

При прямому та зворотному зміщенні були визначені домінуючі механізми струмопереносу через досліджувані діоди. Також було обчислено чутливість та детективність виготовлених нами діодів Шотткі графіт/n-Si.

Досліджувані гетеропереходи володіють яскраво вираженими діодними характеристиками з коефіцієнтом випрямлення для структури із тоншою плівкою $RR \approx 5 \cdot 10^2$, а для структури із товстішою плівкою $RR \approx 10^2$.

Отримали фоточутливі діоди Шотткі графіт/n-Si із різною товщиною плівок графіту: структура № 1 $d = 25$ нм, структура № 2 $d = 40$ нм. Встановлено, що виготовлені діоди Шотткі графіт/n-Si володіють висотою потенціального бар'єру: для структури № 1 $\phi_0 = 0,46$ еВ, для структури № 2 $\phi_0 = 0,56$ еВ. При прямих зміщеннях домінуючі механізми струмопереносу гарно описуються в рамках генераційно-рекомбінаційної моделі. Із досліджень показано, що такі діоди Шотткі є фоточутливими. При освітленні білим світлом з інтенсивністю 80 мВт/см², зворотний струм I_{light} більший від величини струму у темряві I_{dark} практично на два порядки для структури із меншою товщиною плівки, а для структури із більшою товщиною плівки – збільшується тільки на один порядок.

Ключові слова: графіт, діод Шотткі, Si, коефіцієнт випрямлення