

Олег КШЕВЕЦЬКИЙ, Юрій ДОБРОВОЛЬСЬКИЙ, Ростислав ДЯЧУК

Україна, м. Чернівці, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

E-mail: y.dobrovolsky@chnu.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВАХ Si-ФОТОДІОДІВ В ОБЛАСТІ МАЛИХ СТРУМІВ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ

За допомогою розробленого комп'ютеризованого вимірювального комплексу досліджено динамічні вольт-амперні характеристики фотодіодів в області малих струмів для випадку, коли фотодіод є ділянкою високоомного електричного кола. Показано, що фотодіоди проявляють гістерезис значень струму, причому тим більший, чим більша швидкість зміни напруги. Отримані результати можуть бути використані для відбору прецизійних фотодіодів, призначених для фотометрії малих потоків оптичного випромінювання.

Ключові слова: фотодіод, темновий струм, вольт-амперна характеристика, вимірювання, програмна інженерія.

Вольт-амперні характеристики (ВАХ) кремнієвих фотодіодів, як і усіх інших приладів з $p-n$ -переходами, дозволяють визначити їхню якість [1], а для фотодіодів ВАХ також дозволяє оцінити виявну здатність приладу. Попри наявність стандартних методик та різноманітних способів та методів їх покращення [2–5] питання точного та коректного вимірювання вольт-амперних характеристик фотодіодів залишається актуальним завданням сучасної вимірювальної техніки. Зазвичай, вимірювання ВАХ фотодіодів зводиться до вимірювання падіння напруги на певному резисторі [2] або до використання так званих перетворювачів струм-напруга [6], в яких це перетворення здійснюється за допомогою спеціалізованих мікросхем. Останніми десятиліттями вимірювання та оцінювання ВАХ напівпровідникових приладів (зокрема, фотодіодів [7–14]) проводиться за допомогою електронно-обчислювальної техніки [11, 15], що спрощує оброблення результатів, але водночас створює проблему точного моделювання процесу вимірювання.

В умовах розроблення та виробництва фотодіодів темнові струми досліджуються, як правило, з метою досягнення певного рівня цих струмів, глибокого ж дослідження механізмів генерації темнового струму зазвичай не проводиться. Отже, перед дослідниками постає питання — як поводитися темнові струми фотодіода, а саме — якою є динаміка їхніх малих значень (на рівні 10^{-9} А), коли фотодіод є ділянкою високоомного електричного кола.

Метою цієї роботи було дослідження динамічних вольт-амперних характеристик зразків кремнієвих фотодіодів в області малих струмів за допомогою розробленого комп'ютеризованого вимірювального комплексу.

Методика проведення досліджень

Для проведення досліджень спочатку було проведено тестування розробленої та виготовленої нами спеціалізованої комп'ютеризованої установки на прикладі отримання та аналізу ВАХ кремнієвих фотодіодів типу УФД-337 [16]. Методика вимірювань темнового струму у цілому відповідає вимогам стандартних методик, описаних, наприклад, у [17], але із суттєвим доопрацюванням, описаним нижче.

Темновий струм фотодіодів вимірювався при зміщенні на переході від 10 мВ до 10 В, як вказано у його паспорті [16].

Методика дослідження пояснюється схемою розробленої установки з використанням комп'ютерного вимірювального комплексу ІТМ (рис. 1) з оригінальним програмним забезпеченням, створеним методом програмної інженерії, яке дозволяє управляти режимом вимірювання (кількістю вимірів за секунду, діапазоном вимірювань), створювати графічне представлення результатів вимірювання та базу даних за результатами вимірювання.

За допомогою батареї $GB1$, $GB2$, перемикача $SA1$, резисторів $R1$, $R2$ та конденсатора $C1$ формується напруга, плавно змінювана у часі. Швидкість змінювання напруги можна регулювати змінним резистором $R1$. Резистор $R2$ призначено для обмеження струму. Для вимірювання сили струму через фотодіод $VD1$ роль наноамперметра відіграють паралельно з'єднані датчик $PA1$ та резистор $R3$ (шунт). Внутрішній опір датчика $PA1$ становить понад 100 ГОм, що значно перевищує величину опору $R3$, а значення сили струму при цьому отримується за величиною спаду напруги на відомому резисторі $R3$. Калібрування датчика $PA1$ відповідає конкретному значенню опору $R3$. Максимально можливий струм через фотодіод $VD1$

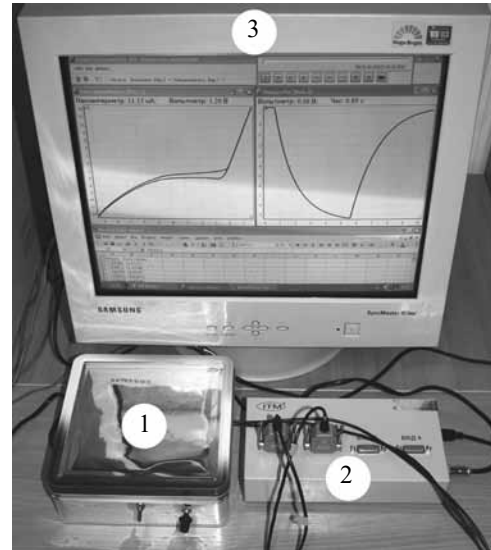
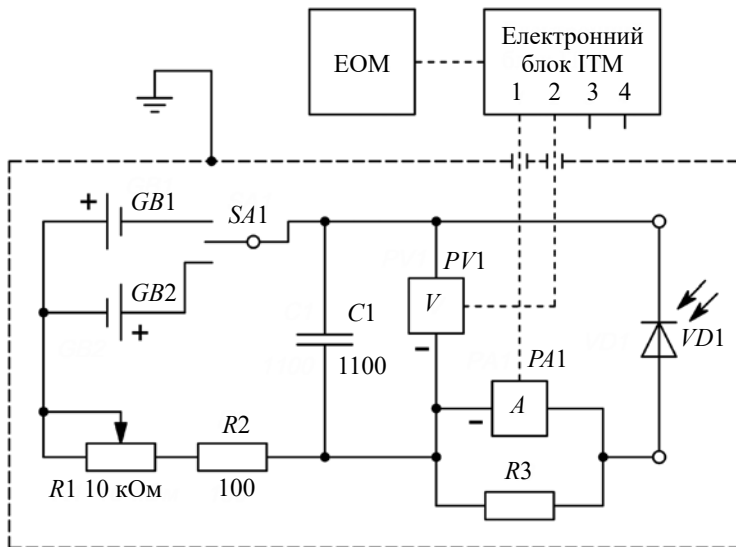


Рис. 1. Схема та фотографія установки для отримання ділянки ВАХ фотодіодів в області малих струмів:
1 — вимірювальна приставка в заземленому металевому корпусі; 2 — електронний блок ITM; 3 — монітор EOM

залежить в основному від максимального значення напруги, що подається на конденсатор $C1$, і величини $R3$. Для реєстрації напруги, що подається на послідовно з'єднані фотодіод і “наноамперметр”, використовується датчик $PV1$. (Екранування та датчики показано на рисунку умовно, лише для ілюстрації загального принципу дії установки, конкретні схеми датчиків $PA1$ та $PV1$ та способи екранування на рисунку не відображено.)

До складу вимірювальної приставки 1, що міститься в заземленому металевому корпусі, входять елементи схеми $GB1$, $GB2$, $SA1$, $R1$, $R2$, $C1$, $R3$, деякі елементи датчика $PA1$ та досліджуваний фотодіод $VD1$. Датчики $PA1$ та $PV1$ також під'єднані до відповідних входів електронного блоку ITM. До складу електронного блоку входять, зокрема, 16-розрядний аналого-цифровий перетворювач та мікро-ЕОМ. Електронний блок своєю чергою під'єднаний до ЕОМ (персонального комп'ютера). Комп'ютерний вимірювальний комплекс (ЕОМ, електронний блок ITM, датчики $PA1$ та $PV1$, програмне забезпечення ITMlab) дозволяє вимірювати значення напруги та сили струму через мінімальний інтервал часу 200 мкс. Отримані дані можуть відображатися у числовому вигляді на екрані комп'ютера або у вигляді графіків. Експериментальні дані також можна експортувати до Excel для подальшої обробки.

Результат експерименту відображається на екрані комп'ютера у вигляді залежності сили струму через фотодіод (реєструє датчик $PA1$) від напруги, що подається на послідовно з'єднані фотодіод і резистор $R3$ (реєструє датчик $PV1$). Для отримання ВАХ діода необхідно визначити напругу безпосередньо на діоді, що легко зробити після експортування експериментальних даних в Excel (необхідно відняти від напруги, яку реєструє $PV1$, напругу на резисторі $R3$).

Тестування вимірювального комплексу

Як зазначалося вище, тестування створеного комплексу здійснювалося шляхом вимірювання динаміки темнових струмів фотодіода типу ФД 337. Це кремнієвий фотодіод на основі кремнію n -типу провідності з питомим опором близько 1 кОм. Відтак, його зворотний струм, виміряний при зміщенні 10 мВ, має складати не більше 10–10 А, при зміщенні 10 В — не більше $5 \cdot 10^{-8}$ А.

На рис. 2–4 представлено екранні копії тестування комплексу з отриманими ВАХ фотодіодів. На всіх трьох рисунках справа наведено графіки зміни прикладеної напруги у часі, а зліва — відповідні залежності сили струму від прикладеної напруги (ВАХ).

Дані на рис. 2 отримано для розірваного кола, до якого прикладається напруга, що поступово змінюється протягом понад 10 с: від +1,5 В до –9 В (близько до 9-ї секунди) і далі у зворотному напрямку до –4,63 В. На відповідній ВАХ, що відображена зліва, видно рівень шумів установки (близько 0,02 нА) та незначний гістерезис (близько 0,0025 нА в момент часу 10,32 с). (Для ідеальної установки має бути пряма горизонтальна лінія в нулі.)

Результати, представлені на рис. 3, отримані у випадку, коли до комплексу був підключений активний опір 175 МОм. ВАХ резистора являє собою чітку пряму лінію. Лінії ВАХ, що відповідають зменшенню та збільшенню прикладеної до резистора напруги, зливаються (гістерезис та шуми дуже незначні порівняно з інтервалом зміни сили струму).

Результати вимірювань, коли до комплексу послідовно під'єднуються активний опір 100 МОм (шунт “наноамперметра”) і конденсатор 270 пФ, встановлений замість діода, представлено на рис. 4. На ВАХ добре видно гістерезис, зумовлений наявністю конден-

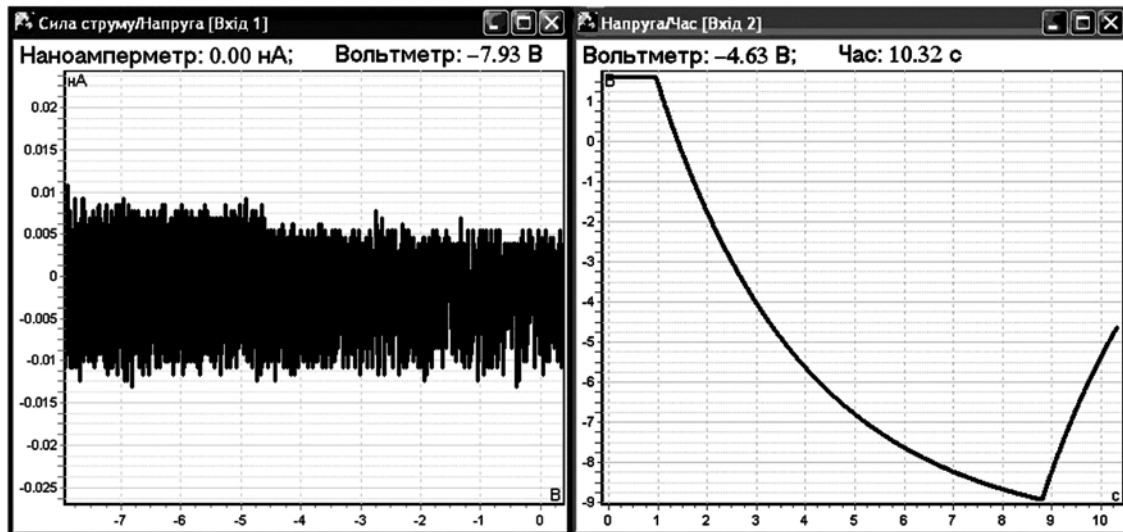


Рис. 2. Результати, отримані для розімкненого кола (фотодіод не під'єднано)

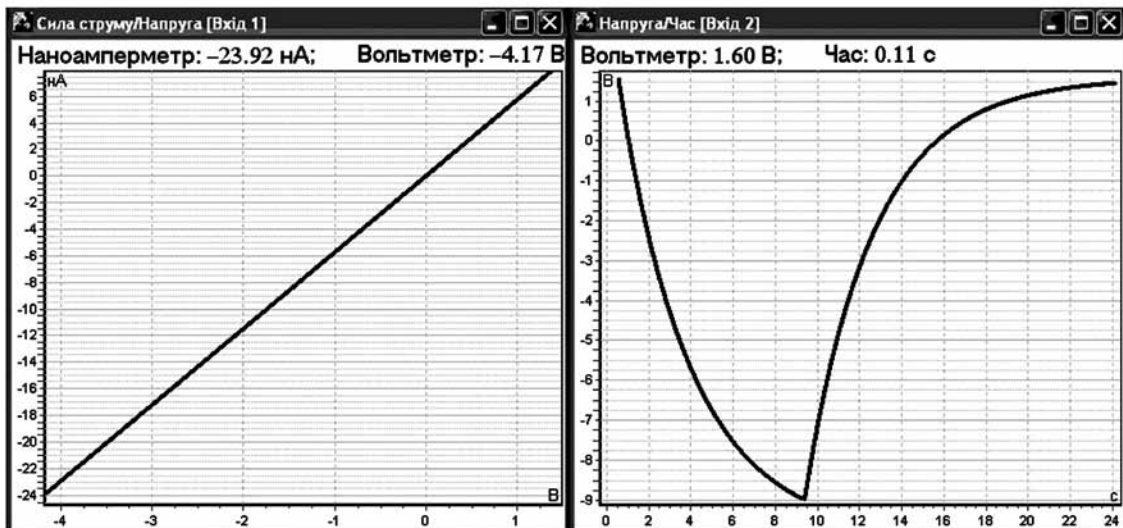


Рис. 3. Результати, отримані для резистора 175 МОм

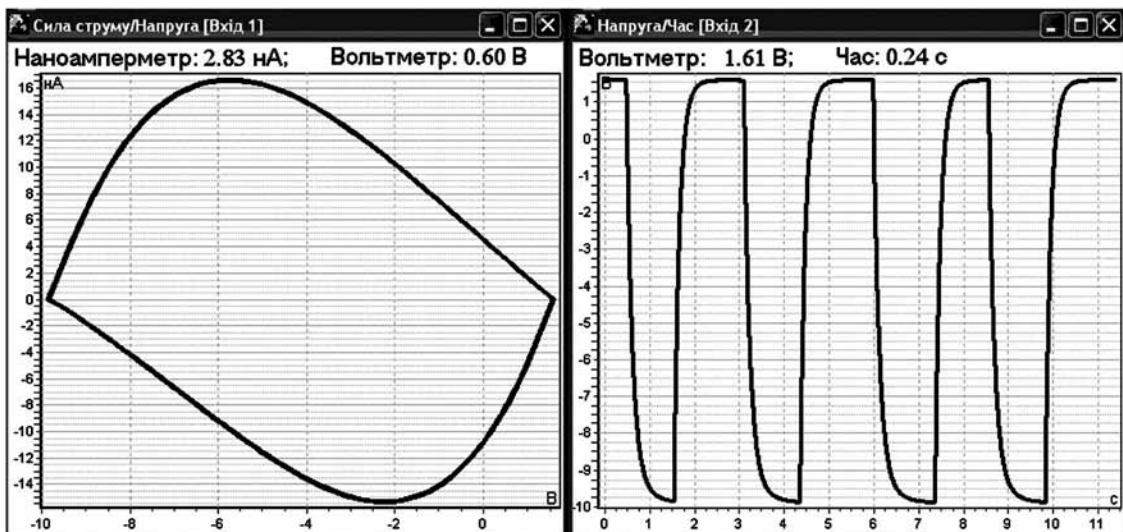


Рис. 4. Результати, отримані для послідовно з'єднаних резистора 100 МОм і конденсатора 270 пф

сатора 270 пФ. Напруга чотири рази зменшувалась і чотири рази збільшувалась з однаковою швидкістю, тому відповідні чотири лінії на ВАХ, що відповідають зменшенню напруги (знизу) зливаються; аналогічно чотири лінії на ВАХ, що відповідають збільшенню напруги (зверху) також зливаються.

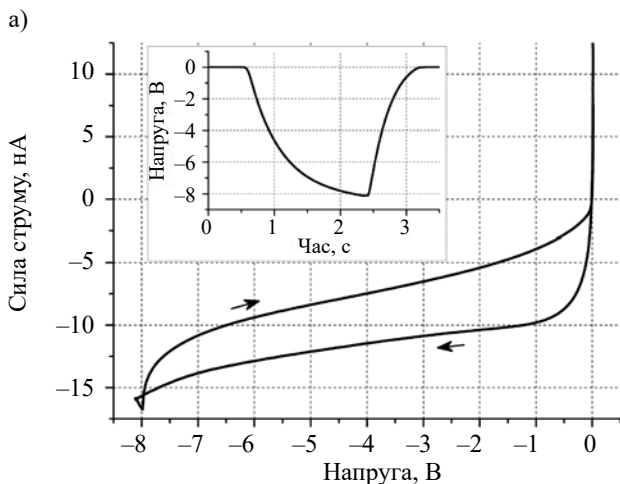
В результаті досліджень встановлено:

- інтервал зміни напруги становить від +1,5 В до -9 В (може бути розширений при застосуванні інших блоків живлення);
- кількість вимірів за секунду — до 5000 (може бути збільшена при використанні більш високочастотного контролера);
- роздільна здатність — до 0,02 нА.

Отримані результати вимірювань передаються до комп'ютера і за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення можуть бути представлені у графічному та табличному вигляді.

Дослідження ВАХ кремнієвих фотодіодів та обговорення результатів

Дослідження проводились на двох фотодіодах типу ФД 337 з порядковими номерами 2.6 та 2.10.



На **рис. 5** наведено ділянки динамічних ВАХ фотодіода 2.6 для малих струмів з відповідними часовими залежностями напруги на вставках, що демонструють різницю у швидкості зміни прикладеної до фотодіода напруги у цих двох випадках. ВАХ на **рис. 5, а** отримано при більшій, ніж на **рис. 5, б**, швидкості, тому й гістерезис тут більший.

На **рис. 6** наведено ділянку динамічної ВАХ фотодіода 2.10 для малих струмів і відповідну зміну з часом напруги на послідовно з'єднаних фотодіоді та резисторі R3 (100 МОм). Ділянки 1 і 2 ВАХ відповідають більшій швидкості зміни напруги, а ділянка 3 — меншій. Чим менша швидкість зміни напруги, тим більше динамічна ВАХ наближатиметься до статичної.

Невідповідність динамічних та статичних ВАХ фотодіодів найімовірніше зумовлюється наявністю у фотодіодів значної ємності. Для порівняння на **рис. 7** наведено ділянки динамічних ВАХ діода 1N4148, що має значно меншу ємність порівняно з фотодіодами, та для паралельно з'єднаних діода 1N4148 з конденсатором 520 пФ для малих струмів, а також відповід-

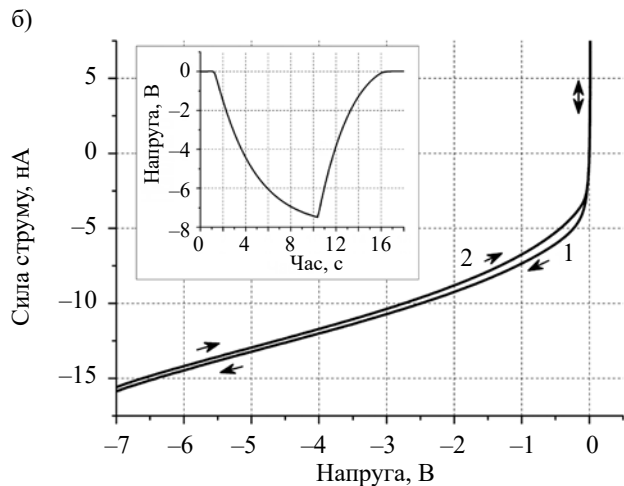


Рис. 5. Динамічні ВАХ (темнові) фотодіода 2.6, отримані за різної швидкості зміни напруги (відповідні зміни напруги у часі див. на вставках)

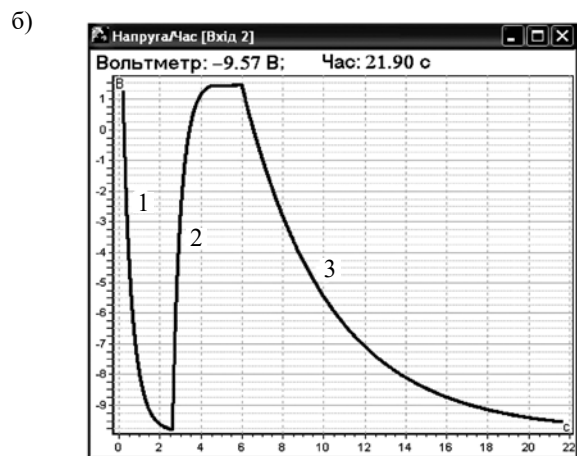
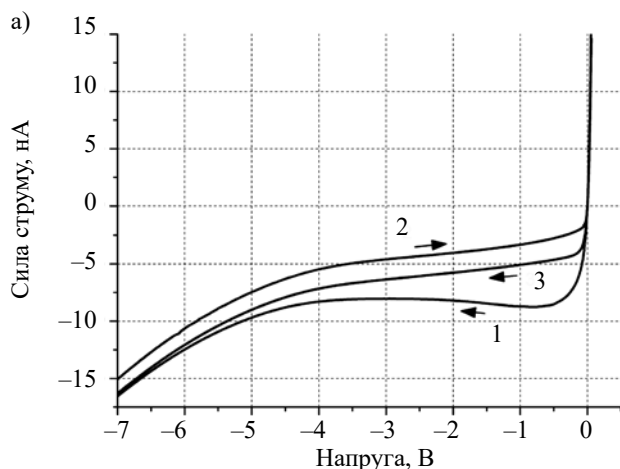


Рис. 6. Динамічна ВАХ (темнова) фотодіода 2.10 (а) та відповідна зміна напруги з часом на послідовно з'єднаних фотодіоді 2.10 та шунті (б)

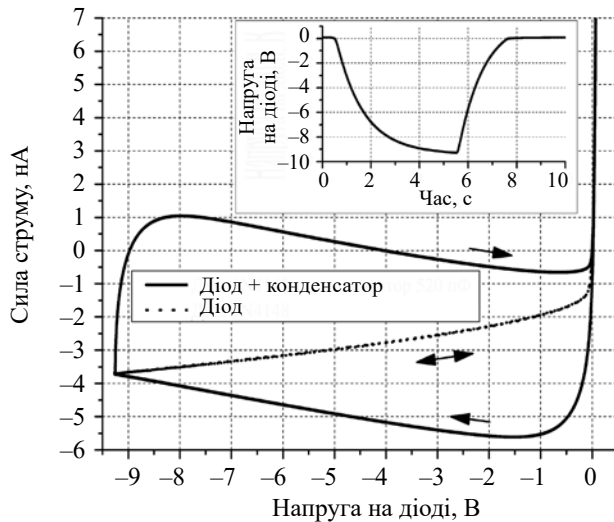


Рис. 7. Динамічні вольт-амперні характеристики діода 1N4148 та паралельно з'єднаних діода 1N4148 і конденсатора 520 пФ

на часова залежність прикладеної до діода напруги. Тут видно, що динамічні ВАХ діода 1N4148 без паралельно під'єданого конденсатора для різних напрямів зміни напруги дуже близькі (майже співпадають).

У наведених прикладах час, необхідний для отримання ВАХ, становив не більше однієї хвилини (в умовах налагодженої установки та під'єданого фотодіода), при цьому кількість точок ВАХ — більше кількох тисяч (5000 вимірів за одну секунду). Всі ВАХ були отримані за кімнатної температури. Зазначимо, що оскільки величини напруги та струму, що використовувались при отриманні ВАХ, були відносно невеликими, нагріванням фотодіодів через Джоулево тепло можна знехтувати.

Оскільки при зменшенні швидкості зміни напруги на фотодіоді динамічні ВАХ наближаються до статичних, установку можна використовувати також для отримання статичних ВАХ, а з аналізу динамічних ВАХ у порівнянні зі статичними можна отримати додаткову інформацію про фотодіод.

Висновки

Зазвичай у серійному виробництві якість фотодіодів за темновим струмом оцінюється відповідно до певної норми: якщо він менше норми, фотодіод вважається якісним за темновим струмом. В процесі дослідження нами була вивчена поведінка темнових струмів кремнієвих фотодіодів в області їхніх малих значень: 10^{-10} – 10^{-7} А.

Результати експериментів показують, що у досліджених фотодіодах спостерігається гістерезис динамічних ВАХ в області струмів 1–10 нА при від'ємній напрузі від –10 до 0 В. Якщо структуру діода виконано досконало у технологічному сенсі, то для статичних ВАХ такого гістерезису або не має бути зовсім, або він може бути у межах похибки вимірюван-

ня темнового струму, яка зазвичай складає біля 5%. У нашому випадку перепад струму у петлі гістерезису на динамічних ВАХ тим більший, чим більша швидкість зміни напруги, і в середньому складає біля 5 нА, що значно більше величини похибки вимірювання (0,01 нА). Така зміна величини струму залежно від того, збільшується зміщення на p – n -переході чи зменшується, може здаватись не суттєвою, коли браковочне значення фотоструму для фотодіода є достатньо високим, наприклад 100 нА. Якщо ж розглядати випадки, коли фотодіод призначений для реєстрації фотострумів на рівні 1 нА і менше (наприклад, низькі рівні освітленості у фотометрії: 0,01–0,1 лк) або для роботи у швидкодіючих пристроях, то виявлене у досліді явище гістерезису може суттєво спотворити результати вимірювання фотоструму.

Таким чином, виявлення за допомогою створеного комплексу описаного гістерезису в області малих струмів може бути використане для тестування фотодіодних структур (кристалів) після їх виготовлення до збирання у корпус. Такий відбір буде ефективним щодо прецизійних фотодіодів, призначених для вимірювання малих потоків оптичного випромінювання.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Wu Yu., Xu Ch., Ren S. et al. Experimental measurements and characterising of photodiodes. Proc. vol. 13255, *International Conference on Optoelectronic Information and Computer Engineering (OICE 2024)*, 2024, 1325504, <https://doi.org/10.1117/12.3039859>
2. Bielecki Z., Achtenberg K., Kopytko M. et al. Review of photodetectors characterization methods. *Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci.*, 2022, vol. 70, no. 2, e140534, <https://doi.org/10.24425/bpasts.2022.140534>
3. Ocaya R. Contemporary Parameter Extraction Methods. In: *Extraction of Semiconductor Diode Parameters*. Springer, Cham., 2024, pp. 39–66. https://doi.org/10.1007/978-3-031-48847-4_3
4. Rogalski A. (Ed.) *Infrared Photon Detectors*. Washington, SPIE Optical Engineering Press, 1995. 644 p.
5. Годованюк В.М. Конструкція та виготовлення порогового ФД337А на основі монокристалічного кремнію. *Науковий вісник Чернівецького університету*, 1998, вип. 40. с. 54–58.
6. Бутенко В.К., Годованюк В.М., Докторович І.В. Прецизійний перетворювач струм-напруга. *Науковий вісник ЧНУ*, 2001, вип. 102, Фізика. Електроніка, с. 84–85.
7. Kaplan H.K., Olkun A., Akay S.K. et al. Si-based photodiode and material characterization of TiO_2 thin film. *Opt Quant Electron*, 2021, vol. 53, article 248, <https://doi.org/10.1007/s11082-021-02884-1>
8. Aslanbaş G., Durmuş P., Altındal Ş. et al. The current–voltage (I – V) characteristics and low–high impedance measurements (C/G – V) of $\text{Au}/(\text{AgCdS:PVP})/\text{n-Si}$ Schottky diode (SD) at dark and under illumination conditions. *J Mater Sci: Mater Electron*, 2024, vol. 35, article 2278, <https://doi.org/10.1007/s10854-024-14014-0>
9. Surucu O., Yıldız D.E., Yıldırım M. A study on the dark and illuminated operation of $\text{Al}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{p-Si}$ Schottky photodiodes: optoelectronic insights. *Appl. Phys. A*, 2024, vol. 130, article 103, <https://doi.org/10.1007/s00339-024-07284-2>
10. Maddaka Reddeppa et al. Current–voltage characteristics and deep-level study of GaN nanorod Schottky-diode-based photodetector. *Semicond. Sci. Technol.*, 2021, vol. 36, no. 3, 035010, <https://doi.org/10.1088/1361-6641/abda62>

11. Yukselturk E., Surucu O., Terlemozoglu M. et al. Illumination and voltage effects on the forward and reverse bias current–voltage (I–V) characteristics in In/In₂S₃/p–Si photodiodes. *J Mater Sci: Mater Electron*, 2021, vol. 32, pp. 21825–21836, <https://doi.org/10.1007/s10854-021-06378-4>

12. Demirezen S., Al-Sehemi A.G., Yuzer A. et al. Electrical characteristics and photosensing properties of Al/symmetrical CuPc/p–Si photodiodes. *J Mater Sci: Mater Electron* 33, 2022, p. 21011–21021, <https://doi.org/10.1007/s10854-022-08906-2>

13. Gurgenc E., Dikici A., Aslan F. Investigation of structural, electrical and photoresponse properties of composite based Al/NiO:CdO/p–Si/Al photodiodes, *Physica B: Condensed Matter*, 2022, vol. 639, 413981, <https://doi.org/10.1016/j.physb.2022.413981>

14. Choe K.K., McClory J.W., Kemnitz R.A. et al. The effects of proton irradiation on the current–voltage and capacitance–voltage

characteristics of GeSn/Si photodiodes. *MRS Advances*, 2025, <https://doi.org/10.1557/s43580-024-01103-9>

15. Воробець Г.І., Воропаєва С.Л., Добровольський Ю.Г., Іванущак Н.М. Алгоритм і програмне забезпечення оптимізації технічних параметрів фотодетекторів. *Науковий вісник Чернівецького університету*, 2009, вип. 446: Комп'ютерні системи та компоненти, с. 112–116.

16. Фотодіод ФД 337. URL: <https://standart-pribor.com.ua/product/fotodiod-fd-337>

17. Годованюк В.М., Бутенко В.К., Докторович І.В., Юр'єв В.Г. Основи метрології фотоприймачів видимого, ультрафіолетового та інфрачервоного діапазонів : навч. посібник. Чернівці : Чернівецький нац. ун-т, 2014.– 440 с

Дата надходження рукопису
до редакції 31.05 2025 р.

DOI: 10.15222/TKEA2025.1-2.38
UDC 535.23:628.98:004.9:535-31:535.247

Oleg KSHEVETSKYI, Yuriy DOBROVOLSKY,
Rostyslav DYACHUK

Ukraine, Chernivtsi, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University
E-mail: y.dobrovolsky@chnu.edu.ua

RESEARCH OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF Si-PHOTODIODES IN THE REGION OF SMALL CURRENTS USING A COMPUTERIZED MEASURING COMPLEX

Studies of the current-voltage characteristics (IVC) of photodiodes, like all other devices that have a p-n junction, allow us to determine their quality, as well as compliance with the stated requirements for reverse current. In our case, silicon-based photodiodes are considered. For them, the value of the reverse, or otherwise - dark current, allows us to estimate an important parameter - the detectivity of the device.

There are many standard methods and ways to measure the dark current of a photodiode, but the issue of accurate and correct measurement of the current-voltage characteristics of photodiodes remains an urgent task of modern measuring equipment.

Also, an equally urgent issue is ensuring the processing of a large array of data obtained during measurements, their storage, processing and graphical representation, which is achieved by software and computer engineering methods. To solve these problems, we have developed, manufactured and investigated a specialized original computerized complex for studying the dynamic IVC of photodiodes in the range of small currents.

The study of the complex, from the point of view of measuring the dark current, was carried out on silicon photodiodes of the type UFD-337.

The study of the complex showed that the complex has the following technical characteristics. The voltage change interval is from + 1.5 V to – 9 V and can be expanded when using other power supplies. The number of measurements of dark current values per second is up to 5000, and can be increased when using a higher-frequency controller. The resolution when measuring the dark current is 0.02 nA.

The service functions provided by specialized software are the selection and transmission of measurement results to a computer, which can be presented in graphical and tabular form.

When studying the dynamic I-V characteristics of silicon photodiodes of the type FD 337 in the region of small currents, the phenomenon of hysteresis of current values was discovered. Moreover, the hysteresis was observed to be greater the greater the rate of voltage change, namely in the range from negative voltage from minus 10 V to 0 V. In this voltage range, dark current fluctuations were found to be in the range from 1 to 10 nA.

According to the results of the study, the created complex can be recommended for testing precision photodiode crystals intended for measuring small fluxes of optical radiation, before assembly into a housing.

Keywords: photodiode, dark current, current-voltage characteristic, measurement, software engineering.

REFERENCES

1. Wu Yu., Xu Ch., Ren S. et al. Experimental measurements and characterising of photodiodes. Proc. vol. 13255, *International Conference on Optoelectronic Information and Computer Engineering (OICE 2024)*, 1325504, 2024, <https://doi.org/10.1117/12.3039859>
2. Bielecki Z., Achtenberg K., Kopytko M. et al. Review of photodetectors characterization methods. *Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci.*, 2022, vol. 70, no. 2, e140534, <https://doi.org/10.24425/bpasts.2022.140534>
3. Ocaya R. Contemporary Parameter Extraction Methods. In: *Extraction of Semiconductor Diode Parameters*. Springer, Cham., 2024, pp. 39–66. https://doi.org/10.1007/978-3-031-48847-4_3
4. Rogalski A. (Ed.) *Infrared Photon Detectors*. Washington, SPIE Optical Engineering Press, 1995. 644 p.
5. Godovaniuk V.M. [Design and manufacturing of the threshold FD337A on the basis of single crystal silicon]. *Naukovyi visnyk Chernivetskoho universytetu*, 1998, iss. 40, pp. 54–58. (Ukr)
6. Butenko V.K., Godovaniuk V.M., Doktorovych I.V. [Precision current-voltage converter]. *Naukovyi visnyk Chernivetskoho universytetu*, 2001, iss. 102: Physics. Electronics, pp. 84–85. (Ukr)
7. Kaplan H.K., Olkun A., Akay S.K. et al. Si-based photodiode and material characterization of TiO₂ thin film. *Opt Quant Electron*, 2021, vol. 53, article 248, <https://doi.org/10.1007/s11082-021-02884-1>
8. Aslanbaş G., Durmuş P., Altındal Ş. et al. The current–voltage (I–V) characteristics and low–high impedance measurements (C/G–V) of Au/(AgCdS:PVP)/n-Si Schottky diode (SD) at dark and under illumination conditions. *J Mater Sci: Mater Electron*, 2024, vol. 35, article 2278, <https://doi.org/10.1007/s10854-024-14014-0>
9. Surucu O., Yıldız D.E., Yıldırım M. A study on the dark and illuminated operation of Al/Si₃N₄/p-Si Schottky photodiodes: optoelectronic insights. *Appl. Phys. A*, 2024, vol. 130, article 103, <https://doi.org/10.1007/s00339-024-07284-2>
10. Maddaka Reddeppa et al. Current–voltage characteristics and deep-level study of GaN nanorod Schottky-diode-based photodetector. *Semicond. Sci. Technol.*, 2021, vol. 36, no. 3, 035010, <https://doi.org/10.1088/1361-6641/abda62>
11. Yukselturk E., Surucu O., Terlemozoglu M. et al. Illumination and voltage effects on the forward and reverse bias current–voltage (I–V) characteristics in In/In₂S₃/p-Si photodiodes. *J Mater Sci: Mater Electron*, 2021, vol. 32, pp. 21825–21836, <https://doi.org/10.1007/s10854-021-06378-4>
12. Demirezen S., Al-Sehemi A.G., Yuzer A. et al. Electrical characteristics and photosensing properties of Al/symmetrical CuPc/p-Si photodiodes. *J Mater Sci: Mater Electron* 33, 2022, pp. 21011–21021, <https://doi.org/10.1007/s10854-022-08906-2>
13. Gurgenc E., Dikici A., Aslan F. Investigation of structural, electrical and photoresponse properties of composite based Al/NiO: CdO/p-Si/Al photodiodes, *Physica B: Condensed Matter*, 2022, vol. 639, 413981, <https://doi.org/10.1016/j.physb.2022.413981>
14. Choe K.K., McClory J.W., Kemnitz R.A. et al. The effects of proton irradiation on the current–voltage and capacitance–voltage characteristics of GeSn/Si photodiodes. *MRS Advances*, 2025, <https://doi.org/10.1557/s43580-024-01103-9>
15. Vorobets G.I., Voropaeva S.L., Dobrovolskyi Y.G., Ivanushchak N.M. Algorithm and software for optimisation of technical parameters of photodetectors. *Naukovyi visnyk Chernivetskoho universytetu*, 2009, iss. 446: Computer systems and components. pp. 112–116. (Ukr)
16. Photodiode FD-337. URL: <https://standart-pribor.com.ua/product/fotodiod-fd-337/>
17. Godovaniuk V.M., Butenko V.K., Doktorovych I.V., Yuriev V.G. [Fundamentals of metrology of photodetectors of visible, ultraviolet and infrared ranges: a textbook]. Chernivtsi: Chernivtsi National University, 2014. 440 p. (Ukr)



Copyright: © 2025 by the authors. Licensee: Politekhperiodika, Odesa, Ukraine. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).