

ДЕТЕКТОРИ УЛЬТРАФІОЛЕТОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ГРАФІТ/*n*-SiC, ОТРИМАНІ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ВИПАРОВУВАННЯ

М. М. Солован, Г. П. Пархоменко, П. Д. Мар'янчук
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
вул. Коцюбинського, 2, Чернівці, 58012, Україна
e-mail: h.parkhomenko@chnu.edu.ua
(Отримано 05 липня 2019 р.)

Виготовлено діоди Шотткі графіт/*n*-SiC методом електронно-променевого випаровування графіту на підкладку *n*-SiC. Виміряно вольт-амперні (за різних температур) і вольт-фарадні характеристики. Досліджено температурні залежності висоти потенціального бар'єра й послідовного опору діода Шотткі графіт/*n*-SiC. Визначено домінуючі механізми струмопереносу через гетероперехід за прямого і зворотного зміщень. Установлено, що основними механізмами струмопереносу через діод Шотткі графіт/*n*-SiC у разі прямих зміщень є надбар'єрна емісія й емісійно-рекомбінаційний механізм, а в разі зворотних зміщень — тунельний механізм струмопереносу.

Ключові слова: гетероперехід, механізми струмопереносу, графіт, SiC.

DOI: <https://doi.org/10.30970/jps.23.4801>

PACS number(s): 81.05.uf, 85.60.Gz

I. ВСТУП

Вуглець є одним з найпоширеніших елементів земної кори. Крім того, сполуки вуглецю — невід'ємна основа всіх живих організмів. Тому не дивно, що саме вуглець широко використовують у приладах електронної техніки. Останнім часом методи отримання тонких вуглецевих шарів викликають значне наукове зацікавлення, зумовлене винятковими фізичними властивостями вуглецю та його алотропних модифікацій: високими механічними якостями, хорошою провідністю та прозорістю. Широке застосування має технологія одержання графену, який являє собою двовимірний напівпровідник з нульовою забороненою зоною [1,2].

Графіт має переваги над традиційними металами, а саме: стійкий до термічної дії, що зумовлено міцними зв'язками атомів вуглецю. Тому можна припустити, що бар'єри на основі графіту зберігають випрямні властивості за високих температур [3–6].

Карбід кремнію має ряд переваг порівняно з іншими широкозонними напівпровідниками, а саме: комерційну доступність складників, відомі технології обробки, високу термо- і радіаційну стійкість, а останнім часом широко використовується під час виготовлення інтегральних схем для космічної галузі [3,7]. Тому прилади на основі графіту та карбіду кремнію зберігають свої властивості за високих температур, що значно розширює їхні функціональні можливості порівняно з аналогічними приладами на основі кремнію.

Автори [6] одержали детектори ультрафіолетового випромінювання на основі карбіду кремнію осадженням графену. Проте технологія осадження графену в промислових масштабах не набула популярності через дороговизну. Тонкі плівки графіту отримати про-

тіше порівняно з графеном. Мета цієї роботи полягала у створенні діодів Шотткі графіт / *n*-SiC (напиленням плівок графіту методом електронно-променевого випаровування) і дослідженні їхніх електричних властивостей, а також у встановленні домінуючих механізмів струмопереносу у разі прямих і зворотних зміщень.

II. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Напилювали тонкі плівки графіту на підкладки карбіду кремнію *n*-типу провідності розміром $5 \times 5 \times 0.3$ мм методом електронно-променевого випаровування в універсальній вакуумній установці Leybold-Heгаeus L560 із спресованих таблеток порошку графіту за температури підкладок 650°C . Потужність електронно-променевого випаровувача становила 40% від максимального значення. Час напилення становив 1–2 хв. Сформовані таблетки розміщували в мідному тиглі з водяним охолодженням і поступово прогрівали електронним променем у вакуумній камері, що відкачувалася молекулярним насосом до вакууму $5 \cdot 10^{-5}$ мбар. Для запобігання випаровуванню забруднень з поверхні на початковому етапі підігріву таблеток за слінка між тиглем і підкладками була закрита. Товщина напилених плівок становила 30 нм.

Потужність електронного променя, швидкість напилення і товщину плівки контролювали за допомогою контролера напилення тонких плівок INFICON XTC. Під час прогрівання таблеток потужність електронного променя підтримували на рівні 5 – 8% від максимального значення. Попередньо підігрівали таблетки, щоб запобігати інтенсивному газуванню порошку графіту у разі його різкого нагрівання. Водночас потужність електронного променя підвищува-

ли в ручному режимі роботи контролера INFICON ХТС до рівня 40% з одночасним відкриттям заслінки. Температуру підкладок контролювали системою термопар у вакуумній камері і задавали за допомогою контролера на панелі управління.

Діоди Шотткі були виготовлені на підкладці монокристала n -SiC. Питома електропровідність, концентрація носіїв заряду і їхня рухливість за кімнатної температури становили $\sigma = 1.4 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, $n = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ і $\mu = 880 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ відповідно. Глибина залягання рівня Фермі для n -SiC становила $E_c - E_F = 0.28 \text{ еВ}$.

Тиловий омичний контакт до n -SiC сформовано нанесенням на нього шару Ni (товщиною 0,5 мкм) методом магнетронного напилення. Дифузія атомів Ni в приповерхневу область SiC відбувалася через термічний відпал за температури 1223 К протягом 10 хв. Сформований n^+ -шар зменшував контактний опір.

Фронтальний електричний контакт до графітової півки формувався за допомогою нанесення струмопровідної пасти за кімнатної температури (рис. 1).

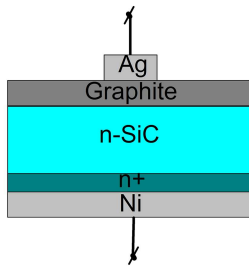


Рис. 1. Схематичне зображення структури графіт/ n -SiC.

Установку для дослідження ВАХ зібрано на базі керування комп'ютером вольтметра, амперметра та джерела живлення. Програму для керування цими блоками під час вимірювання ВАХ створено в програмному середовищі LabView. Вимірюючи значення струму й напруги для кожної точки (причому вимірювання кожного параметра в точці проводили 10 раз, після чого виводили середнє арифметичне, яке і зберігалося як досліджуваний параметр, що давало змогу значно зменшити похибку).

Вимірювання освітлених ВАХ проводили за освітлення УФ. Як джерело світла використовували ртутну лампу ДРШ-250 з інтенсивністю освітлення 206 мкВт/см^2 .

Вимірювали ВФХ досліджуваного зразка за допомогою LCR Meter BR2876. Амплітуду збуджувального сигналу у разі вимірювань ВФХ встановлено 50 мВ. Досліджували зразки в діапазоні частот від $2 \cdot 10^4$ до 10^6 Гц.

III. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТИВ

На рис. 2 наведено прямі гілки ВАХ діодів Шотткі графіт/ n -SiC, виміряні за різних температур, і температурну залежність висоти потенціального бар'єра цих діодів.

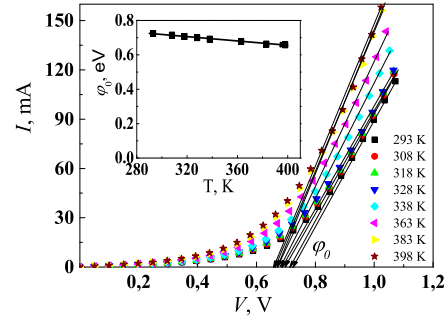


Рис. 2. Прямі гілки ВАХ діодів Шотткі графіт/ n -SiC. На вставці — температурна залежність висоти потенціального бар'єра.

Екстраполяцією лінійних ділянок ВАХ до перетину з віссю напруг визначено висоту потенціального бар'єра $\varphi_0(T)$ діода за різних температур. Установлено, що температурна залежність висоти потенціального бар'єра діодів Шотткі графіт/ n -SiC добре описується таким рівнянням:

$$\varphi_0(T) = \varphi_0(0) + \beta_\varphi T. \quad (1)$$

З рівняння (1) визначено температурний коефіцієнт висоти потенціального бар'єра $\beta_\varphi = -6.44 \cdot 10^{-4} \text{ еВ} \cdot \text{К}^{-1}$, а також висоту потенціального бар'єра досліджуваного діода за абсолютного нуля температури $\varphi_0(0) = 0.91 \text{ еВ}$.

Величини опорів послідовного R_s та шунтуючого R_{sh} діода Шотткі графіт/ n -SiC визначено із залежності його диференційного опорю R_{dif} від напруги (рис. 3). Видно, що криві $R_{dif}(V)$ виходять на насичення у разі прямого зміщення $V > V_{bi}$ ($V_{bi} = e\varphi(T)$). Це свідчить про те, що спад напруги на дьялянки просторового заряду стає постійним тобто, бар'єр діода Шотткі графіт/ n -SiC відкривається, і струм крізь гетероперехід обмежується тільки його послідовним опором. Значення послідовного опорю (R_s) можна визначити екстраполяцією зони насичення до перетину з віссю диференційного опорю, а за відсутності зміщення визначаємо шунтуючий опір R_{sh} .

Значення послідовного опорю $R_s \sim \rho$, де ρ — питомий електричний опір, який у разі частково компенсованого напівпровідника визначаємо так:

$$\rho = \frac{1}{q\mu_n n} = \frac{1}{q\mu_n (N_c N_d / 2)^{1/2} \exp(-E_D / kT)}, \quad (2)$$

де μ_n — рухливість електронів; N_c — ефективна густина станів у зоні провідності; N_d — концентрація донорних домішок; E_D — енергія йонізації донорного рівня. Оскільки експоненційна залежність сильніша, ніж степенева, можна стверджувати, що температурна залежність послідовного опорю визначається переважно експоненційним множником $R_s \sim \exp(-E_D / kT)$ [8,9].

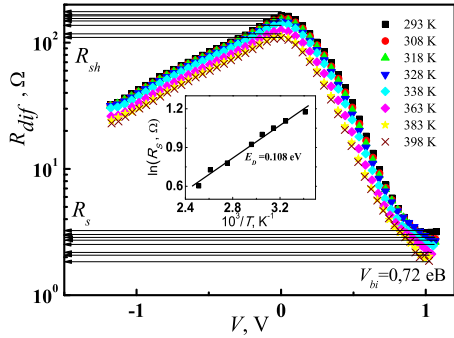


Рис. 3. Залежності диференційного опору діода Шоттки графіт/*n*-SiC від напруги. На вставці — залежність $\ln R_s = f(10^3/T)$.

Отже, нахил прямої $\ln R_s = f(10^3/T)$ визначає глибину залягання донорного рівня $E_D = 0.108$ eВ (рис. 3, вставка).

Механізми струмопереносу в разі прямих і зворотних зміщень

Прямі гілки ВАХ діодів Шоттки за різних температур наведено на рис. 4. Проведений аналіз показав, що залежність $\ln I = f(V)$ складається з двох прямолінійних ділянок, що свідчить про експоненційну залежність струму від напруги і наявність двох домінуючих механізмів переносу заряду в досліджуваному інтервалі напруг. Визначений показник неідеальності ($\Delta \ln I / \Delta V = e/nkT$, де n — показник неідеальності) для обох ділянок напруг становить $n \approx 1$ ($0.15 < V < 0.5$ В) та $n \approx 1 - 1.44$ ($0.5 < V < 0.8$ В). Близькі до одиниці значення показника неідеальності свідчать про те, що в зоні малих прямих зміщень надбар'єрна емісія є домінуючим механізмом струмопереносу [10,11].

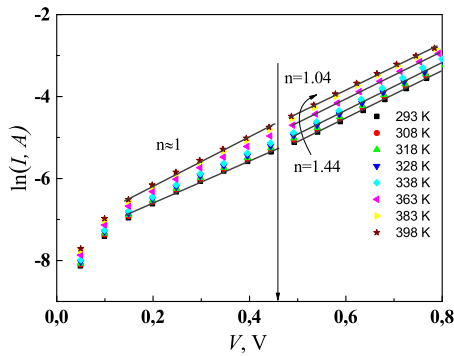


Рис. 4. Прямі гілки ВАХ діодів Шоттки графіт/*n*-SiC.

В ділянці напруг $0.5 < V < 0.8$ В залежність $I(V)$ добре описується виразом для емісійно-рекомбінаційного механізму струмопереносу (пряма рекомбінація носіїв заряду через енергетичні стани на поверхні розділу, яка визначається висотою потенціального бар'єра) [11]:

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right], \quad (3)$$

$$I_s = B_0 \exp\left(-\frac{\varphi_0}{nkT}\right), \quad (4)$$

де B_0 — коефіцієнт, що слабо залежить від температури; коефіцієнт n змінюється від 1 до 2, що добре корелює з експериментально отриманими значеннями.

На рис. 5 зображено зворотні гілки ВАХ за різних температур.

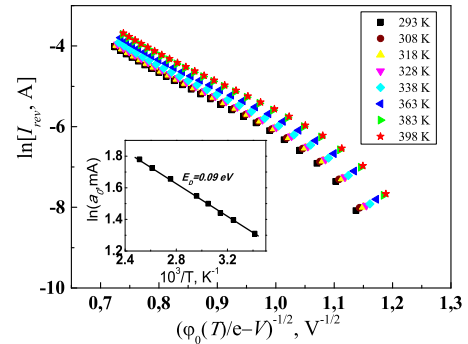


Рис. 5. Зворотні гілки ВАХ діодів Шоттки графіт/*n*-SiC. На вставці — температурна залежність параметра a_0 .

Аналіз залежностей на рис. 5 показав, що в ділянці зворотних зміщень домінуючим механізмом струмопереносу є тунелювання. У цьому випадку вираз для тунельного струму в разі зворотних зміщень має вигляд:

$$I_{rev} \approx a_0 \exp\left(\frac{b_0}{\varphi_0(T) - eV}\right), \quad (5)$$

де a_0 — параметр, який визначає ймовірність заповнення енергетичних рівнів, з яких відбувається тунелювання; b_0 — визначає швидкість зміни струму з напругою. Отже, згідно з рівнянням (5), апроксимація зворотних гілок ВАХ прямими лініями в координатах $\ln I_{rev} = f(\varphi_0(T) - eV)^{-1/2}$ (рис. 5) підтверджує домінування тунельного механізму струмопереносу. З нахилу температурної залежності параметра a_0 у координатах $\ln a_0 = f(10^3/T)$ визначено глибину залягання енергетичного рівня ($E_D = 0.09$ eВ), з якого відбувається тунелювання в разі зворотних зміщень [12].

*Вольт-фарадні характеристики діодів Шоттки графіт/*n*-SiC*

На рис. 6 зображено ВФХ діода Шоттки графіт/*n*-SiC, виміряні за кімнатної температури за різних частот у режимі паралельного RC-кола в разі малої амплітуди змінного струму.

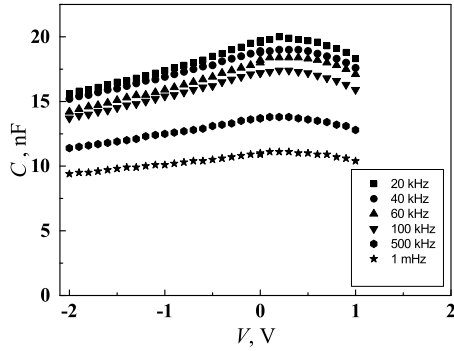


Рис. 6. ВФХ діода Шоттки графіт/*n*-SiC за різних частот.

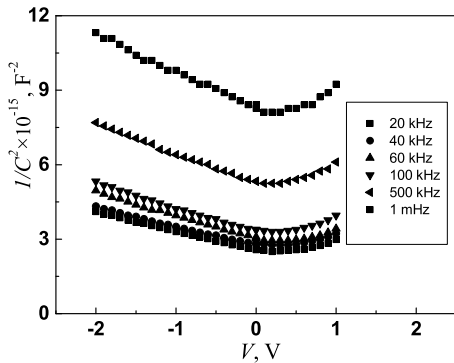


Рис. 7. ВФХ діодів Шоттки графіт/*n*-SiC за різних частот у координатах Мотта-Шоттки.

Побудувавши залежність вимірної ємності в координатах Мотта-Шоттки $C^{-2} = f(V)$ (рис. 7), одержимо прямолінійні ділянки, що свідчить про рівномірний розподіл некомпенсованих донорів у базовому матеріалі [13–14]. Також спостерігаємо слабку залежність нахилу прямолінійних ділянок від частоти, що пов'язано із впливом поверхневих електрично-активних станів на межі поділу двох напівпровідників з різним характеристичним часом перезарядки [13–15].

Фотоелектричні властивості діодів Шоттки графіт/*n*-SiC

На рис. 8 зображено темнові та світлові ВАХ діодів Шоттки графіт/*n*-SiC.

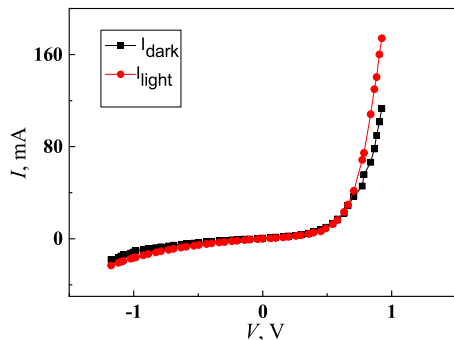


Рис. 8. Темнова і світлова ВАХ діода Шоттки графіт/*n*-SiC.

З рисунка видно, що в разі освітлення ультрафіолетом зворотний струм I_{light} збільшується порівняно з

його величиною в темряві I_{dark} внаслідок розділення фотогенерованих електрон-діркових пар.

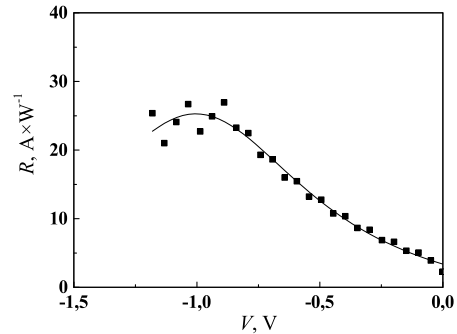


Рис. 9. Залежність чутливості (R) від напруги зворотного зміщення.

Оцінити продуктивність фотоприймача кількісно можна за допомогою визначення чутливості (R) і детективності (D^*), які відображають чутливість фотоприймача до падаючого випромінювання [16,17]:

$$R = (I_{\text{light}} - I_{\text{dark}}) / P_{\text{opt}}, \quad (6)$$

$$D^* = \sqrt{\frac{A}{2qI_{\text{dark}}}} R, \quad (7)$$

де A — площа фотоприймача.

З рис. 9 видно, що чутливість (R) плавно збільшується зі зростанням зворотного зміщення, що зумовлено розширенням ділянки просторового заряду, унаслідок чого зростає ефективність розділення фотогенерованих електрон-діркових пар.

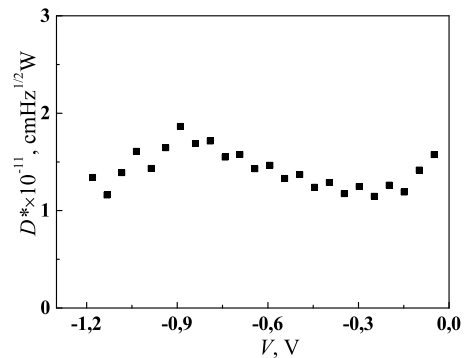


Рис. 10. Залежність детективності (D^*) від напруги зворотного зміщення.

Детективність (D^*), яка описує нормовану потужність опромінення (P_{opt}), необхідну для отримання сигналу від фотоприймача на рівні шуму, практично не змінюється, що зумовлено зростанням темнового зворотнього струму I_{dark} . Значення детективності, отримане для цих діодів, не поступається значенням, які одержано для фотодіодів на основі InGaAs, PbS, PbSe, а також на декілька порядків перевищує відповідні значення для фотодіодів на основі HgCdZnTe [17].

IV. ВИСНОВКИ

Методом електронно-променевого випаровування графіту на підкладку *n*-SiC виготовлено діод Шоттки графіт/*n*-SiC. Досліджено його електричні властивості, встановлено температурну залежність висоти потенціального бар'єра та значення опорів (последовного і шунтувального) за різних температур.

Із аналізу прямих гілок ВАХ діодів Шоттки графіт/*n*-SiC встановлено, що домінантним механізмом струмопереносу в разі малих прямих зміщень ($3kT/e < V < 0.45$ В) є надбар'єрна емісія, у випадку більших прямих зміщень ($V > 0.5$ В) домінантним механізмом струмопереносу є емісійно-рекомбінаційні процеси в ділянці просторового заряду. У разі зворот-

ного зміщення домінантним механізмом струмопереносу через діод Шоттки графіт/*n*-SiC є тунелювання.

Установлено, що в координатах Мотта–Шоттки залежності вимірної ємності є прямолінійними, що свідчить про рівномірний розподіл некомпенсованих донорів у базовому матеріалі. Виявлено слабку залежність нахилу прямолінійних ділянок від частоти, що зумовлено впливом поверхневих електрично активних станів на межі поділу двох напівпровідників з різним характеристичним часом перезарядки.

На основі визначених чутливості (R) та детективності (D^*) встановлено, що досліджувані діоди Шоттки графіт/*n*-SiC можна успішно використовувати як детектори ультрафіолетового випромінювання у фотодіодному режимі роботи.

-
- [1] С. В. Морозов, К. С. Новоселов, А. К. Гейм, Укр. фіз. наук **178**, 776 (2008); <https://doi.org/10.3367/UFNr.0178.200807i.0776>.
- [2] S. Tongay, T. Schumann, X. Miao, B. R. Appleton, A. F. Hebard, Carbon **49**, 2033 (2011); <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.01.029>.
- [3] П. А. Иванов, О. И. Коньков, Т. П. Самсонова, А. С. Потапов, И. В. Грехов, Физ. техн. полупр. **49**, 1558 (2015).
- [4] А. А. Лебедев и др., Журн. техн. физ. **86**, 135 (2016).
- [5] М. Г. Мынбаева, А. А. Лаврентьев, К. Д. Мынбаев, Физ. техн. полупр. **50**, 138 (2016).
- [6] T. J. Anderson *et al.*, Appl. Phys. Express **8**, 041301 (2015); <https://doi.org/10.7567/APEX.8.041301>.
- [7] H. P. Parkhomenko, M. M. Solovan, P. D. Maryanchuk, J. Nano- Electron. Phys. **10**, 02028 (2018); [https://doi.org/10.21272/jnep.10\(2\).02028](https://doi.org/10.21272/jnep.10(2).02028).
- [8] S. Niyogi *et al.*, J. Am. Chem. Soc. **128**, 7720 (2006); <https://doi.org/10.1021/ja060680r>.
- [9] В. В. Брус и др., Физ. техн. полупр. **45**, 1109 (2011).
- [10] M. N. Solovan, V. V. Brus, P. D. Maryanchuk, Semiconductors **48**, 219 (2014); <https://doi.org/10.1134/S1063782614020274>.
- [11] B. L. Sharma, R. K. Purohit, *Semiconductor Heterojunctions* (Pergamon, Oxford, 1974).
- [12] H. P. Parkhomenko, M. N. Solovan, P. D. Maryanchuk, Semiconductors **52**, 859 (2018); <https://doi.org/10.1134/S1063782618070163>.
- [13] Л. С. Берман, *Емкостные методы исследования полупроводниковых приборов* (Наука, Ленинград, 1972).
- [14] S. M. Sze, K. K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices* (Wiley, New York 2007).
- [15] H. Parkhomenko *et al.*, Opt. Eng. **57**, 017116 (2018); <https://doi.org/10.1117/1.OE.57.1.017116>.
- [16] X. Zhang, D. Hu, Z. Tang, D. Ma, Appl. Surf. Sci. **357**, 1939 (2015); <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.09.146>.
- [17] J. P. Long, S. Varadaraajan, J. Matthews, J. F. Schetzina, Opt. Rev. **4**, 251 (2002).

GRAPHITE/*n*-SiC UV DETECTORS FABRICATION BY ELECTRON BEAM EVAPORATION

M. M. Solovan, H. P. Parkhomenko, P. D. Maryanchuk
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,
2, Kotsyubynskogo St., Chernivtsi, UA-58012, Ukraine
e-mail: h.parkhomenko@chnu.edu.ua

Schottky graphite/*n*-SiC diodes were fabricated by deposition of graphite onto an *n*-SiC substrate of $5 \times 5 \times 0.3$ mm in size, by electron beam evaporation in a universal vacuum system Leybold–Heraeus L560 from compressed pellets of graphite powder at a substrate temperature of 650° C. The current-voltage (at different temperatures) and capacitance-voltage characteristics were measured. The resistance values of the series and shunt Schottky diodes graphite/*n*-SiC are determined from the voltage dependence of its differential resistance. The dominant mechanisms of the current transfer through a heterojunction in forward and reverse biases are determined. It has been established that the electric current through the investigated heterostructure under forward bias ($0 \text{ V} < V < 0.5 \text{ V}$) is formed by overbarrier emission; under a higher forward bias ($0.5 \text{ V} < V < 0.8 \text{ V}$), the dominant current transport mechanism is emission-recombinant through the space-charge region. The main current transport mechanism under reverse bias is tunneling through the space-charge region. From the slope of the temperature dependence of the parameter a_0 in the coordinates $\ln a_0 = f(10^3/T)$, the depth of the energy level ($E_D = 0.09$ eV), which is undergoing tunneling. In the Mott–Schottky coordinates, the dependences of the measured capacitance are plotted, which indicates a uniform distribution of uncompensated donors in the base material. A

weak dependence of the slope of the rectilinear sections on the frequency was revealed, which is due to the influence of electrically active surface states at the interface of two semiconductors with different characteristic recharging times. The sensitivity (R) and detectiveness (D^*) are determined. It is established that the studied Schottky graphite/ n -SiC diodes can be successfully used as ultraviolet radiation detectors in the photodiode mode of operation.