

МАТЕРІАЛИ ДЛЯ СЕНСОРІВ

SENSOR MATERIALS

PACS 71.55.Gs, 72.80.Ey, 73.20.Hb, 73.40.Gk, 73.40.Lq, 85.60.Bt, УДК: 621.383.52

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2020.4.216146>

ЕЛЕКТРИЧНІ ТА ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ДІОДІВ ШОТТКІ ГРАФІТ/ n-Si ВИГОТОВЛЕНИХ ЗА МЕТОДИКОЮ «ОЛІВЕЦЬ-НА-НАПІВПРОВІДНИКУ»

П. Д. Мар'янчук¹, М. М. Солован¹, Т. Т. Ковалюк^{1,2}, А. І. Мостовий¹, М. М. Грицюк¹

¹Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
кафедра електроніки і енергетики, 58012, м. Чернівці, Україна

²Charles University in Prague, Faculty of Mathematics and Physics,
Ke Karlovu 5, 121 16 Prague 2, Czech Republic

p.maryanchuk@chnu.edu.ua, m.solovan@chnu.edu.ua, t.kovalyuk@chnu.edu.ua,
a.mostoviy@chnu.edu.ua, m.hrytsiuk1994@gmail.com

ЕЛЕКТРИЧНІ ТА ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ДІОДІВ ШОТТКІ ГРАФІТ/ n-Si ВИГОТОВЛЕНИХ ЗА МЕТОДИКОЮ «ОЛІВЕЦЬ-НА-НАПІВПРОВІДНИКУ»

П. Д. Мар'янчук, М. М. Солован, Т. Т. Ковалюк, А. І. Мостовий, М. М. Грицюк

Анотація. Вперше виготовлені фоточутливі діоди Шотткі графіт/n-Si шляхом рисування тонких плівок графіту на поверхні монокристалічної солі (NaCl) і перенесення їх на монокристалічні пластини n-Si.

Виміряно прямі та зворотні вольт-амперні характеристики діодів Шотткі графіт/n-Si при різних температурах, а також при освітленні білим світлом інтенсивністю $P_{opt} = 80$ мВт/см². Визначено домінуючі механізми струмопереносу через гетероперехід: при прямому зміщенні ВАХ добре описуються в рамках тунельно-рекомбінаційної моделі за участі поверхневих станів, а при зворотному зміщенні протікає невеликий струм витoku через шунтуючий опір.

Встановлено, що при освітленні білим світлом інтенсивністю $P_{opt} = 80$ мВт/см², зворотний струм I_{light} зростає в порівнянні з його величиною у темряві I_{dark} більше, ніж на порядок внаслідок розділення фотогенерованих електрон-діркових пар. З вищесказаного можна зробити висновок що виготовлений діод Шотткі можна використовувати як фоточутливий прилад.

Ключові слова: графіт, кремній, діоди Шотткі, механізми струмопереносу, рекомбінація.

ELECTRICAL AND PHOTOELECTRIC PROPERTIES OF SCHOTTKY DIODES GRAPHITE/n-Si PREPARED BY THE PENCIL-ON-SEMICONDUCTOR METHOD

P. D. Maryanchuk, M. M. Solovan, T. T. Kovaliuk, A. I. Mostovyi, M. M. Hrytsiuk

Abstract. This paper presents the results of studies of the electrical properties photosensitive Schottky diodes graphite/n-Si prepared by the transfer of dry drawn graphite films onto single crystal n-Si.

Forward and reverse I-V characteristics of Schottky diodes graphite/n-Si were measured at various temperatures, as well as with light intensity $P_{opt} = 80 \text{ mW/cm}^2$. The dominating current-transport mechanisms through the heterojunctions was established: at forward bias, it is well described by the tunneling-recombination models via surface states at the graphite/n-Si interface; at reverse bias, was determined to be the small current flows through the shunt resistance.

It was found that the reverse current I_{light} increases by more than an order of magnitude in comparison with its value in the dark I_{dark} due to the separation of photogenerated electron-hole pairs under illumination with white light with an intensity $P_{opt} = 80 \text{ mW/cm}^2$. From the above, it can be conclude that the fabricated Schottky diodes can be use as a photosensitive device.

Keywords: graphite, silicon, Schottky diodes, mechanisms of current transfer, recombination.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИОДОВ ШОТТКИ ГРАФИТ/n-Si ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО МЕТОДИКЕ «КАРАНДАШ-НА-ПОЛУПРОВОДНИКЕ»

П. Д. Марьянчук, М. Н. Солован, Т. Т. Ковалюк, А. И. Мостовой, М. Н. Грыцюк

Аннотация. Впервые изготовлены фоточувствительные диоды Шоттки графит/n-Si путем рисования тонких пленок графита на поверхности монокристаллической соли (NaCl) и переноса их на монокристаллические пластины n-Si.

Измерены прямые и обратные вольт-амперные характеристики диодов Шоттки графит/n-Si при различных температурах, а также при освещении белым светом интенсивностью $P_{opt} = 80 \text{ мВт/см}^2$. Определены доминирующие механизмы токопереноса через гетеропереход: при прямом смещении ВАХ хорошо описываются в рамках туннельно-рекомбинационной модели с участием поверхностных состояний, а при обратном смещении протекает небольшой ток утечки через шунтирующее сопротивление.

Установлено, что при освещении белым светом интенсивностью $P_{opt} = 80 \text{ мВт/см}^2$, обратный ток I_{light} возрастает по сравнению с его величиной в темноте I_{dark} более чем на порядок вследствие разделения фотогенерированных электрон-дырочных пар. Из вышесказанного можно сделать вывод, что изготовленный диод Шоттки можно использовать как фоточувствительный прибор.

Ключевые слова: графит, кремний, диоды Шоттки, механизмы токопереноса, рекомбинация.

Вступ

Останнім часом особливе місце в електроніці займають діоди Шоттки [1] тому, що на відміну від р-n-переходів та гетеропереходів, вони оперують основними носіями заряду та мають відносно мале падіння прямої напруги, малий час відновлення, що визначає їх перспективність для подальшого розвитку високочастотної електроніки [2].

Методи отримання тонких плівок графіту також викликають великий науковий та практичний інтерес, зумовлений унікальними властивостями цих плівок, хорошою електричною провідністю, прозорістю, високими механічними властивостями, високою рухливістю носіїв заряду [3].

Графіт формує бар'єр Шоттки до цілого ряду напівпровідників, зокрема до кремнію. Цей факт є важливим, оскільки кремній є основним матеріалом сучасної напівпровідникової електроніки, силової електроніки та геліоенергетики. Він використовується для виробництва сонячних батарей, високотехнологічного обладнання, електрообладнання та комплектуючих до електроприладів [4].

У свою чергу, графіт має багато переваг по відношенню до традиційних металів. Графіт стійкий до термічної дії, завдяки виключно міцним зв'язкам атомів вуглецю, тому бар'єри Шоттки на основі графіту зберігають випрямляючі властивості при високих температурах. Заміна діодами Шоттки на основі комбінації графіт/n-Si наявних приладів на основі р-n-переходів повинна приводити до збільшення швидкодії приладів високочастотної та силової електроніки [5].

Експериментальна частина

В якості базового матеріалу було використано монокристалічний кремній n-типу провідності з орієнтацією поверхні (100) товщиною 330 мкм. Значення питомого опору і концентрації носіїв заряду в цих кристалах при кімнатній температурі (295 К) становили $\rho = 6 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ і $n = 7,4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, відповідно. Глибина залягання рівня Фермі для базового матеріалу складає ($E_c - E_F = 0,27 \text{ eV}$).

Для виготовлення діодів Шоттки використовується простий і дешевий метод перенесення

нарисованої плівки графіту на напівпровідникові підкладки «олівець-на-напівпровіднику» [6]. Відповідно до цього методу, графітову плівку спочатку рисують на розчинній підкладці (NaCl), а потім переносять на гладку поверхню напівпровідникової підкладки і формують якісний оптичний контакт.

Перед початком нанесення плівок графіту, одна з поверхонь свіжосколотої монокристалічної соляної підкладки (NaCl) механічно шліфується до шорсткості $R_a=0,2 \text{ мкм}$, $R_z=0,23 \text{ мкм}$ та $R_{\text{max}}=1,1 \text{ мкм}$. Однорідна графітова плівка рисується на підготовленій поверхні соляної підкладки за допомогою чистого графітового стержня діаметром 1 мм при постійній силі притиснення в 1 Н. Після цього зразок розміщується на поверхні дистильованої води плівкою графіту вгору. Через певний час соляна підкладка повністю розчиняється, а на поверхні води плаває нарисована тонка плівка графіту. Плаваючу нарисовану плівку графіту перенесли на підкладку n-Si розмірами $5 \times 5 \times 0,5 \text{ мм}$ для виготовлення діодів Шоттки. Плівка графіту після перенесення на підкладку висушується у потоці гарячого повітря $80 \text{ }^\circ\text{C}$ для того, щоб видалити залишки води та сформувати якісний оптичний контакт з гладкою поверхнею підкладки [3].

За допомогою срібної пасти, наносимо фронтальний електричний контакт при кімнатній температурі.

Щоб уникнути рекомбінації на тилівій стороні кремнію і забезпечити хороше збирання фотогенерованих носіїв заряду, були використані підкладки, які мають тилівий контакт з вбудованим внутрішнім полем. Активна площа контакту для досліджуваних діодів Шоттки становить 25 мм^2 .

Результати та їх обговорення

На рис. 1 представлені вольт-амперні характеристики досліджуваних діодів Шоттки графіт/n-Si, виміряні при різних температурах. Досліджувані структури володіли яскраво вираженими діодними характеристиками з коефіцієнтом випрямлення $\approx 10^3$.

Шляхом екстраполяції лінійних ділянок ВАХ до перетину з віссю напруг визначені значення висоти потенціального бар'єру ϕ_0

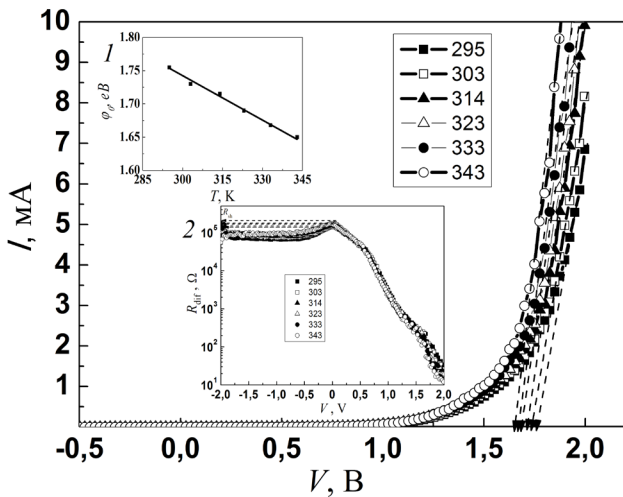


Рис. 1. Вольт-амперні характеристики діодів Шотткі графіт/n-Si. На вставках: 1 – температурна залежність висоти потенціального бар'єру, 2 – залежність диференційного опору діодів Шотткі графіт/n-Si від напруги при різних температурах

діодів Шотткі графіт/n-Si при різних температурах (вставка на рис. 1). Встановлено, що температурна залежність висоти потенціального бар'єру діодів Шотткі графіт/n-Si добре описується рівнянням:

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

де $\varphi_0(0) = 2,39$ eV - значення висоти потенціального бар'єру досліджуваної структури при абсолютному нулі температури, $\beta_\varphi = -2,17 \cdot 10^{-3}$ eV · K⁻¹ – температурний коефіцієнт висоти потенціального бар'єру.

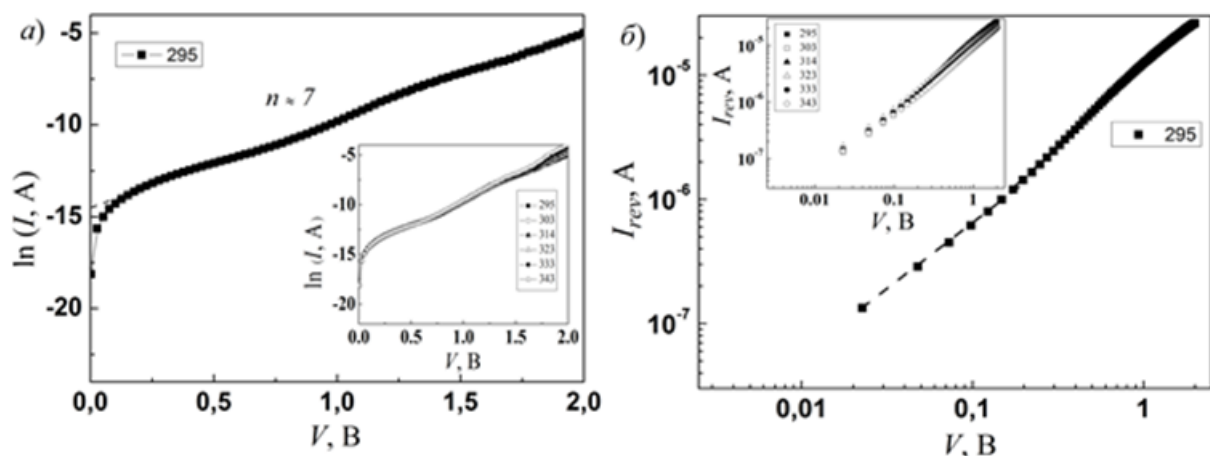


Рис. 2. ВАХ діодів Шотткі графіт/n-Si у напівлогарифмічних та логарифмічних координатах при кімнатній температурі: а) – прямі зміщення; б) – зворотні зміщення. На вставках – ВАХ діодів Шотткі графіт/n-Si при різних температурах

Величину послідовного опору R_s діодів Шотткі графіт/n-Si визначено з нахилу прямолінійних ділянок вольт-амперних характеристик в області напруг більше висоти потенціального бар'єру, де криві $I = f(V)$ переходять з експоненційної залежності в лінійну. Із температурних залежностей диференційного опору діодів Шотткі графіт/n-Si від напруги було визначено значення шунтуючого опору (вставка на рис. 1). Отримані результати представлено у таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри діодів Шотткі графіт/n-Si, визначені при різних температурах.

T, K	R_s , Ом	$R_{sh} \cdot 10^{-5}$, Ом	φ_0 , eV
295	50	1.71	1,75
303	34	1.79	1,73
314	29	1.6	1,71
323	28	1.38	1,69
333	27	1.56	1,67
343	30	1.86	1,65

Механізми струмопереносу в діодах Шотткі графіт/n-Si

Прямі та зворотні гілки вольт-амперних характеристик діодів Шотткі графіт/n-Si у напівлогарифмічних та логарифмічних координатах при кімнатній температурі представлено на рис. 2а та рис.2б, відповідно (на вставках до цих рисунків представлені ВАХ при різних температурах).

В області прямих зміщень, як видно з рисунку 2а, при $V > 3kT/e$ спостерігаються прямолінійні ділянки, що свідчить про експоненційну залежність струму від напруги.

Із нахилу прямолінійних ділянок в області напруг ($3kT/e < V < 1,5$ В) визначено коефіцієнт неідеальності n ($\Delta \ln(I)/\Delta V = e/nkT$, де n – коефіцієнт неідеальності), який приблизно рівний 7. Це підтверджує тунельну природу механізму струмопереносу [7,8]. Проте при малих зміщеннях область просторового заряду ще не достатньо тонка для прямого тунелювання, яке описується формулою Ньюмена. Тому, можна вважати основним механізмом струмопереносу багатоступінчаті тунельно-рекомбінаційні процеси за участю поверхневих станів на межі поділу графіт/n-Si [8].

Невеликий струм витоку при зворотних зміщеннях ($V < 2$ В) визначає нахил ВАХ. Це явище чітко продемонстровано зворотною ВАХ, яка представлена у логарифмічних координатах (log-log) на рис. 2б, де $I \sim V^m$. Визначене із нахилу значення $m = 1$ (рис. 2б), свідчить про протікання невеликого струму витоку через шунтуючий опір.

Вольт-фарадні характеристики діодів Шотткі графіт/n-Si

Вольт-фарадні характеристики діодів Шотткі графіт/n-Si, виміряні при кімнатній температурі при частоті 1 МГц в режимі паралельного RC-кола при малій амплітуді змінного струму, зображено на вставці до рис. 3. Відомо, що частина прикладеного зміщення (постійного струму) спадає на послідовному опорі, тому було враховано його вплив (коректована крива) [9-10].

Побудувавши ВФХ в координатах Мотта-Шотткі $C^2=f(V-IR_s)$ (рис. 3) для виміряної та коректованої ємності при частоті 1 МГц, можна легко бачити дві прямолінійні ділянки з різними нахилами, що свідчить про рівномірний розподіл некомпенсованих донорів у відповідних областях базового матеріалу. Проводячи екстраполяцію лінійних ділянок при малих зворотних зміщеннях до перетину з віссю напруг, можна визначити вели-

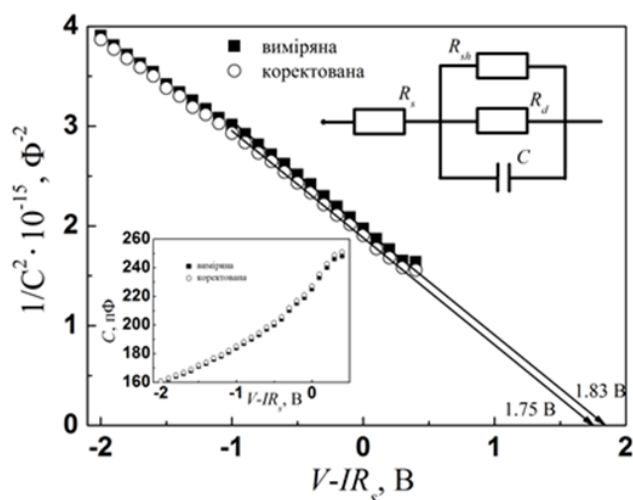


Рис. 3. Вольт-фарадні характеристики діодів Шотткі графіт/n-Si в координатах $1/C^2=f(V-IR_s)$, виміряні при частоті 1 МГц. На вставці – спрощена еквівалентна схема діоду Шотткі графіт/n-Si та вплив послідовного опору на виміряну ємність

чину вбудованого потенціалу, яка складає $V_c = 1,83$ еВ для виміряної кривої, що перевищує величину вбудованого потенціалу, визначеного з ВАХ та $V_c = 1,75$ еВ для коректованої кривої, яка, в свою чергу, добре корелює з величиною вбудованого потенціалу, визначеного з ВАХ досліджуваного діоду Шотткі графіт/n-Si при кімнатній температурі $V_{bi} = 1,75$ еВ.

Отже, потрібно відзначити, що для коректного аналізу ВФХ навіть при високих частотах, коли поверхневі стани вже не реагують на високу частоту, необхідно враховувати вплив послідовного опору.

Фотоелектричні властивості діодів Шотткі графіт/n-Si

На рис. 4 представлено темнові та світлові вольт-амперні характеристики діодів Шотткі графіт/n-Si. Як видно з рисунку, при освітленні білим світлом інтенсивністю 80 мВт/см² зворотний струм I_{light} зростає в порівнянні з його величиною при відсутності освітлення I_{dark} . Визначені із залежності $I=f(V)$ параметри досліджуваних діодів мали наступні значення: напруга холостого ходу $V_{oc} = 0.42$ В, густина струму короткого замикання $J_{sc} = 0.3$ мА/см².

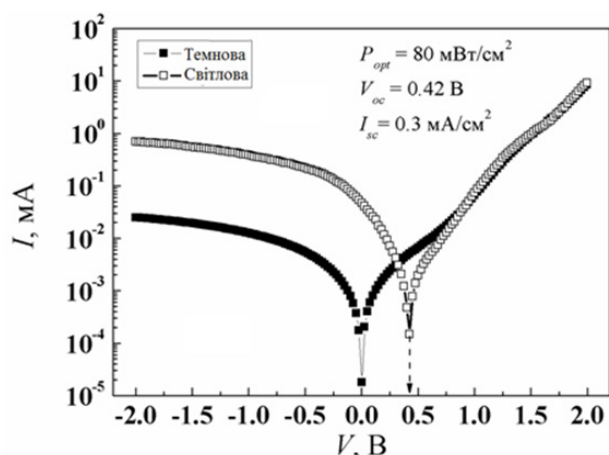


Рис. 4. Темнова і світлова вольт-амперна характеристика діодів Шоттки графіт/n-Si в напівлогарифмічному масштабі

Висновок

Виготовлено фоточутливі діоди Шоттки графіт/n-Si шляхом рисування тонких плівок графіту на поверхні монокристалічної солі (NaCl) з подальшим перенесенням її на підкладки кремнію.

Встановлено, що виготовлені діоди Шоттки графіт/n-Si володіють яскраво вираженими діодними характеристиками з високою потенціальною бар'єру при кімнатній температурі $\phi_0 = 1,75$ eV.

Аналіз прямих гілок ВАХ діодів Шоттки графіт/n-Si, побудованих в напівлогарифмічному масштабі, показав, що, значення показника неідеальності (n) в області напруг $3kT/e < V < 1,5$ В приблизно рівний 7, а це свідчить про те, що домінуючим механізмом струмопереносу можна вважати тунельно-рекомбінаційні процеси за участю поверхневих станів на межі розділу графіт/Si.

Проведений аналіз механізмів струмопереносу через досліджувані діоди Шоттки графіт/n-Si при зворотному зміщенні свідчить про протікання невеликого струму витoku через шунтуючий опір.

Досліджено вплив світла на ВАХ діодів Шоттки графіт/n-Si та встановлено, що при освітлені білим світлом інтенсивністю $P_{opt} = 80$ мВт/см², зворотний струм I_{light} зростає в порівнянні з його величиною у темряві I_{dark} більше ніж на порядок внаслідок розділення

фотогенерованих електрон-діркових пар. З вищесказаного можна зробити висновок, що виготовлені діоди Шоттки графіт/n-Si можна використовувати як фоточутливі прилади.

Список використаної літератури

- [1]. 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).
- [2]. R. T. Tung. Recent Advances in Schottky Barrier Concepts // *Materials Science and Engineering R.*, 3 pp. 1–138 (2001).
- [3]. V. V. Brus, P. D. Maryanchuk. Photosensitive Schottky-type heterojunctions prepared by the drawing of graphite films // *Appl. Phys. Lett.*, 104 pp. 173501 (2014).
- [4]. 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).
- [5]. M. Bhatnagar, P. K. McLarty, and B.J. Baliga. Silicon-carbide high-voltage (400 V) Schottky barrier diodes // *IEEE Electron Device Letters.*, 13 pp. 501–503 (1992).
- [6]. O. Hugh. Handbook of carbon, graphite, diamond, and fullerenes: properties, processing, and applications. Noyes publications, Park Ridge, 417 s. (1993).
- [7]. A. P. Semyonov, A. F. Belyanin, I. A. Semyonova, P. V. Pashenko, Y. A. Barnakov. Thin carbon films: II. Structure and properties // *Technical Physics.*, 49(5) pp. 619–622 (2004).
- [8]. Y. Jung, X. Li, N. K. Rajan, A.D. Taylor, M. A. Reed. Record High Efficiency Single-Walled Carbon Nanotube/Silicon p-n Junction Solar Cells // *Nano Lett.*, 13(1) pp. 95–99 (2013).
- [9]. S. M. Sze, K. Kwok. Physics of semiconductor devices 3rd ed. Wiley, New Jersey, 815 s. (2007).
- [10]. M. M. Solovan, N. M. Gavaleshko, V. V. Brus, A. I. Mostovyi, P. D. Maryanchuk, E. Tresso. Fabrication and investigation of photosensitive MoOx/n-CdTe heterojunctions // *Semiconductor Science and Technology*, 13, art. no. 105006 (2016).

Стаття надійшла до редакції 13.11.2020 р.

ELECTRICAL AND PHOTOELECTRIC PROPERTIES OF SCHOTTKY DIODES GRAPHITE/n-Si PREPARED BY THE PENCIL-ON-SEMICONDUCTOR METHOD

P. D. Maryanchuk¹, M. M. Solovan¹, T. T. Kovaliuk^{1,2}, A. I. Mostovyi¹, M. M. Hrytsiuk¹

¹Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, 58012 Chernivtsi, Ukraine

²Charles University in Prague, Faculty of Mathematics and Physics,
Ke Karlovu 5, 121 16 Prague 2, Czech Republic

Summary

This paper reports the results of an investigation of electrical properties photosensitive Schottky diodes graphite/n-Si prepared for the first time by the transfer of dry drawn graphite films onto single crystal n-Si.

Barrier parameters were determined and C-V characteristics was studied. The dominating mechanisms of current transfer through the heterojunction have been determined: at forward bias is well described within of tunneling-recombination models via surface states at the graphite/n-Si interface, at reverse bias was determined to be the small current flows through the shunt resistance.

It was found that under illumination with white light with an intensity $P_{opt} = 80 \text{ mW/cm}^2$, the reverse current I_{light} increases by more than an order of magnitude in comparison with its value in the dark I_{dark} due to the separation of photogenerated electron-hole pairs. From the above, it can be conclude that the fabricated Schottky diodes can be use as a photosensitive device.

Keywords: graphite, silicon, Schottky diodes, mechanisms of current transfer, recombination.

ЕЛЕКТРИЧНІ ТА ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ДІОДІВ ШОТТКІ ГРАФІТ/ n-Si ВИГОТОВЛЕНИХ ЗА МЕТОДИКОЮ «ОЛІВЕЦЬ-НА-НАПІВПРОВІДНИКУ»

П. Д. Мар'янчук¹, М. М. Солован¹, Т. Т. Ковалюк^{1,2}, А. І. Мостовий¹, М. М. Грицюк¹

¹Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, кафедра електроніки і енергетики, 58012, м. Чернівці, Україна

²Charles University in Prague, Faculty of Mathematics and Physics,
Ke Karlovu 5, 121 16 Prague 2, Czech Republic

Реферат

В даній роботі представлено результати дослідження електричних властивостей фоточутливих діодів Шоттки графіт/n-Si, які були виготовлені шляхом рисування тонких плівок графіту на поверхні монокристалічної солі (NaCl) з подальшим перенесенням їх на монокристалічні пластини n-Si.

Визначені бар'єрні параметри, а також досліджено вольт-фарадні характеристики. Встановлено домінуючі механізми струмопереносу через досліджувані діоди Шоттки: при прямому

зміщенні ВАХ добре описуються в рамках тунельно-рекомбінаційної моделі за участі поверхневих станів, а при зворотному зміщенні протікає невеликий струм витоку через шунтуючий опір.

Встановлено, що при освітленні білим світлом інтенсивністю $P_{opt} = 80$ мВт/см², зворотний струм I_{light} зростає в порівнянні з його величиною у темряві I_{dark} більше, ніж на порядок внаслідок розділення фотогенерованих електрон-діркових пар. З досліджень освітлених ВАХ можна зробити висновок, що виготовлений діод Шотткі можна використовувати як фоточутливий прилад.

Ключові слова: графіт, кремній, діоди Шотткі, механізми струмопереносу, рекомбінація.