



УДК 621.383.52:535.24

## Дослідження фотодіодів, що самокалібруються, для трап-детекторів

А.С. Литвиненко<sup>1</sup>, Є.П. Тимофеев<sup>2</sup>, Е.С. Дюмін<sup>1,2</sup>, Є.С. Григор'єва<sup>3</sup>,  
К.В. Говорова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, 61002, Харків, Україна  
edwarddumin@gmail.com

<sup>2</sup> Національний науковий центр «Інститут метрології», вул. Миросицька, 42, 61002, Харків, Україна  
eptimofeev@ukr.net

<sup>3</sup> Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейербаха, 7, 61050, Харків, Україна  
biletska@kart.edu.ua

### Анотація

У роботі обґрунтовано необхідність пошуку альтернативи абсолютному кріогенному радіометру через велику вартість проведення його основних вимірювань. Необхідність отримувати більш точні дані вимірювань під час досліджень обумовила застосування трап-детекторів, які використовують фотодіоди, що самокалібруються. Проведений аналіз сучасних підходів до використання таких трап-детекторів встановив, що трап-детектори, які використовують фотодіоди, що самокалібруються, широко застосовуються як у державних вимірюваннях фотометричних величин, так і в лабораторіях багатьох розвинених країн світу.

Було визначено критерії відбору на основі певних характеристик фотодіодів. При дослідженні робочого спектрального діапазону обраних фотодіодів, їхньої внутрішньої квантової ефективності, геометричних розмірів приймального елемента обраних фотодіодів та коефіцієнта дзеркального й дифузного відображення від приймальної поверхні обраних фотодіодів було отримано результати вимірювань наведених характеристик. На їхній основі було зроблено відсів тих фотодіодів, що не задовольняють вимоги, які висуваються до фотодіодів при розробці трап-детектора. На основі експериментальних досліджень було обрано фотодіоди S1337-1010BQ.

**Ключові слова:** фотодіоди; самокалібрування; коефіцієнт відображення; абсолютний кріогенний радіометр; квантова ефективність.

Отримано: 30.08.2023

Відредаговано: 25.09.2023

Схвалено до друку: 29.09.2023

### Вступ

Для отримання більш точних результатів вимірювання фотометричних величин використовують абсолютний кріогенний радіометр (АКР) [1–2]. По суті АКР не має недоліків стосовно його технічних характеристик. Але його придбання є проблемою навіть для високорозвинених державних лабораторій, оскільки вартість такого приладу, а також вартість його використання при проведенні наукових досліджень, надвелика. Тому пошук альтернативи АКР у сучасній високоточній метрології триває.

### Аналіз публікацій та постановка проблеми

Найчастіше зараз у провідних фотометричних лабораторіях світу застосовують трап-детектори, які використовують фотодіоди, що самокалібруються.

Так, у роботах [3–4] досліджено метод та експериментальне встановлення калібрування пасткового піроелектричного детектора за кріогенним радіометром БНМ-ІНМ на трьох довжинах хвиль лазера у видимому діапазоні. Було запропоновано розширити вимірювання абсолютної чутливості електрично відкаліброваного піроелектричного детектора з пасткою (пастка EPD) в діапазоні 350–1850 нм за рахунок спектроскопічних вимірювань відбивної здатності. А в роботі [5] побудовано піроелектричний детектор (пастка EPD) для вимірювань абсолютно високої потужності випромінювання та енергії від УФ-видимого до ближнього інфрачервоного діапазону довжин хвиль. Основним недоліком такого детектора була просторова однорідність відгуку та стабільність у часі (з відносною невизначеністю 0,5%).

© ННЦ «Інститут метрології», 2023

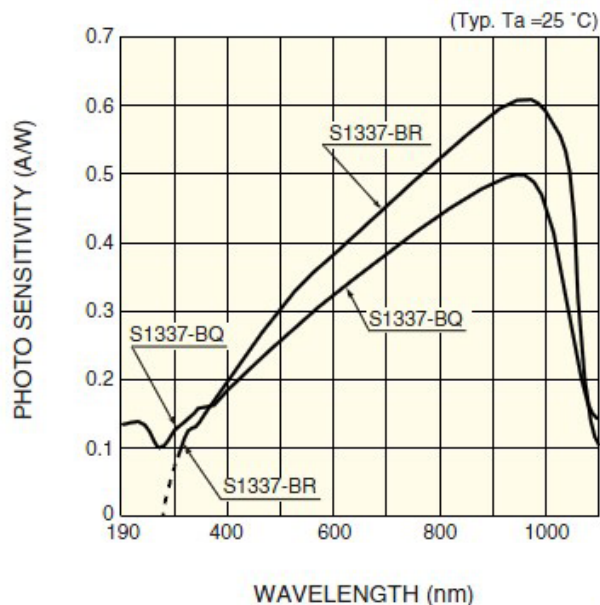


Рис. 1. Графіки спектральної чутливості S1337-1010BQ, S1337-1010BR

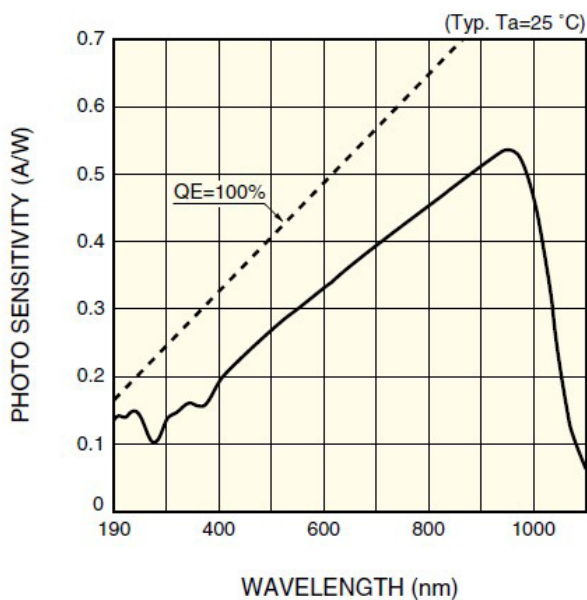


Рис. 2. Графіки спектральної чутливості S6337-01

До того ж було встановлено певну незручність непрямого порівняння з криогенним радіометром для EPD. Вона полягає в тому, що калібрування детекторів проводилося тільки на шести довжинах хвиль лазера і за низького рівня потужності. Хоча при дослідженні було використано піроелектричні детектори із виміром високого рівня потужності. До проведених досліджень можна було вимірювати абсолютну потужність випромінювання тільки від 20 до 1 Вт у діапазоні від 350 до 1850 нм [6–7].

Щодо питання стосовно досліджень використання подібних приладів у нашій державі можна сказати, що такі трап-детектори наявні у складі не менше ніж чотирьох державних первинних еталонів України.

Вищенаведене дозволяє стверджувати, що питання розробки та дослідження і впровадження нових трап-детекторів, які мають перевагу порівняно з раніше розробленими, є актуальним науковим завданням.

### Мета та завдання дослідження

Метою нашого дослідження є проведення вимірювань та аналізу фотодіодів, а також вибору серед них оптимального варіанту для розробки трап-детектора.

Для досягнення вищезазначеної мети нами було поставлено та виконано такі завдання:

- провести аналіз сучасних підходів до використання трап-детекторів;
- обґрунтувати вибір типу фотодіода для застосування у трап-детекторі;
- провести вибір типу фотодіодів, на основі яких буде надалі проводитися розробка трап-детектора.

### Вибір фотодіодів

Трап-детектор можна використовувати самостійно, без калібрування абсолютного криогенного радіометра (АКР). Ці трап-детектори називаються такими, що самокалібруються, й мають поки що гірші точнісні характеристики, ніж при калібруванні за АКР. Але означені трап-детектори мають також певну низку переваг, до основних із яких і належить проведення вимірювань без використання АКР [8–9].

Попередньо необхідно було провести вибір типу фотодіодів, на основі яких надалі проводитиметься розробка схеми трап-детектора.

Критеріями відбору було обрано такі характеристики фотодіодів:

- робочий спектральний діапазон фотодіода;
- внутрішня квантова ефективність;
- коефіцієнт дзеркального та дифузного відображення від приймальної поверхні фотодіода;
- геометричні розміри приймального елемента фотодіода.

Щодо перших двох критеріїв відбору, то їм відповідають фотодіоди фірми Hamamatsu типу S1337, S6337 або їхні аналоги [10]. Враховуючи останній критерій, було доцільно обрати фотодіоди S1337-1010BQ, S1337-1010BR та S6337-01, які мають геометричні розміри приймального елемента у вигляді квадрата зі сторонами 10 та 18 мм відповідно. За даними фірми-виробника, спектральний діапазон фотодіода S1337-1010BR становить 320–1100 нм, а фотодіодів S1337-1010BQ та S6337-01 190–1100 нм. На рис. 1–2 наведено графіки спектральної чутливості фотодіодів, що надані фірмою-виробником.

З наведених на рисунках графіків спектральної чутливості можна зробити висновок, що фото-

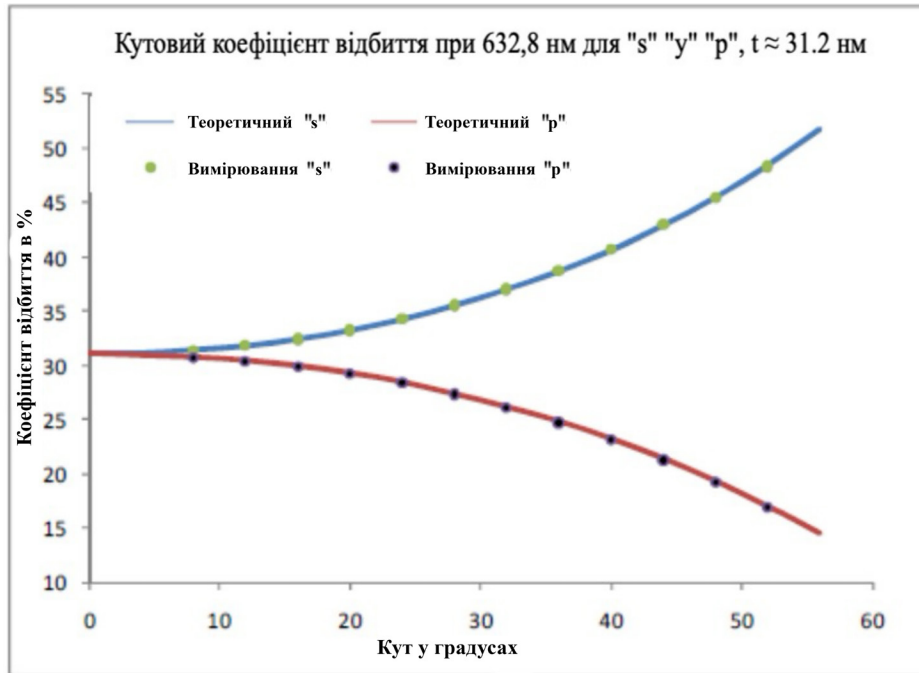


Рис. 3. Залежність коефіцієнта дзеркального відбиття від кута падіння лазерного випромінювання 632,8 нм для фотодіода Hamamatsu S6337-01

діод S6337-01, враховуючи геометрію приймального елемента, на даному етапі відбору виглядає краще.

Питанням дослідження дзеркального та дифузного відображення від приймальної поверхні фотодіодів фірми Hamamatsu присвячено цілу низку наукових праць [11–14]. Проведений аналіз означених публікацій дозволив зробити певні висновки про те, що коефіцієнт дзеркального відображення для вище розглянутих фотодіодів (залежно від кута падіння і поляризації падаючого випромінювання) змінюється в широкому діапазоні. Для S6337-01 він становить від 15 до 50% (рис. 3).

Оскільки дослідження трап-детектора заплановано на апаратурі державного еталона ДЕТУ 11-04-12, де як стабільний лазерний випромінювач використовують двомодовий гелій-

неоновий лазер, це означатиме, що для точної оцінки коефіцієнта дзеркального відображення необхідно буде провести додаткові відповідні вимірювання.

Проведено вимірювання і коефіцієнта дифузного відбиття для наведених фотодіодів [14]. Було встановлено, що S1337-1010 дифузно відбиває падаюче випромінювання у діапазоні 0,11–0,17%. Для S6337-01 таке значення сягає вже 0,65%.

Отриманий великий коефіцієнт дифузного відображення фотодіода S6337-01 змушує відмовитись від його застосування у дослідженнях при розробці трап-детектора.

Проведений попередньо аналіз встановив доцільність використання при розробці трап-детектора фотодіодів Hamamatsu S1337-1010BQ і S1337-1010BR.

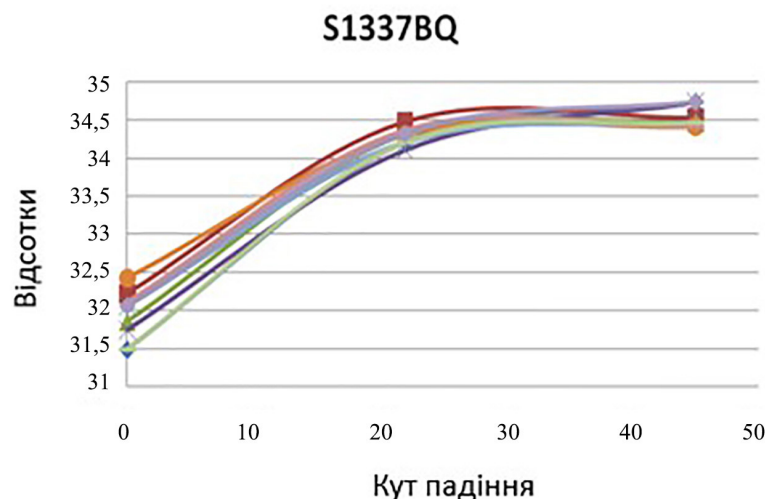


Рис. 4. Залежність коефіцієнта дзеркального відбиття від кута падіння лазерного випромінювання 632 нм для фотодіодів S1337-1010BQ

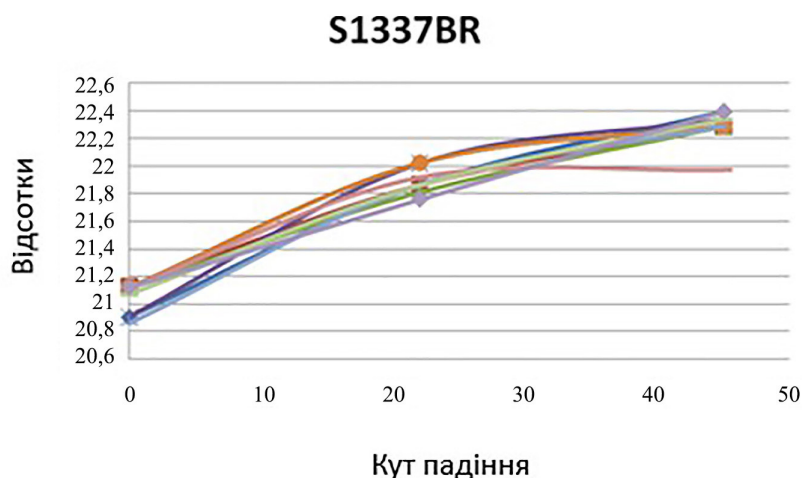


Рис. 5. Залежність коефіцієнта дзеркального відбиття від кута падіння лазерного випромінювання 632 нм для фотодіодів S1337-1010BR

На апаратурі державного еталона ДЕГУ 11-04-12 (де як стабільний лазерний випромінювач використовують модернізований двомодовий гелій-неоновий лазер) було проведено й отримано результати вимірювання щодо дзеркального відбиття від поверхні приймального елемента фотодіодів Hamamatsu S1337-1010BQ та S1337-1010BR. Також було проведено вимірювання падаючої на приймальний елемент і відбитої потужності з поверхні фотодіода при встановлених кутах падіння 0, 22,5 і 45 градусів. Результати серії вимірювань наведено на рис. 4–5.

Значення коефіцієнта дзеркального відображення для фотодіодів S1337-1010BR суттєво нижче від того значення коефіцієнта дзеркального відображення лазерного випромінювання 632 нм, що було отримано для фотодіодів S1337-1010BQ. Це пояснює відмінності в графіках спектральної чутливості S1337-1010BQ, S1337-1010BR, наведених на рис. 1.

Можна зробити висновок про те, що при застосуванні фотодіода S1337-1010BR під час розробки трап-детектора, що самокалібрується,

при однакових значеннях кількості відбиття отримуємо більший коефіцієнт чорноти, ніж при використанні фотодіода S1337-1010BQ. При проведенні повторних, більш ретельних досліджень щодо характеру дзеркально відбитого сигналу було виявлено помилковість такого висновку.

На рис. 6–7 наведено фотографії отриманих відбитих сигналів. Зображення сфотографовані на відстані 1 м від фотодіода, крок клітинки на зображенні – 5 мм.

З отриманих даних можна зробити висновок про таке: виміряний сигнал, відбитий з поверхні фотодіода S1337-1010BR, не відповідає вимогам, що висуваються до фотодіода, і не підходить для подальшого використання цього фотодіода при розробці трап-детектора для поглинання багаторазово дзеркально відображеного випромінювання.

Таким чином, експериментально було встановлено, що для подальших досліджень доцільно обрати фотодіод S1337-1010BQ для використання в трап-детекторі, що самокалібрується.



Рис. 6. Відображення від приймальної поверхні фотодіода S1337-1010BQ

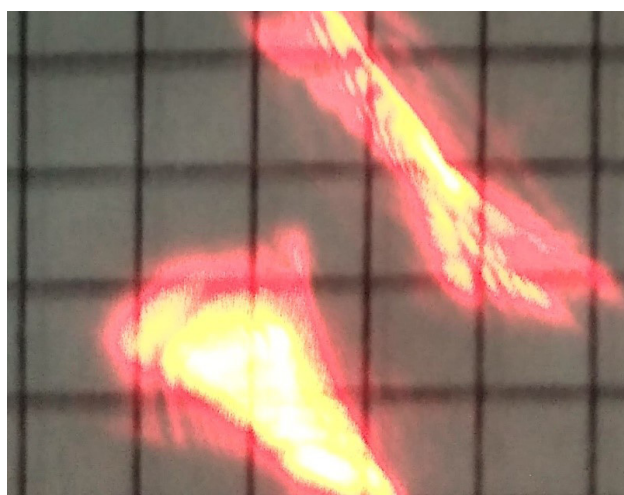


Рис. 7. Відображення від приймальної поверхні фотодіода S1337-1010BR



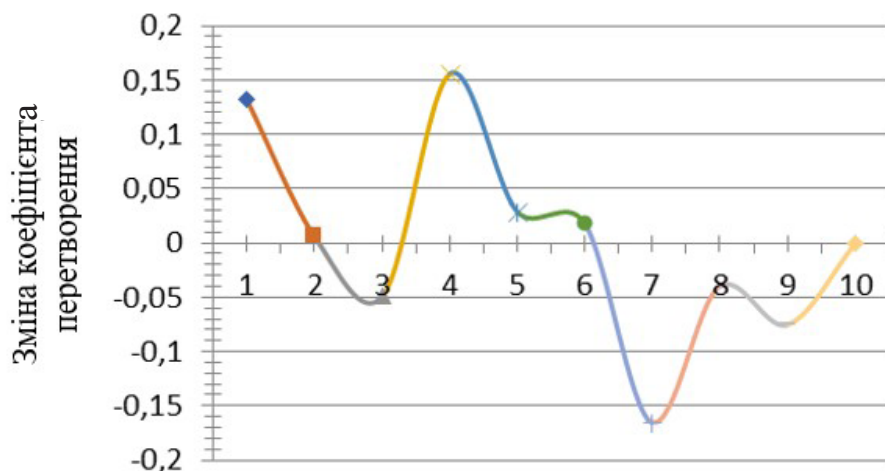


Рис. 8. Відносні зміни коефіцієнта перетворення різних фотодіодів S1337-1010BQ

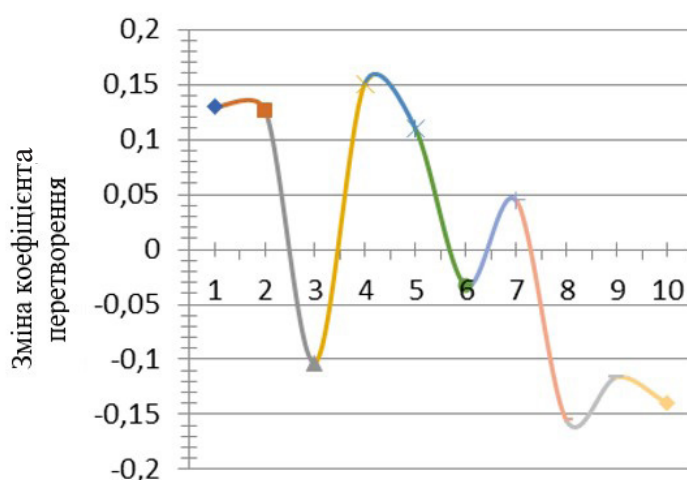


Рис. 9. Відносні зміни коефіцієнта перетворення одного фотодіода S1337-1010BQ при повторних вимірюваннях

Окремо було проведено дослідження стабільності коефіцієнта перетворення вибраних фотодіодів S1337-1010BQ.

При дослідженні вимірювалися падаюча і відбита потужність лазерного випромінювання 632,991 нм та вихідний струм фотодіода. Дослідження проводилися на апаратурі державного зразка ДЕТУ 11-04-12. Струм фотодіода вимірювався пікоамперметром KEITLEY 6485. Результати вимірювань наведені на рис. 8–9.

З наведених результатів можна дійти висновку, що значення коефіцієнтів перетворення фотодіодів стабільні з невизначеністю, яка перевищує 0,12%.

Обмеження на точність вимірювань накладають характеристики вимірювальної апаратури. Також свій вплив має невизначеність встановлення фотодіода і місця попадання лазерного променя на приймальний майданчик фотодіода.

За своїми характеристиками, а також на основі отриманих значень вимірних коефіцієнтів, доцільно обрати і застосовувати для викори-

стання в трап-детекторі, що самокалібрується, фотодіоди S1337-1010BQ.

### Висновки

1. У роботі було проведено аналіз сучасних підходів до використання трап-детекторів при отриманні більш точних даних вимірювання фотометричних величин в Україні та світі.

2. Обґрунтовано вибір типу фотодіода для застосування у трап-детекторі, який відповідатиме встановленим критеріям щодо таких характеристик, як робочий спектральний діапазон фотодіода, внутрішня квантова ефективність, коефіцієнт дзеркального і дифузного відображення від приймальної поверхні фотодіода та геометричні розміри приймального елемента фотодіода.

3. Експериментально встановлено, що для проведення необхідних вимірювань та подальшого аналізу результатів, а також вибору серед них оптимального варіанту фотодіодів для розробки трап-детектора було обрано фотодіоди S1337-1010BQ.

# Study of self-calibrating photodiodes for trap detectors

A. Litvinenko<sup>1</sup>, Ye. Tymofeiev<sup>2</sup>, E. Diumin<sup>1,2</sup>, Ye. Hryhorieva<sup>3</sup>, K. Hovorova<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Marshala Bazhanova Str., 17, 61002, Kharkiv, Ukraine  
edwarddumin@gmail.com

<sup>2</sup> National Scientific Centre "Institute of Metrology", Myronosytska Str., 42, 61002, Kharkiv, Ukraine  
eptimofeiev@ukr.net

<sup>3</sup> Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Square, 7, 61050, Kharkiv, Ukraine  
biletska@kart.edu.ua

## Abstract

In accordance with the stated purpose of the study, the measurements and analysis of photodiodes were carried out, and the best alternative for the development of the trap detector was chosen. The paper substantiates the necessity for an alternative to the absolute cryogenic radiometer because of its highly expensive measurements. The need for more accurate measurement data has determined the use of trap detectors, including self-calibrating photodiodes. Such trap detectors can be used independently, without calibration by an absolute cryogenic radiometer. Thus, the cost of the study is reduced. Besides, the given approach does not affect the accuracy of the obtained measurement results.

When reviewing modern approaches to the use of the above-mentioned trap detectors, it was discovered that trap detectors, together with self-calibrating photodiodes, are widely used both in state measurements of photometric quantities and for laboratory needs in many developed countries worldwide. The given analysis allows us to assert that the issues of developing, studying, and using new trap detectors, considering a significant advantage in their characteristics in comparison with the previously developed ones, make up an urgent scientific task.

The paper defines selection criteria based on certain characteristics of photodiodes. When investigating the operating spectral range of the selected photodiodes, their internal quantum efficiency, geometrical dimensions of the receiving element of the selected photodiodes, and the coefficient of mirror and diffuse reflection of the receiving surface of the selected photodiodes, measurement results for all the stated characteristics were obtained. Based on these values, a screening of the photodiodes that do not meet the requirements for photodiodes specified for the development of the trap detector was made. Based on experimental studies, photodiodes S1337-1010BQ were selected.

**Keywords:** photodiodes; self-calibration; reflection coefficient; absolute cryogenic radiometer; quantum efficiency.

## Список літератури

1. Martin J.E., Fox N.P., Key P.J. A Cryogenic Radiometer for Absolute Radiometric Measurements. *Metrologia*, 1985, vol. 21, no. 3. doi: <https://doi.org/10.1088/0026-1394/21/3/007>
2. Hoyt C.C., Foukal P.V. Cryogenic Radiometers and their Application to Metrology. *Metrologia*, 1991, vol. 28, no. 3. doi: <https://doi.org/10.1088/0026-1394/28/3/011>
3. Xin Ye, Xiaolong Yi, Chao Lin, Wei Fang, Kai Wang et al. Instrument Development: Chinese Radiometric Benchmark of Reflected Solar Band Based on Space Cryogenic Absolute Radiometer. *Remote Sens*, 2020, vol. 12 (17). doi: <https://doi.org/10.3390/rs12172856>
4. Mellouki I., Touayar O., Ktari T., Bastie J., Yacoubi N. A method for calibrating of a trap pyroelectric detector in the UV-vis domain. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, vol. 120, issue 2, pp. 437–440. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2005.01.018>
5. Mellouki I., Touayar O., Ktari T., Saadallah F., Bastie J., Yacoubi N. Study and realization of a trap pyroelectric detector for absolute high radiant powers and energies. *Measurement Science and Technology*, 2004, vol. 15 (2). doi: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/15/2/011>
6. Gentile T.R., Houston J.M., Cromer C.L. Realization of a scale of absolute spectral response using the National Institute of Standards and Technology high-accuracy cryogenic radiometer. *Applied Optics*, 1996, vol. 35, no. 22. URL: <https://www.nist.gov/document/ao-35-96pdf>
7. Touayar O., Coutin J.M., Bastie M.J. Use of INM cryogenic radiometer to calibrate transfer standard detectors at 1550 nm. *Proceedings of SPIE's 1995 International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation*. San Diego, CA, United States, 1995. doi: <https://doi.org/10.1117/12.221419>
8. Назаренко Л.А., Сорокін В.М. Основи радіометрії та фотометрії: монографія. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2014. 352 с.
9. Kovalov A.A., Liberman A.A., Mikriukov A.S., Moskaliuk S.A. Vtraty v trap-detektorakh, shcho samokalibriuiutsia, za rakhunok dyfuznoho rozsiuvannia [Losses in self-calibrating trap detectors due to the diffuse scattering]. *Measurement Techniques*, 2013, no. 4, pp. 38–42.
10. URL: <https://www.hamamatsu.com/>

11. Molina J.C., López M., Bermúdez J.C., Jorge A. Determinación de la reflectancia angular en fotodetectores con luz polarizada. *Simposio de Metrologia*, 2010. URL: <https://www.cenam.mx/sm2010/info/carteles/sm2010-c08.pdf>
12. Haapalinna A., Kärhä P., Ikonen E. Spectral reflectance of silicon photodiodes. *Applied Optics*, 1998, vol. 37, issue 4, pp. 729–732. doi: <https://doi.org/10.1364/ao.37.000729>
13. Татьяна Д.Н., Мачехин Ю.П., Лукин К.А. Влияние поляризации оптического излучения на фототок различных моделей трап-детекторов. *Радиотехника*. 2014. Вып. 176. С. 172–180.
14. Мунтян К.И., Тимофеев Е.П. Разработка и исследование трап-детектора с высокой внешней квантовой эффективностью. *Світлотехніка та електроенергетика*. 2011. № 3. С. 31–38.
6. Gentile T.R., Houston J.M., Cromer C.L. Realization of a scale of absolute spectral response using the National Institute of Standards and Technology high-accuracy cryogenic radiometer. *Applied Optics*, 1996, vol. 35, no. 22. Available at: <https://www.nist.gov/document/ao-35-96pdf>
7. Touayar O., Coutin J.M., Bastie M.J. Use of INM cryogenic radiometer to calibrate transfer standard detectors at 1550 nm. *Proceedings of SPIE's 1995 International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation*. San Diego, CA, United States, 1995. doi: <https://doi.org/10.1117/12.221419>
8. Nazarenko L.A., Sorokin V.M. Osnovy radiometrii ta fotometrii: monohrafiia [Fundamentals of radiometry and photometry. Monograph]. Kharkiv, 2014. 352 p. (in Ukrainian).
9. Kovalov A.A., Liberman A.A., Mikriukov A.S., Moskaliuk S.A. Vraty v trap-detektorakh, shcho samokalibruiutsia, za rakhunok dyfuznoho rozsiuvannia [Losses in self-calibrating trap detectors due to the diffuse scattering]. *Measurement Techniques*, 2013, no. 4, pp. 38–42.
10. Available at: <https://www.hamamatsu.com/>
11. Molina J.C., López M., Bermúdez J.C., Jorge A. Determinación de la reflectancia angular en fotodetectores con luz polarizada. *Simposio de Metrologia*, 2010. Available at: <https://www.cenam.mx/sm2010/info/carteles/sm2010-c08.pdf>
12. Haapalinna A., Kärhä P., Ikonen E. Spectral reflectance of silicon photodiodes. *Applied Optics*, 1998, vol. 37, issue 4, pp. 729–732. doi: <https://doi.org/10.1364/ao.37.000729>
13. Tatyanko D.N., Machehin Yu.P., Lukin K.A. Vliyanie polyarizatsii opticheskogo izlucheniya na fototok razlichnyih modeley trap-detektorov [The effect of optical radiation polarisation on the photocurrent of different models of trap detectors]. *Radiotekhnika*, 2014, issue 176, pp. 172–180.
14. Muntyan K.I., Timofeev E.P. Razrabotka i issledovanie trap-detektora s vyiskoy vneshney kvantovoy effektivnostyu [The development and study of the trap detector with high external quantum efficiency.]. *Lighting engineering and power engineering*, 2011, no. 3, pp. 31–38.

#### References

1. Martin J.E., Fox N.P., Key P.J. A Cryogenic Radiometer for Absolute Radiometric Measurements. *Metrologia*, 1985, vol. 21, no. 3. doi: <https://doi.org/10.1088/0026-1394/21/3/007>
2. Hoyt C.C., Foukal P.V. Cryogenic Radiometers and their Application to Metrology. *Metrologia*, 1991, vol. 28, no. 3. doi: <https://doi.org/10.1088/0026-1394/28/3/011>
3. Xin Ye, Xiaolong Yi, Chao Lin, Wei Fang, Kai Wang et al. Instrument Development: Chinese Radiometric Benchmark of Reflected Solar Band Based on Space Cryogenic Absolute Radiometer. *Remote Sens*, 2020, vol. 12 (17). doi: <https://doi.org/10.3390/rs12172856>
4. Mellouki I., Touayar O., Ktari T., Bastie J., Yacoubi N. A method for calibrating of a trap pyroelectric detector in the UV-vis domain. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, vol. 120, issue 2, pp. 437–440. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2005.01.018>
5. Mellouki I., Touayar O., Ktari T., Saadallah F., Bastie J., Yacoubi N. Study and realization of a trap pyroelectric detector for absolute high radiant powers and energies. *Measurement Science and Technology*, 2004, vol. 15 (2). doi: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/15/2/011>