

Original article

In print article

<https://doi.org/10.26565/2222-5617-2023-39-05>

UDC 372.853

PACS numbers: 01.40.ha

ЗАСОБИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ НАВЧАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НА ЗАГАЛЬНОМУ ПРАКТИКУМІ З ФІЗИКИ

Ю.В. Литвинов , А.Ю. Федоненко 

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи 4, 61022 Харків, Україна

E-mail: alina.fedonenko@student.karazin.ua

Надійшла до редакції 10 жовтня 2023 р. Переглянуто 17 листопада 2023 р.

Прийнято до друку 25 листопада 2023 р.

У роботі наведено результат модернізації обладнання та методики виконання робіт лабораторного практикуму з загальної фізики. Модернізація виконувалась з метою надання роботам практикуму елементів дослідницької діяльності. На прикладі тематично споріднених лабораторних робіт з розділу «Електрика і магнетизм» показано, що поєднання декількох лабораторних робіт в одне дослідження електрофізичних властивостей напівпровідникових матеріалів дає можливість отримати більш глибокі знання про об'єкт дослідження та сприяє розвитку навичок дослідницької діяльності у студентів – фізиків.

У роботі досліджувались напівпровідникові діоди, виготовлені за різними технологіями: діод Шотткі MBR2045, високовольтний р – і – n діод STTH6012 та діод з р – n переходом D92 – 02. Дослідження складалось з вивчення вольт – амперних, вольт – фарадних характеристик та температурних залежностей зворотного струму кожного із вказаних виробів. Результати вимірювань оброблялись з використанням сучасних теоретичних моделей напівпровідників.

Обладнання та навички, отримані студентами при виконанні таких комплексних лабораторних робіт, можуть бути використані в дослідницькій роботі за наявності відповідних завдань.

Ключові слова: напівпровідник, діод Шотткі, бар'єрна ємність, концентрація носіїв заряду, ширина забороненої зони, лабораторний практикум із загальної фізики.

Як цитувати: Ю.В. Литвинов, А.Ю. Федоненко. Засоби та методика проведення навчальних досліджень на загальному практикумі з фізики. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Фізика». Вип. 39, 2023, 60–66. <https://doi.org/10.26565/2222-5617-2023-39-05>

In cites: Y.V. Litvinov, A.Y. Fedonenko. Means and methods of conducting educational research at the general practicum in physics. Journal of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Physics. Iss. 39, 2023, 60–66. <https://doi.org/10.26565/2222-5617-2023-39-05> (in Ukrainian).

Напівпровідникові матеріали є основою сучасної електроніки. Технології виробництва напівпровідникових приладів передбачають не тільки модифікацію вихідних матеріалів з метою надання потрібних властивостей, а й безліч технічних рішень з їх виготовлення, що враховується змістом освіти майбутніх інженерів – фізиків. Вивчення методів дослідження властивостей і самих властивостей напівпровідників є актуальним навчальним завданням [1]. В роботі досліджувались напівпровідникові діоди, виготовлені за різними технологіями: діод Шотткі MBR2045, високовольтний р – і – n діод STTH6012 та діод з р – n переходом D92 – 02. Декілька лабораторних робіт були поєднані в одне дослідження. Передбачалося, що такий підхід до вивчення напівпровідників сприяє формуванню всебічних знань про об'єкт дослідження та розвитку у студентів – фізиків навичок дослідницької діяльності.

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Дослідження проводились методами вивчення вольт – амперних характеристик (ВАХ), вольт – фарадних характеристик (ВФХ) та температурних залежностей зворотного струму діодів.

За ВАХ визначалися статичні та диференціальні параметри напівпровідникових приладів у будь – якій точці залежності, механізм провідності переходу, тип та механізм пробою. Напівлогарифмічна залежність струму від прикладеної напруги $\ln(I) = f(U)$ повинна бути лінійною й не залежати від частоти. Аналогічна вимога накладається й на залежності ємності від прикладеної напруги у координатах $C - U$, $C_B^{-k} = f(U_{зв})$. ВФХ напівпровідникового пристрою дозволяє визначити ряд параметрів напівпровідникових матеріалів: тип провідності, концентрацію легуючих домішок N_B , характеристики глибоких рівнів, генераційний час життя нерівноважних носіїв заряду, густину поверхневих станів та їх розподіл за енергіями, товщину діелектрика, напругу плоских зон [2]. Метод ВФХ засновано на залежності ширини області просторового заряду (ОПЗ) діоду від прикладеної напруги зміщення.

Щодо останнього зі згаданих методів, за температурною залежністю зворотного струму можна визначити енергію активації ΔE_α та механізм зворотного струму. Енергія активації температурної залежності дифузійного струму повинна дорівнювати енергії ширини забороненої зони $\Delta E_\alpha = E_g$. Експеримент часто показує інший результат: значення енергії активації ΔE_α виявляється меншою від E_g , але більшою за половину ширини забороненої зони: $0.5E_g < \Delta E_\alpha < E_g$.

Температурна залежність сили зворотного струму була отримана при сталому значенні зворотної напруги $U = 12$ В в температурному діапазоні від 30 °С до 90 °С. Досліджуваний діод було поміщено в калориметр.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

1. Вивчення вольт – амперних характеристик діодів

Для визначення механізмів переносу заряду у різних типах напівпровідникових приладів були зняті ВАХ для чотирьох зразків: для двох діодів D92 різних фірм та років виготовлення, діоду Шотткі MBR2045 та високовольтного діоду STTH6012.

За експериментальними даними побудовано прямі гілки для досліджуваних діодів. Графіки залежності прямого струму від прямого зміщення наведено на рис. 1. Пунктирними лініями екстрапольовано лінійну ділянку прямої гілки ВАХ до перетину з віссю напруги. Точка перетину визначає контактну різницю потенціалів (з точністю до теплового потенціалу) [2]. Для досліджуваних діодів відповідно отримано значення контактної різниці потенціалів: $U_{K,1} = U_{K,2} = 0.39$ В, $U_{K,3} = 0.205$ В, $U_{K,4} = 0.746$ В, де індекс вказує номер зразка.

Графіки залежності для зразків 1 та 2 співпадають.

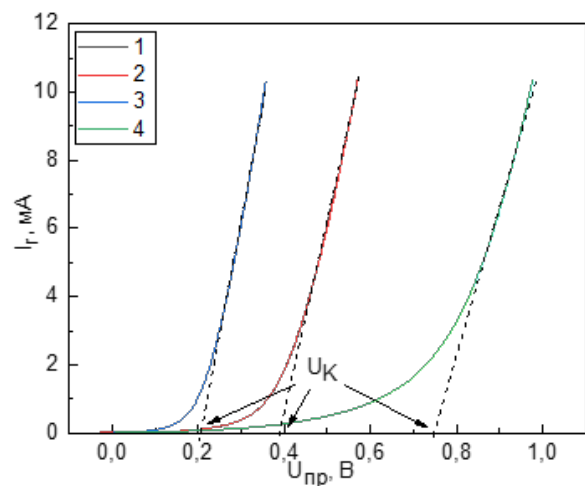


Рис. 1. Графіки залежності прямого струму від напруги $I_r(U_{пр})$ для зразків 1–4 досліджуваних діодів. Пунктиром показано екстраполяцію до перетину з віссю напруги.

Fig. 1. Dependence of direct current on voltage $I_r(U_{пр})$ for samples 1–4 of the investigated diodes. The dotted line shows the extrapolation to the intersection with the stress axis.

З графіку залежності $I_r(U_{пр})$ видно, що при $U > k_B T/q$ спостерігаються прямолінійні ділянки, що апроксимовані прямою [2].

На рисунку 2 наведено залежність прямого струму від напруги у напівлогарифмічних координатах $\ln I_r(U_{пр})$. Фактор неідеальності для кожної з прямолінійних ділянок, згідно з [2], обчислюється за формулою:

$$m = \frac{q}{k_B T} \frac{U_2 - U_1}{\ln \frac{I_2}{I_1}}, \quad (1)$$

де k_B – стала Больцмана, $T = 295$ К – температура, при якій проводилися вимірювання, q – заряд електрона, U_2, U_1 та I_2, I_1 – значення прямої напруги та прямого струму, визначені з графіка залежності прямого струму від напруги у напівлогарифмічних координатах $\ln I_r(U)$.

Значення фактору неідеальності дозволить зробити висновок про основну складову струму на даному рівні інжекції.

Значення m близькі до 2 вказують на переважання генераційного механізму провідності, який є характерним для діодів при малих значеннях прикладеної напруги.

У [2, 3] відзначається, що великі значення ($m > 2$) характеризують тунельний механізм протікання струму. З графіку видно, що зміна механізмів відбувається зі збільшенням напруги. Вірогідно, для зразка 4 механізм переносу заряду є тунельним $m = 2.8$, що є характерним для широких р – n переходів. Найтонший перехід серед досліджуваних діодів характерний для діоду Шоттки, що впливає на низьке, порівняно з іншими, значення фактору неідеальності в області низьких напруг. Зі збільшенням значення струму m зростає за рахунок спаду напруги на опорі бази. Екстраполяція зазначених лінійних ділянок до перетину з віссю ординат визначає відповідні струми насичення для тунельного механізму та механізму рекомбінації.

Графіки зворотних гілок ВАХ у координатах $I_{об}(U_{зв})$ для досліджуваних діодів наведено на рисунку 3. Згідно до дифузійної теорії зворотній струм повинен виходити до насичення, чого на отриманих залежностях не спостерігається. Цей факт можна пояснити особливостями матеріалу діодів: у германієвих діодах спостерігається насичення зворотної гілки ВАХ, а у діодах на основі кремнію зворотній струм не насичується.

Екстраполяція зазначених лінійних ділянок до перетину з віссю ординат визначає відповідні струми насичення для тунельного механізму – I_{t0} та механізму рекомбінації – I_{rec0} .

Дані обчислень показані в таблиці 1.

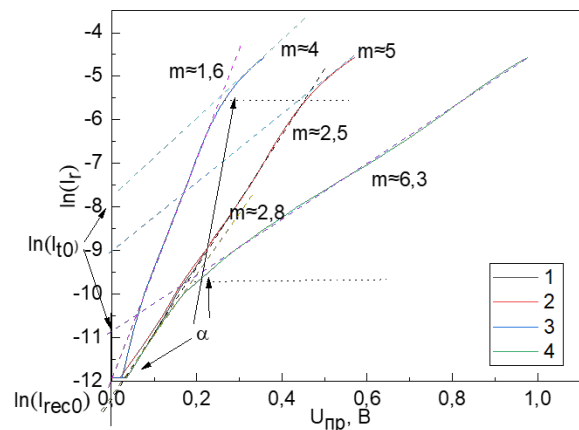


Рис. 2. Графік залежності прямого струму від напруги у напівлогарифмічних координатах $\ln I_r(U)$ для зразків 1–4. Пунктиром підкреслено лінійні ділянки залежності, кожна з яких характеризує механізм провідності діоду в певному інтервалі напруги. Стрілками вказані значення струмів насичення для механізму рекомбінації I_{rec0} та тунельного механізму I_{t0} .

Fig. 2. Dependences of direct current on voltage in semi – logarithmic coordinates $\ln I_r(U)$ for samples 1–4. Linear sections of dependence, each of which characterizes the mechanism of diode conduction in a certain voltage range, are underlined with a dotted line. Arrows indicate values of saturation currents for the recombination mechanism I_{rec0} and the tunneling mechanism I_{t0} .

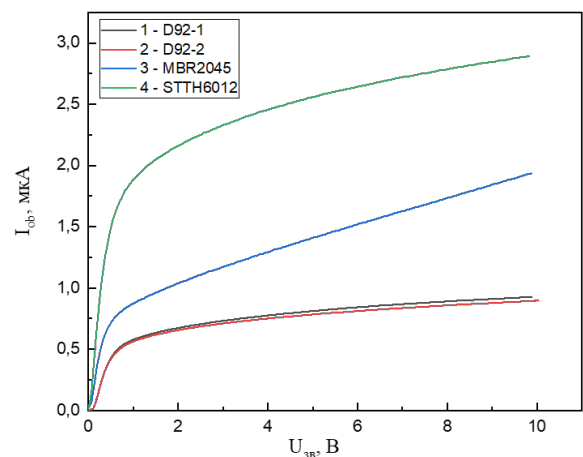


Рис. 3. Зворотні гілки ВАХ для зразків 1–4, побудовані за результатами експерименту.

Fig. 3. Reverse branches of the $I - V$ curve for samples 1–4, built according to the results of the experiment.

Таблиця 1.

Значення струмів насичення для рекомбінаційного I_{rec0} та тунельного I_{t0} . механізмів провідності зразків 1–4.

№ зразка	I_{rec0} , мкА	I_{t0} , мкА
1	4.140	119.53
2	4.140	119.53
3	6.174	423.55
4	4.230	19.40

2. Вивчення вольт – фарадних характеристик діодів

Графік залежності бар’єрної ємності від напруги зміщення діоду Шоттки, побудований за результатами експерименту, показаний на рисунку 4.

Вольт – фарадна характеристика у логарифмічних координатах $\lg C_B = f(\lg(U + U_K))$ є прямою і використовується для визначення типу переходу: якщо тангенс кута нахилу $\text{tg } \alpha$ дорівнює 0.5, то перехід є різким, якщо $\text{tg } \alpha = 1/3$ – перехід плавний. У випадку різкого переходу будують залежність ємності від напруги у координатах $C^{-2}(U_{зв})$ та за тангенсом його нахилу визначають концентрацію легуючої домішки [2]:

$$\text{tg } \alpha = \frac{2}{\epsilon\epsilon_0 N_B q S} = \frac{\Delta(C_B^{-2})}{\Delta U_{зв}}, \quad (2)$$

де ϵ – відносна діелектрична проникність напівпровідника, ϵ_0 – діелектрична стала, S – площа контакту досліджуваного діоду.

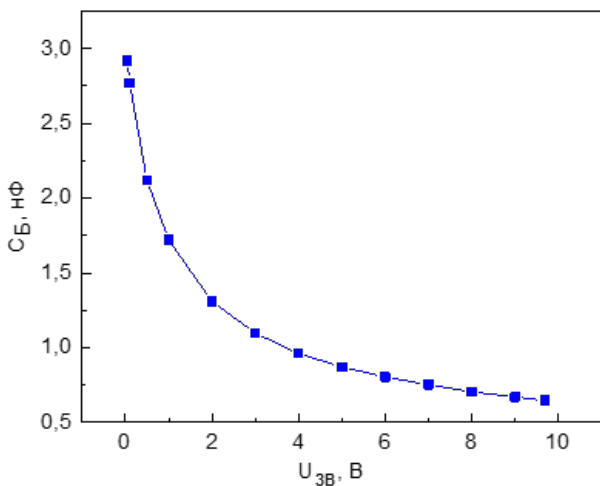


Рис. 4. Графік залежності бар’єрної ємності від зворотної напруги $C_B = f(U_{зв})$ для діоду Шоттки.

Fig. 4. Dependence of the barrier capacity on the reverse voltage $C_B = f(U_{зв})$ for the Schottky diode.

Якщо ж перехід плавний, за нахилом залежності $C_B^{-3}(U_{зв})$ визначається градієнт концентрації домішки в базі $a = \frac{dN_B}{dx} = N_B'$:

$$\text{tg } \alpha = \frac{12}{(\epsilon\epsilon_0)^2 N_B' q S} = \frac{\Delta(C_B^{-3})}{\Delta U_{зв}}. \quad (3)$$

Графік залежності $\lg C_B = f(\lg(U_{зв}))$ наведено на рисунку 5. За значенням тангенсу нахилу можна визначити характер досліджуваного переходу. Значення $n = \text{tg } \alpha \approx 0.5$ свідчить про те, що перехід є різким. З рисунка 5 видно, що теорія [2] передбачає результат при великих зміщеннях, а при малих зміщеннях спостерігається відхилення від лінійної залежності [4].

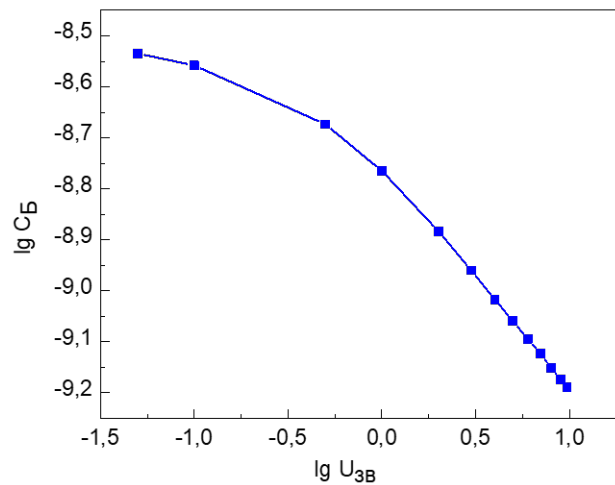


Рис. 5. Графік залежності бар’єрної ємності від зворотної напруги у логарифмічних координатах $\lg C_B = f(\lg(U_{зв}))$ для діоду Шоттки.

Fig. 5. Dependence of the barrier capacitance on the reverse voltage in logarithmic coordinates $\lg C_B = f(\lg(U_{зв}))$ for a Schottky diode.

Концентрацію домішок в базі та контактну різницю потенціалів визначають за нахилом залежності $C^{-2}(U_{зв})$ та точкою перетину з віссю абсцис відповідно [4]. На рисунку 6 показано графік залежності $C^{-2}(U_{зв})$. Прямолінійні ділянки свідчать про рівномірний розподіл домішок в матеріалі бази [2, 3].

За результатами обчислень отримано значення дифузійного потенціалу $U_K = 0.5$ В, що збігається з результатами досліджень Si – Al контакту інших авторів.

Для різкого переходу концентрація легуючої домішки N_B , враховуючи розміри та матеріал (кремній $\epsilon = 12$) діоду, обчислюється за формулою:

$$N_B = \frac{2}{\varepsilon\varepsilon_0 \alpha q S^2} = \frac{2}{\varepsilon\varepsilon_0 \frac{\Delta(C_B^{-2})}{\Delta U_{3B}} q S^2}. \quad (4)$$

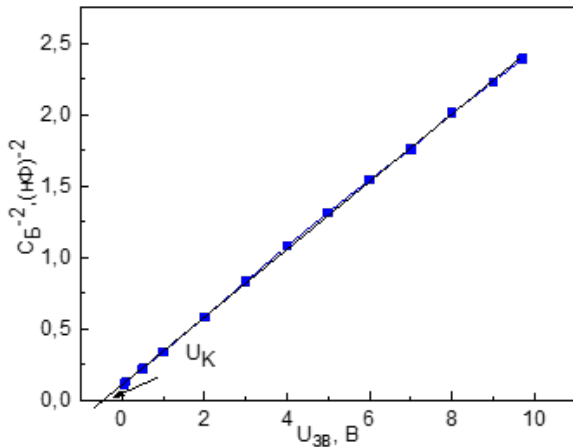


Рис. 6. Графік залежності бар'єрної ємності від зворотної напруги у координатах $C_B^{-2}(U_{3B})$ для діоду Шоттки.

Fig. 6. Dependence of the barrier capacitance on the reverse voltage in the coordinates $C_B^{-2}(U_{3B})$ for the Schottky diode.

За результатами роботи, викладеними у [5], нелінійність графіка може бути пояснена надлишковою ємністю, а концентрацію носіїв заряду n_i можна обчислити за формулою:

$$U_K = \frac{2k_B T}{q} \ln \frac{N_B}{n_i}, \quad (5)$$

$$n_i = N_B e^{-\frac{qU_K}{2k_B T}}. \quad (6)$$

Визначимо ширину забороненої зони E_g з урахуванням ефективних мас носіїв ($m_n^* = 1.08 m_e$, $m_p^* = 0.56 m_e$, де m_e – маса електрона) для кремнію:

$$n_i = 4.9 \times 10^{15} \left(\frac{m_n^* m_p^*}{m_e^2} \right)^{\frac{3}{4}} T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}}, \quad (7)$$

$$E_g = 2k_B T \ln \frac{4.9 \times 10^{15}}{n_i} \left(\frac{m_n^* m_p^*}{m_e^2} \right)^{\frac{3}{4}} T^{\frac{3}{2}}. \quad (8)$$

Вище викладена задача вирішується якщо значення площі контакту метал – напівпровідник відоме. Оскільки в нашому випадку вивчалися промислові електронні компоненти, площа контакту яких невідома, пропонується розв'язати зворотну задачу: знайти площу контакту за відомою шириною забороненої зони E_g .

Табличне значення ширини забороненої зони для кремнію $E_g = 1.12$ еВ. Враховуючи це, знайдемо концентрацію носіїв заряду:

$$n_i = 4.9 \times 10^{15} \left(\frac{m_n^* m_p^*}{m_e^2} \right)^{\frac{3}{4}} T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}}. \quad (9)$$

Отримане значення становить: $n_i = 4.706 \times 10^9$ см⁻³.

Далі визначимо концентрацію домішок у базі:

$$N_B = n_i e^{\frac{qU_K}{2k_B T}}. \quad (10)$$

$N_B = 8.706 \times 10^{13}$ см⁻³.

Тоді площа контакту:

$$S = \sqrt{\frac{2}{\varepsilon\varepsilon_0 \frac{\Delta(C_B^{-2})}{\Delta U_{3B}} N_B q}}. \quad (11)$$

Значення площі переходу досліджуваного діоду Шоттки, обчислене за формулою (11), складає $S = 2.39$ мм², що добре корелює із значенням, вказаним у технічній документації виробника [6].

3. Температурні характеристики зворотного струму діоду Шоттки

Залежність зворотного струму від температури діоду визначається експонентою:

$$I_{ob} \sim e^{-\frac{E_g}{k_B T}}. \quad (12)$$

Звідси енергію його активації можна визначити за тангенсом кута нахилу залежності $\ln I_{ob}(1/T)$:

$$\Delta E_a = k_B \frac{\Delta \ln(I_{ob})}{\Delta \left(\frac{1}{T}\right)}. \quad (13)$$

Графік температурної залежності зворотного струму $I_{ob}(T)$ наведено на рисунку 7.

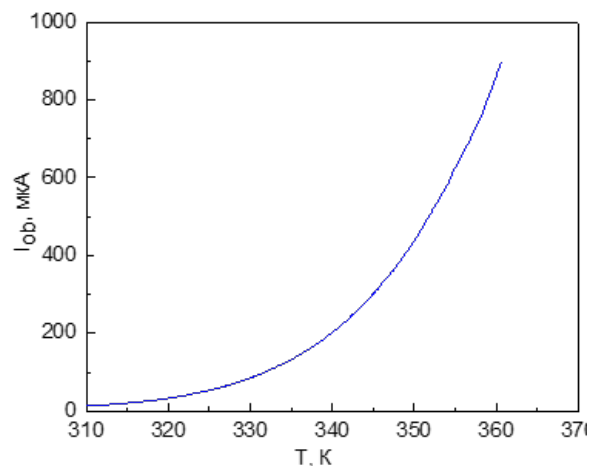


Рис. 7. Графік температурної залежності зворотного струму $I_{ob}(T)$ для діоду Шоттки.

Fig. 7. Temperature dependence of the reverse current $I_{ob}(T)$ for the Schottky diode.

За експериментальними даними побудовано графіки залежності логарифму зворотного струму від зворотної температури $\ln I_{ob}(1/T)$ – рисунок 8. За кутом нахилу даної залежності було визначено енергію активації зворотного струму ΔE_{α} для трьох обраних температурних ділянок з використанням співвідношення:

$$\Delta E_{\alpha} = k_B \frac{\Delta \ln(I_{ob})}{\Delta \left(\frac{1}{T}\right)}. \quad (14)$$

Результати обчислень подано у таблиці 2.

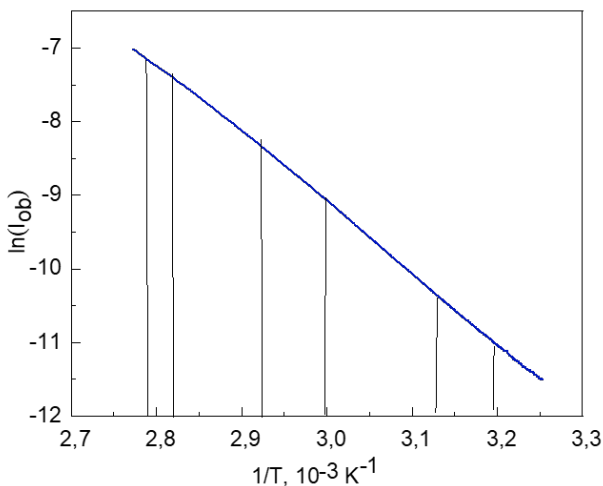


Рис. 8. Графік температурної залежності зворотного струму в напівлогарифмічних координатах $\ln I_{ob}(1/T)$ для діода Шотткі.

Fig. 8. Temperature dependence of the reverse current in semi – logarithmic coordinates $\ln I_{ob}(1/T)$ for the Schottky diode.

Таблиця 2.

Енергія активації зворотного струму діоду Шотткі в трьох температурних інтервалах.

Температурний інтервал $\Delta \left(\frac{1}{T}\right) 10^{-3}, K^{-1}$	$\Delta \ln(I_{ob})$	$\Delta E_{\alpha}, eV$
0.029	0.216	0.686
0.070	0.730	0.890
0.068	0.640	0.800

За значенням ΔE_{α} можна визначити механізм виникнення зворотного струму. Для кремнію значення

ширини забороненої зони складає $E_g = 1.12$ eV. З таблиці 1 видно, що значення енергії активації для усіх розглянутих температурних інтервалів лежить в інтервалі $0.5E_g < \Delta E_{\alpha} < E_g$. Отже, згідно з описаною вище теорією, для досліджуваного діоду процес генерації електронів та дірок через рівні глибоких центрів визначає механізм виникнення зворотного струму.

На графіку залежності $\ln I_{ob}(1/T)$ спостерігається злам з підвищенням температури, що може вказувати на зміну механізму протікання струму: за низьких температур переважає генераційна складова струму, а з ростом температури механізм буде змінюватися на дифузійний.

ВИСНОВКИ

У статті наведено приклад вдосконалення робіт лабораторного практикуму із загальної фізики з метою підвищення їх ефективності. Показано, що поєднання декількох тематично споріднених робіт лабораторного практикуму в одне поглиблене дослідження зразків різними методами та обробка результатів вимірювань з використанням сучасних теоретичних моделей сприяють формуванню знань про об'єкт дослідження та розвитку навичок експериментальної діяльності.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

REFERENCES

1. Deen M.J., Pascal F. J. Mater Sci: Mater Electron, 17, 549 (2006). <https://doi.org/10.1007/s10854-006-0001-8>
2. G.O. Andrushchak, A.I. Mostoyi, T.T. Kovaliuk, V.V. Brus, P.D. Maryanchuk. Semiconductors, 52, 236 (2018). <https://doi.org/10.1134/S1063782618020185>
3. H. P. Parkhomenko, P. D. Maryanchuk. Technology and design in electronic equipment, 4-5, 29 (2016). <https://doi.org/10.15222/TKEA2016.4-5.29>
4. F. Boulgamh, A. Teliа, M. Remram, A. Djouambi Abdelbaki. In 7th WSEAS Int. Conf. on Mathematical Methods and Computational Techniques in Electrical Engineering, Sofia, 27-29/10/05 (2005), p. 245.
5. C. Yim, N. McEvoy, E. Rezvani, E. Kumar. Small, 8, 1360-4 (2012). <https://doi.org/10.1002/sml.201101996>
6. M. Adamowicz, S. Giziewski, J. Pietryka, Z. Krzeminski. IEEE Compatibi and Power Electron, (CPE), 144 (2011). <https://doi.org/10.1109/CPE.2011.5942222>

MEANS AND METHODS OF CONDUCTING EDUCATIONAL RESEARCH AT THE GENERAL PRACTICUM IN PHYSICS

Y.V. Litvinov, A.Y. Fedonenko

V.N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sq., 61022 Kharkiv, Ukraine

E-mail: alina.fedonenko@student.karazin.ua

Received on October 10, 2023. Reviewed on November 17, 2023.

Accepted for publication on November 25, 2023.

The work presents the result of modernization of the equipment and methods of performing the work of the general physics laboratory practice. Modernization was carried out with the aim of giving the work of the workshop elements of research activity. Using the example of thematically related laboratory works from the section "Electricity and Magnetism", it is shown that the combination of several laboratory works into one study of the electrophysical properties of semiconductor materials provides an opportunity to gain deeper knowledge about the object of research and contributes to the development of research activity skills of physics students. The work investigated semiconductor diodes manufactured using different technologies: Schottky diode MBR2045, high-voltage p – i – n diode STTH6012 and diode with p – n junction D92 – 02. The study consisted of studying volt-ampere, volt-farad characteristics and temperature dependences of the reverse current of each of the specified products. The measurement results were processed using modern theoretical models of semiconductors. The equipment and skills acquired by students during the performance of such complex laboratory work can be used in research work if there are appropriate tasks.

Keywords: *semiconductor, Schottky diode, barrier capacitance, concentration of charge carriers, band gap, laboratory workshop on general physics.*