

Володимир ЛІПКА^{1,2}, Юрій ДОБРОВОЛЬСЬКИЙ²

Україна, м. Чернівці, ¹Центральне конструкторське бюро «Ритм»,

²Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

E-mail: lipka.volodymyr@chnu.edu.ua; y.dobrovolsky@chnu.edu.ua

ФОТОПРИЙМАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ПІДВИЩЕНОЇ НАДІЙНОСТІ ТА ТРИВКОСТІ ДО ФОНОВОЇ ОСВІТЛЕНOSTІ ДЛЯ FSO

*В умовах технології FSO (вільного оптичного простору) актуальним є питання протидії створюваному сонячним світлом фоновому освітленню, здатному згенерувати великий фотострум фотодіода, який може придушити корисний монохроматичний сигнал. У цій роботі пропонується конструкція надійного та тривкого до фоновної освітленості фотоприймального пристрою, що працює на довжині хвилі 980 нм, в умовах освітлення сонячним випромінюванням потужністю до 17 мВт. Протидія фотоприймача фоновому освітленню полягає у комбінації оптичного від-
різального фільтра, схеми автоматичного регулювання підсилення та алгоритму відбору корисного сигналу за час зростання фотоструму фотодіода на робочій довжині хвилі.*

Ключові слова: фотоприймальний пристрій, фонове освітлення, фотодіод, надійність, тривкість, автоматичне регулювання підсилення, корисний сигнал, алгоритм відбору.

Забезпечення обміну інформаційними сигналами між оптичними каналами є одним з основних напрямків розвитку сучасних телекомунікаційних систем. Зокрема це стосується технології FSO (free space optics — вільний оптичний простір) [1, 2]. Ця технологія забезпечує бездротовий високошвидкісний зв'язок у відкритому повітряному просторі. Відстань, на якій забезпечується стійкий зв'язок, досягає 8 км при швидкодії до 10 Гбіт/с за умови прямої видимості між випромінювачем та приймачем [3]. Але при цьому відкритий оптичний канал забезпечує не лише передачу оптичного випромінювання з робочою довжиною хвилі, оскільки у цьому каналі існує фонове освітлення, вдень — це сонячне випромінювання, потужність якого може бути набагато вища за потужність вимірюваного корисного інформаційного сигналу. В цьому випадку маємо класичний випадок оптичних завад, які спотворюють інформацію, що передається.

Оптичний сигнал приймається фотодіодом, чутливим у спектральному діапазоні 0,8–1,0 мкм, а саме, як у випадку, розглянутому нами раніше у [4], до довжини хвилі $\lambda = 980$ нм.

Метою цієї роботи було створення конструкції фотоприймального пристрою (ФПП), тривкого до фонового освітлення сонячним випромінюванням на довжині хвилі 980 нм, для роботи у телекомунікаційній сфері, зокрема FSO.

Аналіз існуючих способів протидії фоновому випромінюванню

Розглянемо існуючі методи забезпечення працездатності фотодіода як детектора оптичного випромінювання, що переносить інформаційний сигнал в умовах фоновної освітленості, зокрема сонячної.

Існують три групи методів розв'язання зазначеної проблеми, які варто об'єднати для досягнення мети, а саме — розроблення завадостійких фотодіодів [5], оснащених оптичними фільтрами [6, 7], причому фотосигнал має оброблятися за допомогою схем автоматичного регулювання підсилення (АПП), а уся конструкція керуватися мікроконтролером, робота якого організована методами програмної інженерії [8].

В нашому випадку розглядаємо довжину хвилі 980 нм, яка є поширеною серед систем FSO. Оптимальними детекторами на цій довжині хвилі є $p-i-n$ -фотодіоди на основі кремнію [3]. У такого фотодіода має бути висока чутливість до робочої довжини хвилі та мінімальна чутливість за її межами.

Серед відомих технічних рішень тут можна зазначити описане, наприклад, у [9]: прошарок тонкої плівки $\text{Ce}-\text{WO}_3$ між металічним контактом з міді та кремнієм, що сприяє кращому поглинанню й збільшенню чутливості, дозволив забезпечити її величину на рівні 20,61 мА/Вт. Однак така чутливість не є достатньою. Оптимізація технологічних процесів дозволяє досягти імпульсної струмової монохроматичної чутливості 0,41–0,44 А/Вт на довжині хвилі $\lambda = 1064$ нм [10]. Такий результат є наближеним до теоретичної межі. Qiuyue Wu з колегами [11] демонструє конструкцію фотодетектора на базі сполуки Au/Si/Ag з асиметричними переходами Шотткі, поєднаними з асиметричними контактами. Така конструкція має чутливість до випромінювання з $\lambda = 980$ нм близько 424,3 мА/Вт при нульовому зміщенні. А у [12] шляхом поєднання структурованої поверхні з оптимізованою імплантованою сполукою до-

сягнуто чутливості 0,15–0,30 А/Вт на довжині хвилі 200 – 1000 нм відповідно. Але якщо таке значення прийнятне для ультрафіолетової (УФ) області спектра, то для інфрачервоної (ІЧ) це є замалим.

Тобто очевидно, що існують технології, які підвищують чутливість фотодіодів, призначених для роботи у ближній ІЧ-області спектра оптичного випромінювання. Але в нашому випадку необхідно створити конструкцію фотодіода з підвищеною струмовою монохроматичною чутливістю та зменшеним часом зростання фотоструму на довжині хвилі 980 нм. Кращим рішенням, на нашу думку, є оптимізація конструкції фотодіода з урахуванням особливостей його роботи, як це було зроблено нами раніше при створенні фотодіодів для роботи на довжині хвилі 1,06 мкм [13].

Підвищити ефективність фільтрації корисного сигналу від фонових оптичних завад можуть схемно-технічні рішення. Для цього є схеми, що забезпечують зменшення шуму фотоприймача, коли він зумовлений фоновим випромінюванням. Так, у [14] для мінімізації шуму використовується схема керування вихідним струмом фотоприймача, яка має зворотний зв'язок із вхідним сигналом. Ще одне рішення запропоновано у [15], де за допомогою вбудованих компараторів та логічної схеми поза приймачем отримують сигнал із частотою, пропорційною рівню фонового світла.

Описані схемні рішення загалом називають схемами автоматичного регулювання підсилення (АРП) [16]. Їх використовують у медичній техніці [17, 18], системах зв'язку [19, 20]. Особливість АРП полягає у регулюванні коефіцієнта підсилення вихідного фотосигналу, що дозволяє як регулювати динамічний діапазон фотоприймача, так і фіксувати корисний сигнал із певною частотою, пропорційною рівню оптичного сигналу [21]. Зокрема, у [22] показано, що для застосування фотодіода у схемі АРП потрібно враховувати як його динамічний діапазон, так і частотні характеристики попереднього підсилювача. Ці характеристики потрібно звести до значень, за яких фонове випромінювання можна вивести за межі робочої частоти.

Також слід зазначити, що для збільшення точності вимірювання та підвищення надійності роботи такої схеми варто автоматизувати процес вимірювання за допомогою мікроконтролера з відповідним програмним забезпеченням, як це реалізовано у [23, 24]. Раніше нами був розроблений алгоритм протидії фоновій освітленості підвищеної надійності для вимірювання енергетичної освітленості, створюваного бактерицидним опромінювачем [25] на довжині хвилі 254 нм.

Схема конструкції ФПП з фільтрацією фотоструму, генерованого фоновим випромінюванням

Відомо, що оптичне випромінювання поглинається у напівпровідникових матеріалах на різній глибині [26]. При цьому чим більше довжина хвилі випромінювання, тим більшою є глибина його поглинання, тобто короткохвильове випромінювання генерує неосновні носії заряду, що роблять свій внесок у фотострум, з приповерхневого шару, а більш довгохвильове — з шару на більшій глибині.

Згідно із запропонованою у [25] моделлю, більш довгохвильовому випромінюванню потрібно більше часу для проникнення на більшу глибину у напівпровідник і, відповідно, більше часу на генерацію неосновних носіїв заряду для фотоструму. Ця різниця не є великою, лише 7 нс для $\lambda = 254$ нм та $\lambda = 550$ нм, що відповідає частоті приблизно 5 ГГц. Дослідження було проведено на фотодіоді ФД-288, призначеному для вимірювання УФ- та видимого випромінювання. Надалі ці дослідження були продовжені для випромінювання з довжиною хвилі 980 нм на базі фотодіода УФД-15М [27], який є досить чутливим у ближній ІЧ-області спектра. На **рис. 1** для порівняння наведено відносні спектральні характеристики обох цих фотодіодів.

Також відомо, що фотострум має певний час зростання, тобто час, за який усі згенеровані опромінюванням носії заряду потрапляють до $p-n$ -переходу та викличуть фотострум у зовнішньому колі. Цей час визначається тим, як глибоко проникає промінь світла в об'єм напівпровідника. Час зростання фотоструму фотодіода УФД-15М на довжині хвилі 980 нм складає близько 50 нс при зміщенні на $p-n$ -переході до 120 В, як це показано на **рис. 2**.

Сучасна цифрова техніка може працювати з такими значеннями часу при використанні відповідного програмного забезпечення, яке дозволяє фіксувати фотострум, зумовлений оптичним випромінюванням з довжиною хвилі більш як 980 нм, лише у період перших 50 нс, після чого схема оброблення фотосигналу

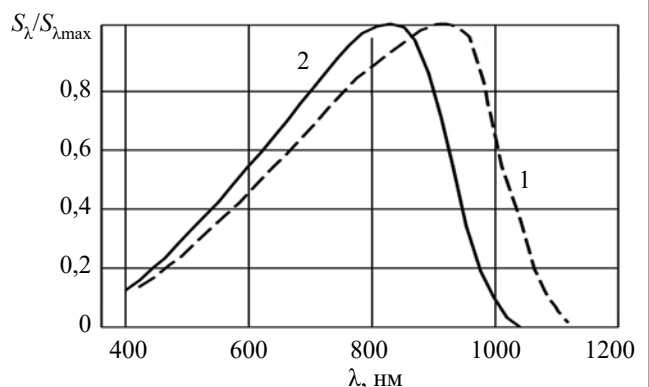


Рис. 1. Усереднена спектральна характеристика чутливості серійних фотодіодів УФД-15М (1) та фотодіода ФД-288 (2)

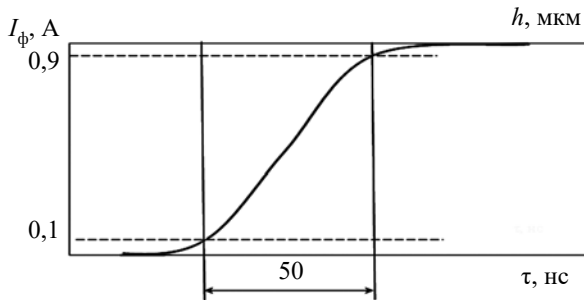


Рис. 2. Час зростання τ фотоструму фотодіода УФД-15М на довжині хвилі 980 нм:

I_ϕ — фотострум, генерований оптичним випромінюванням;
 h — глибина, на якій поглинається це випромінювання (залежить від певної довжини хвилі)

має ігнорувати фотострум, який генерується надалі. Але при цьому лишається питання генерації фотоструму більш короткохвильовим випромінюванням, з яким схема відсічки фотоструму за часом зростання не впорається. У зв'язку з цим було проведено дослідження впливу оптичного фільтра на фотосигнал, генерований фотодіодом УФД-15М при $\lambda < 980$ нм. Було використано світлофільтр зі скла ІКС7 товщиною 4 мм, який пропускає оптичне випромінювання у діапазоні $\lambda \approx 800 - 4800$ нм. Таким чином, область спектральної чутливості фотодіода звузилася до $800 - 1100$ нм, чого цілком достатньо для вимірювання оптичного випромінювання з довжиною хвилі 980 нм. При цьому величина фоновому фотоструму зменшилася на 60%.

Таким чином вдається зменшити вплив сонячного фоновому світла на роботу фотодіода у спектральних діапазонах від 400 до 800 нм та понад 980 нм. Залишається ділянка від 800 до 980 нм, де сонячне світло може вплинути на роботу фотодіода. Цей вплив можна нівелювати за допомогою схеми АРП, наведеної на рис. 3.

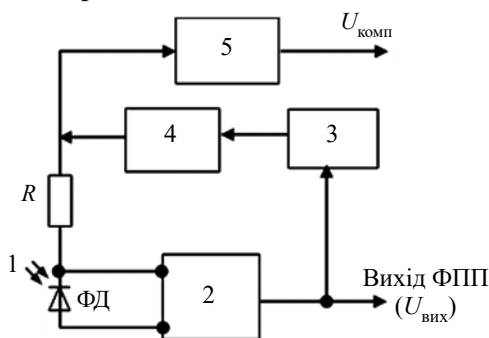


Рис. 3. Блок-схема ФПП з АРП, стійкого до немодульованого фоновому випромінювання:

I — фотодіод; 2 — перетворювач струм-напруга; 3 — джерело струму, кероване напругою; 4 — фільтр високої частоти; 5 — технологічний каскад для вимірювання струму компенсації

$U_{\text{вих}}$ — вихідна напруга ФПП; $U_{\text{комп}}$ — напруга, пропорційна струму компенсації; R — обмежувальний резистор струму компенсації фотодіода

Схема працює таким чином. Фотодіод 1 поглинає оптичне випромінювання (яке пройшло скрізь оптичний фільтр ІКС-7 і є більш довгохвильовим, ніж фільтр сприймає) та генерує фотострум, перетворюваний у напругу $U_{\text{вих}}$ на виході ФПП перетворювачем струм-напруга 2. Перетворювач 2 має зворотний зв'язок, який містить джерело струму, кероване напругою 3, та високочастотний фільтр 4 (RC-фільтр). Фільтр 4 за допомогою джерела струму 3 відсікає фотострум, обумовлений фоновим випромінюванням, яке має інший частотний склад порівняно із частотним складом робочої частоти. Таким чином, струм компенсації $I_{\text{комп}}$, генерований на виході джерела струму 5, еквівалентний струму, який створюється фоновим випромінюванням (не у робочому частотному діапазоні). Цей струм віднімається від загального фотоструму, що генерується фотодіодом 1. Струм компенсації $I_{\text{комп}}$ вимірюється технологічним каскадом 5.

Отже, остаточна блок-схема конструкції ФПП виглядає так, як це показано на рис. 4, а принцип її роботи продемонстровано на рис. 5.

Роботу фотодіода з фільтром ІКС-7 та АРП продемонстровано вище. Мікроконтролер забезпечує відбір фотосигналу з $\lambda = 980$ нм, виміряного за 50 нс (час повного поглинання).

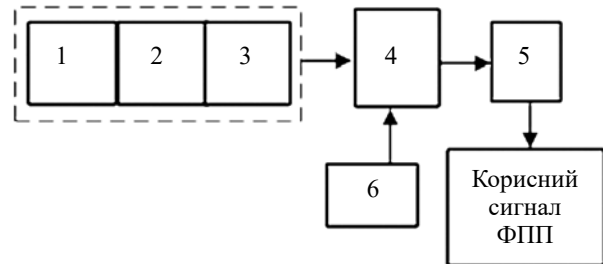


Рис. 4. Блок-схема конструкції ФПП:

1 — оптичний фільтр ІКС-7; 2 — фотодіод; 3 — схема АРП; 4 — мікроконтролер; 5 — вимірювач фотоструму протягом часу зростання (50 нс); 6 — блок керування мікроконтролером

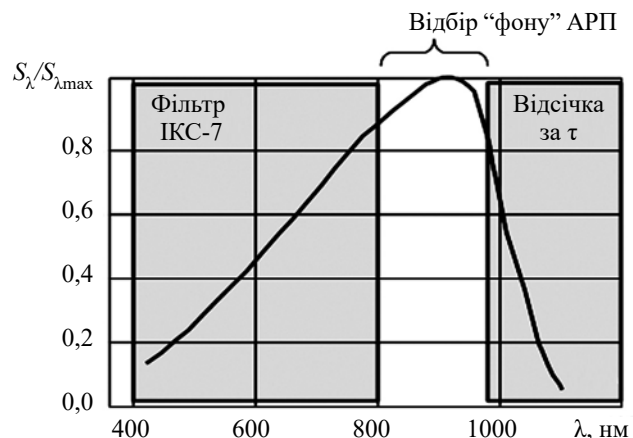


Рис. 5. Видалення фоновому складової фотоструму фотодіода за допомогою оптичного фільтра ІКС-7, відбору сигналу протягом часу зростання фотоструму τ та схеми АРП

Дослідження тривкості запропонованої конструкції ФПП і надійності схеми та програмного забезпечення

Дослідження фотоприймального пристрою на тривкість до фонового сонячного опромінювання показало, що запропонована конструкція забезпечує компенсацію оптичної потужності, еквівалентну потужності до 17 мВт.

У рамках досліджень було також проведено випробування на надійність розробленої схеми та програмного забезпечення (ПЗ) для мікроконтролера, а саме — випробування на безвідмовність ФПП та на ймовірність безвідмовної роботи ПЗ.

Випробування ФПП тривали 500 годин в умовах його опромінення потоком світла з робочою довжиною хвилі 980 нм. При цьому кожні 125 годин напруження вимірювалася вольтова монохроматична чутливість ФПП у вигляді її відхилення від норми ($5 \cdot 10^4$ В/Вт) протягом часу випробувань. За час випробувань відмов не спостерігалось.

Дослідження надійності розробленого ПЗ для мікроконтролера здійснювалося відповідно до моделі Шумана [28]. Оцінювалося значення початкової кількості помилок у програмному коді при загальній кількості операторів, що не перевищувала 10 000. Результати показали, що кількість помилок у ПЗ, яке управляє відбором фотосигналу за часом, а також роботою системи вимірювання загалом, дорівнювала п'яти. Помилки були визначені, а причини усунені. Ймовірність безвідмовної роботи ПЗ в інтервалі напруження від 0 до 10 годин знаходиться на рівні 0,987. Зазначимо, що часовий інтервал тривалістю 10 годин було обрано довільно. У подальших дослідженнях надійності ПЗ час випробувань може бути збільшений відповідно до часу роботи системи, в якій застосовуватиметься ФПП.

Висновки

Таким чином, проведений аналіз існуючих способів протидії фоновому випромінюванню дозволив розробити конструкцію фотоприймального пристрою, тривкого до фонового освітлення сонячним випромінюванням на довжини хвилі 980 нм. Як показали дослідження, поєднання оптичного відрізного фільтра, схеми автоматичного регулювання підсилення та алгоритму відбору корисного сигналу протягом часу зростання фотоструму на робочій довжині хвилі дозволили ефективно протидіяти фоновому освітленню фотоприймача. Створений пристрій є тривким до фонового сонячного опромінювання потужністю до 17 мВт, а його безвідмовність складає не менше 500 годин напруження.

Розроблене програмне забезпечення дозволяє автоматизувати процес вимірювання, а ймовірність його безвідмовної роботи протягом десяти годин складає майже 99%.

Подальші роботи передбачають дослідження створеного ФПП на стійкість та тривкість до зовнішніх механічних та кліматичних факторів.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Al-Gailani S. A. et al. A survey of free space optics (FSO) communication systems, links, and networks. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 7353–7373. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3048049>
2. Mikołajczyk J., Bielecki Z., Bugajski M. et al. Analysis of free-space optics development, *Metrol. Measur. Syst.*, 2017, vol. 24, no. 4, pp. 653–674. <https://doi.org/10.1515/mms-2017-0060>
3. Ghassemloooy Z. et al. An Overview of Optical Wireless Communications. In: Uysal M., Capsoni C., Ghassemloooy Z., Boucouvalas A., Udvary E. (eds) *Optical Wireless Communications. Signals and Communication Technology*. Springer, Cham., 2016, pp. 1–23. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30201-0_1
4. Добровольський Ю. Г., Ліпка В. М. Кремнієвий фотодіод для телекомунікації (FSO) з підвищеною швидкодією та чутливістю на довжині хвилі 980 нм. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*, 2024, т. 331, № 1, с. 205–214. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-331-31>
5. Rogalski A. *Infrared and Terahertz Detectors*, CRC Press, 2022. 1066 p. URL: <https://www.routledge.com/Infrared-and-Terahertz-Detectors-Third-Edition/Rogalski/p/book/9781032338668#top>
6. Мачехін Ю. П., Гнатенко О. С., Курський Ю. С. та ін. *Лазерні, оптикоелектронні прилади та системи. Ч. 1. Лазерна інформаційно-вимірювальна техніка для задач військового призначення*. Харків: ФОП Панов А. М., 2019. 156 с. URL: <https://doi.org/10.30837/978-617-7771-76-9>
7. Чадюк В. О. *Оптоелектроніка: від макро до нано. Передавання, перетворення та приймання оптичного випромінювання: навч. посіб.* У 2-х кн. Київ: КП ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2018. Кн. 1, 376 с.
8. Трофименко О. Г., Манаков С. Ю., Ларін Д. Г. *Основи програмної інженерії: навч.-метод. посібник*. Одеса: Фенікс, 2022. 197 с. URL: <https://hdl.handle.net/11300/22773>
9. Marnadu R., Chandrasekaran J., Maruthamuthu S. et al. Ultra-high photoresponse with superiorly sensitive metal-insulator-semiconductor (MIS) structured diodes for UV photodetector application. *Applied Surface Science*, 2019, vol. 30, pp. 308–322. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.02.214>
10. Kukurudziak M. Silicon four element p-i-n photodiode with improved characteristics. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2023, no. 1, pp. 92–100. <https://doi.org/10.32620/reks.2023.1.07>
11. Wu Q., Cen G., Liu Yu. A simple-structured silicon photodetector possessing asymmetric Schottky junction for NIR imaging. *Physics Letters A*, 2021, vol. 7, 127586. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2021.127586>
12. Setälä O. E., Chen K., Pasanen T. P. et al. Boron-implanted black silicon photodiode with close-to-ideal responsivity from 200 to 1000 nm. *ACS Photonics* 2023, vol. 10, iss. 6, pp. 1735–1741. <https://doi.org/10.1021/acsphotonics.2c01984>
13. Dobrovolsky Y., Sorokaty Y. Model and algorithm of creation of silicon photodiode with high sensitivity in the middle infrared area of the spectrum. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2022, no. 4, pp. 98–107. <https://doi.org/10.32620/reks.2022.4.07>
14. Bi X., Li J., Gu Z. et al. High sensitivity and dynamic-range 25 gbaud silicon receiver chipset with current-controlled DC adjustment path and cube-shape Ge-on-Si PD. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2020, vol. 67, iss. 11. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2020.3011292>
15. Raynor J. M., Seitz P. A linear array of photodetectors with wide dynamic range and near photon quantum-noise limit. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1997, vol. 61, iss. 1–3, pp. 327–330. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(97\)01481-7](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(97)01481-7)
16. Perez A., Pablo Ju., Lopez C. S., Calvo B. *Automatic gain control. Techniques and Architectures for RF Receivers*.

Springer New York, NY, 2011. URL: <https://www.springer.com/gp/book/9781461401667>

17. Thomas F. A., Dietz V., Schrafl-Altermatt M. Automatic gain control of neural coupling during cooperative hand movements. *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, article number 5959. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24498-6>

18. Veugen L.C.E., Chalupper J., Snik A.F.M. et al. Matching automatic gain control across devices in bimodal cochlear implant users. *Ear Hear*, 2016, vol. 37, iss. 3, pp. 260–70. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000260>

19. Borowski H., Isoz O., Eklof F.M. et al. detecting false signals with automatic gain control. *GPS World Staff*, 2012. URL: <https://www.gpsworld.com/detecting-false-signals-automatic-gain-control-12804/>

20. Jun Hee Jang, Hyung Jin Choi. A fast automatic gain control scheme for 3GPP LTE TDD system. 2010 IEEE 72nd Vehicular Technology Conference - Fall. Ottawa, ON, Canada, 2010, pp. 1–5, <https://doi.org/10.1109/VETECF.2010.5594461>

21. Raynor J.M., Seitz P. A linear array of photodetectors with wide dynamic range and near photon quantum-noise limit. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1997, vol. 61, iss. 1–3, pp. 327–330. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(97\)01481-7](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(97)01481-7)

22. Hodovaniouk V.M., Doktorovych I.V., Butenko V.K. et al. Silicon photodiode & preamplifier operation characteristic properties under background radiation conditions. *Semiconductor*

Physics Quantum Electronics & Optoelectronics, 2005, vol. 8, no. 1, pp. 83–86. URL: http://journal-spqeo.org.ua/n1_2005/v8n1-p083-086.pdf

23. Фрімен Е., Робсон Е. *Head First. Патерни проектування*. Харків, Фабула, 2020. 672 с.

24. Проектування спеціалізованих мікропроцесорних систем. Навчальний посібник – Електронна версія. Укладачі Г. І. Воробець, С. В. Мельничук. Чернівці : Чернівецький національний університет, 2022. 105 с.

25. Добровольський Ю.Г., Ліпка В.М. Алгоритм протидії фоновій освітленості підвищеної надійності для вимірювання енергетичної освітленості, створюваного бактерицидним опромінювачем. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*, 2024, т. 339, № 4, с. 64–71. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-339-4-11>.

26. Sze S. M., NgK. K. *Physics of Semiconductor Devices*. John Wiley & Sons Inc., New Jersey, 2006.

27. УФД15М-01 Технічні характеристики. URL: <https://zapadpribor.com.ua/ufd15m-01>

28. Яковина В. С., Сенів М. М. *Основи теорії надійності програмних систем. Навчальний посібник*. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2020. 248 с.

Дата надходження рукопису
до редакції 01.06 2025 р.

DOI: 10.15222/TKEA2025.1-2.45
UDC 535.23:621.383.52:546.28:004.9

Volodymyr LIPKA^{1,2}, Yurii DOBROVOLSKY²

Ukraine, Chernivtsi,

¹Rhythm Optoelectronics Shareholding Company,

²Chernivtsi National University name Yuriy Fedkovych

E-mail: lipka.volodymyr@chnu.edu.ua;
y.dobrovolsky@chnu.edu.ua

PHOTO RECEIVER DEVICE OF INCREASED RELIABILITY AND RESISTANCE TO BACKGROUND LIGHTING FOR FSO

The exchange of information signals using optical channels is one of the main directions of development of modern telecommunication systems. Such communication channels include, in particular, the rapidly developing free space optical (FSO) technology. Since such communication is carried out in the open air, it is necessarily affected by optical interference, which is mainly created by solar radiation. Therefore, in FSO conditions, the issue of counteracting background illumination created by sunlight becomes relevant. It is capable of generating a large photocurrent of a photodiode that receives a useful optical signal. The question arises of how to filter the useful signal, which is transmitted at a certain wavelength (in our case, it is 980 nm), from the background signal of optical interference, which can suppress the useful monochromatic signal. This is especially important when the spectral ranges of sensitivity of the photodetector and the source of optical interference overlap.

Therefore, the purpose of the research and development was to create a design of a background-resistant photo-receiving device (PRD), operating at a wavelength of 980 nm, under the conditions of illumination of the photodiode by solar radiation.

To achieve the specified goal, a study of known technical solutions was conducted, which showed that the optimal design should be one that uses optical and electronic methods. In addition, the possibility of tracking the useful signal was shown, taking into account the time during which the photodetector reacts to irradiation of the working wavelength. Namely, the growth time of the photodetector. Thus, the counteraction to the background illumination of the photodetector consists in a combination of an optical cut-off light filter, an automatic gain control circuit that compensates for the component of the photocurrent caused by the constant frequency composition characteristic of solar radiation, as well as an algorithm for selecting the useful signal based on the growth time of the photodiode at the working wavelength. This selection, as well as the general operation of the PRD, is carried out and controlled using specialized software, which is loaded into the corresponding microcontroller. Studies of the created PRD have shown that it is resistant to background solar radiation of power up to 17 mW. A study of the reliability of the PRD and software has been conducted. The reliability of the PRD is at least 500 hours of operation.

The probability of failure-free operation of the software in the operating interval from 0 to 10 hours is at least 0.98.

Keywords: photo-receiving device, background illumination, photodiode, automatic gain control, software reliability.

REFERENCES

1. Al-Gailani S. A. et al. A survey of free space optics (FSO) communication systems, links, and networks. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 7353–7373. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3048049>
2. Mikołajczyk J., Bielecki Z., Bugajski M. et al. Analysis of free-space optics development. *Metrol. Measur. Syst.*, 2017, vol. 24, no. 4, pp. 653–674. <https://doi.org/10.1515/mms-2017-0060>
3. Ghassemlooy Z. et al. An Overview of Optical Wireless Communications. In: Uysal M., Capsoni C., Ghassemlooy Z., Boucouvalas A., Udvary E. (eds) *Optical Wireless Communications. Signals and Communication Technology*. Springer, Cham., 2016, pp. 1–23. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30201-0_1
4. Dobrovolsky Y., Lipka V. Silicon photodiode for telecommunications (FSO) with increased speed and sensitivity at 980 nm. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 2024, vol. 331, no. 1, pp. 205–214. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-331-31> (Ukr)
5. Rogalski A. *Infrared and Terahertz Detectors*, CRC Press, 2022. 1066 p. Available: <https://www.routledge.com/Infrared-and-Terahertz-Detectors-Third-Edition/Rogalski/p/book/9781032338668#top>
6. Machekhin Yu.P., Hnatenko O.S., Kurskyi Yu.S. et al. Lazerni, optyko-elektronni prylady ta systemy. Ch. 1. *Lazerna informatsiino-vymiriuvalna tekhnika dlia zadach viiskovoho pryznachennia* [Laser, optoelectronic devices and systems. Part 1. Laser information and measuring equipment for military purposes]. Kharkiv: FOP Panov A.M., 2019. 156 p. Available: <https://doi.org/10.30837/978-617-7771-76-9> (Ukr)
7. Chadyuk V. O. *Optoelektronika: vid makro do nano. Peredavannya, peretvorennia ta pryymannya optychnoho vy-prominyuvannya : navch. posib* [Optoelectronics: from macro to nano. Transmission, conversion and reception of optical radiation: a textbook]. In 2 books. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Publishing House “Polytechnics”, 2018. Book 1, 376 p. (Ukr)
8. Trofymenko O. H., Manakov S. YU., Larin D. H. *Osnovy prohrannoyi inzheneriyi : navch.-metod. posibnyk* [Fundamentals of software engineering: teaching and methodical manual]. Odesa: Feniks, 2022. 197 c. Available: <https://hdl.handle.net/11300/22773> (Ukr)
9. Marnadu R., Chandrasekaran J., Maruthamuthu S. et al. Ultra-high photoresponse with superiorly sensitive metal-insulator-semiconductor (MIS) structured diodes for UV photodetector application. *Applied Surface Science*, 2019, vol. 30, pp. 308–322. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.02.214>
10. Kukurudziak M. Silicon four element p-i-n photodiode with improved characteristics. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2023, no. 1, pp. 92–100. <https://doi.org/10.32620/reks.2023.1.07>
11. Wu Q., Cen G., Liu Yu. A simple-structured silicon photodetector possessing asymmetric Schottky junction for NIR imaging. *Physics Letters A*, 2021, vol. 7, 127586. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2021.127586>
12. Setälä O.E., Chen K., Pasanen T.P. et al. Boron-implanted black silicon photodiode with close-to-ideal responsivity from 200 to 1000 nm. *ACS Photonics* 2023, vol. 10, iss. 6, pp. 1735-1741. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.2c01984>
13. Dobrovolsky Y., Sorokaty Y. Model and algorithm of creation of silicon photodiode with high sensitivity in the middle infrared area of the spectrum. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2022, no. 4, pp. 98–107. <https://doi.org/10.32620/reks.2022.4.07>
14. Bi X., Li J., Gu Z. et al. High sensitivity and dynamic-range 25 gbaud silicon receiver chipset with current-controlled DC adjustment path and cube-shape Ge-on-Si PD. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2020, vol. 67, iss. 11. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2020.3011292>
15. Raynor J.M., Seitz P. A linear array of photodetectors with wide dynamic range and near photon quantum-noise limit. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1997, vol. 61, iss. 1–3, pp. 327-330. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(97\)01481-7](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(97)01481-7)
16. Perez A., Pablo Ju., Lopez C. S., Calvo B. *Automatic gain control. Techniques and Architectures for RF Receivers*. Springer New York, NY, 2011. Available: <https://www.springer.com/gp/book/9781461401667>
17. Thomas F. A., Dietz V., Schrafl-Altermatt M. Automatic gain control of neural coupling during cooperative hand movements. *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, article number 5959. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24498-6>
18. Veugen L.C.E., Chalupper J., Snik A.F.M. et al. Matching automatic gain control across devices in bimodal cochlear implant users. *Ear Hear*, 2016, vol. 37, iss. 3, pp. 260–70. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000260>
19. Borowski H., Isoz O., Eklof F.M. et al. detecting false signals with automatic gain control. *GPS World Staff*, 2012. Available: <https://www.gpsworld.com/detecting-false-signals-automatic-gain-control-12804/>
20. Jun Hee Jang, Hyung Jin Choi. A fast automatic gain control scheme for 3GPP LTE TDD system. 2010 IEEE 72nd Vehicular Technology Conference - Fall. Ottawa, ON, Canada, 2010, pp. 1–5, <https://doi.org/10.1109/VETEcf.2010.5594461>
21. Raynor J.M., Seitz P. A linear array of photodetectors with wide dynamic range and near photon quantum-noise limit. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1997, vol. 61, iss. 1–3, pp. 327-330. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(97\)01481-7](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(97)01481-7)
22. Hodovaniouk V.M., Doktorovych I.V., Butenko V.K. et al. Silicon photodiode & preamplifier operation characteristic properties under background radiation conditions. *Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2005, vol. 8, no. 1, pp. 83–86. Available: http://journal-spqeo.org.ua/n1_2005/v8n1-p083-086.pdf
23. Freeman E., Bates B., Sierra K., Robson E. *Head First Design Patterns: A Brain-Friendly Guide* O'Reilly MediaB, 2004. 694 p.
24. *Proektuvannya spetsializovanykh mikroprotsessornykh system* [Design of specialized microprocessor systems. Textbook – Electronic version]. Compiled by G. I. Vorobets, S. V. Melnychuk. Chernivtsi: Chernivtsi National University, 2022. 105 p. (Ukr)
25. Dobrovolsky, Y., Lipka, V. High reliability anti-background illumination algorithm for measuring energy illumination produced by a bactericidal irradiator. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 2024, vol. 339, no. 4, pp. 64–71. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-339-4-11> (Ukr)
26. Sze S. M., NgK. K. *Physics of Semiconductor Devices*. John Wiley & Sons Inc., New Jersey, 2006.
27. *UFD15M-01. Technical specifications*. Available: <https://zapadpribor.com/en/ufd15m-01/>
28. Yakovyna V. S., Seniv M. M. *Osnovy teorii nadiynosti prohrannykh system. Navchal'nyy posibnyk*. [Fundamentals of the Theory of Reliability of Software Systems. Textbook]. Lviv : Lviv Polytechnic Publishing House, 2020. 248 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/>).