

**СЕКЦІЯ 2**  
**ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИЛАДИ І СИСТЕМИ.**  
**ФОТОНІКА**

UDC 538.975, 539.51, 621.383

**EFFICIENCY OF FILM SOLAR ELEMENTS  
DEPENDING ON THE WORKING TEMPERATURE**

*Lelyuk S. Yu., Minakova K. O., Zaitsev R. V., Kirichenko M. V.*  
*National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”,  
Kharkiv, Ukraine*

*E-mail: [stanislav.leliuk@infiz.khpi.edu.ua](mailto:stanislav.leliuk@infiz.khpi.edu.ua), [ksenii.minakova@khpi.edu.ua](mailto:ksenii.minakova@khpi.edu.ua),  
[roman.zaitsev@khpi.edu.ua](mailto:roman.zaitsev@khpi.edu.ua), [mykhailo.kirichenko@khpi.edu.ua](mailto:mykhailo.kirichenko@khpi.edu.ua)*

Recently, the development of combined photovoltaic installations, in which thermal energy is utilized during the production of electricity, has actively begun. Photoelectric converters (PhEC), for use in such systems [1, 2], must efficiently generate electrical energy at an operating temperature of 50-55°C; they must also provide a solar energy absorption coefficient of at least 90% and have a reflection coefficient in the infrared part of the spectrum of no more than 10%.

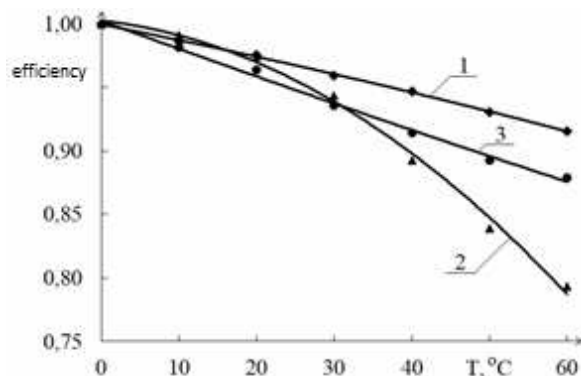


Fig. 1. The relative decrease in the efficiency of film PhECs with an increase in operating temperature: 1 – based on CdTe; 2 – based on CuInSe<sub>2</sub>; 3 – based on amorphous silicon

A comparison of studies of the temperature dependence of the efficiency of film PhECs based on CdTe and CuInSe<sub>2</sub> compounds, produced in laboratory conditions, and amorphous silicon, produced by an industrial method [3], showed (Fig. 1), that the smallest reduction in efficiency when the operating temperature is increased has device designs based on base layers of cadmium telluride.

At the temperature of 50°C, the efficiency decreases by only 1%, and the relative rate of decrease is only 0.14 rel., %/C (Table 1). The experimentally obtained values of the temperature efficiency of single-junction film PhECs are quite accurately correlated with the band gap of the corresponding absorbing semiconductor material (Table), the

temperature efficiency decreases proportionally with the increase in the band gap of the main semiconductor material.

Table. Experimentally obtained coefficients of reduction in the efficiency of film PhECs and the width of the band gap of their basic semiconductor layers

Based material	Temperature coefficient of efficiency, rel., %/°C	Band gap width of a semiconductor, eV
CdTe	-0,14	1,44
Amorphous Si	-0,21	1,2-1,3
CuInSe <sub>2</sub>	-0,36	1,04-1,07

*Keywords:* photoelectric converters, temperature efficiency, semiconductor material, cadmium telluride.

#### References

- [1] P. Singh, N.M. Ravindra, “Temperature dependence of solar cell performance – an analysis”, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 101, pp. 36-45, 2012.
- [2] V. Perraki, G. Tsolkas, “Temperature dependence on the photovoltaic properties of selected thin-film modules”, *International Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 2, no. 4, pp. 140-146, 2013.
- [3] A. Virtuani, D. Pavanello, G. Friesen, “Overview of temperature coefficients of different thin film photovoltaic technologies”, in *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, pp. 4248-4252, 2010.

UDC 544.653.1:538.975

#### EFFECT OF FAST SWITCHING IN THIN FILMS OF CADMIUM TELLURIDE

*Kirichenko M. V., Khrypunov M. S., Shkoda D. S., Drozdov A. M., Zaitsev L. V.  
National Technical university “Kharkiv Polytechnic Institute”,  
Kharkiv, Ukraine*

*E-mail: [mykhailo.kirichenko@kphi.edu.ua](mailto:mykhailo.kirichenko@kphi.edu.ua), [mykhailo.khrypunov@infiz.kphi.edu.ua](mailto:mykhailo.khrypunov@infiz.kphi.edu.ua),  
[dmytro.shkoda@infiz.kphi.edu.ua](mailto:dmytro.shkoda@infiz.kphi.edu.ua), [anton.drozdov@kphi.edu.ua](mailto:anton.drozdov@kphi.edu.ua), [lilia.zaitseva@kphi.edu.ua](mailto:lilia.zaitseva@kphi.edu.ua)*

To ensure the protection of electric circuits, protection elements of radio electronic equipment (REA) against impulse overvoltages are used. The most important property of protection elements: gas dischargers, semiconductor zener diodes, varistors and limiting diodes is their ability to reduce their resistance  $R_e$  from  $5 \cdot 10^4 - 10^{10}$  Ohm to a value significantly lower than the input resistance of the element in a short time  $\tau_{sw}$  (switching time or tripping time) REA, when the voltage  $U_i$  in the circuit exceeds the value of the threshold voltage  $U_t$ , which is called the switching threshold or activation

threshold [1]. If such protection elements are connected in parallel to the protected device, then when  $U_i > U_t$ , during  $\tau_s$ , the amplitude value of the voltage on the device decreases to the value  $U_t$  (stabilizers, varistors, limiting diodes) or to a value significantly lower than  $U_t$  (gas dischargers). Limiting silicon diodes have become the most widespread, as they have a high speed ( $\tau_s$  at the level of 1 ns) [2]. However, they can shunt a limited amount of energy and have an interelectrode capacitance of 20 pF, which limits their use for the protection of microwave REA.

Therefore, in order to create protective elements for microwave REA, in this work, the amplitude-time characteristics of switching in thin films of cadmium telluride were studied.

Amplitude-time characteristics of the switching process in the obtained thin films of cadmium telluride were studied according to experimental oscillograms. A qualitative view of a typical oscillogram of an experimental plot of voltage on film samples is shown in Figure 1 (curve 1). This figure also shows a qualitative view of a typical oscillogram of voltage pulses acting on the sample [3].

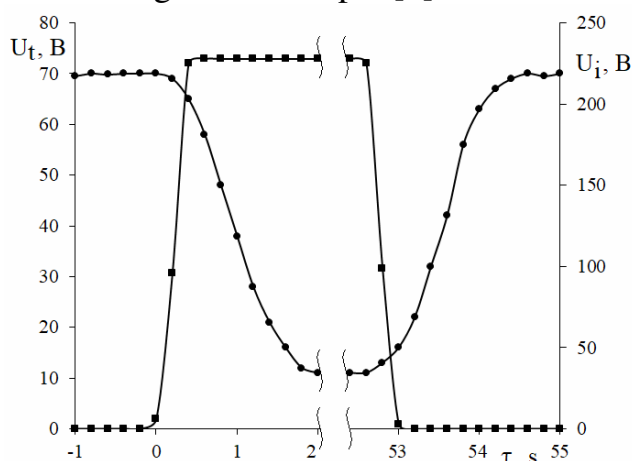


Fig. 1. Typical oscillogram of experimental voltage plot on film samples of cadmium telluride

The determination of the characteristics of the switching process was preceded by the determination of the trigger threshold, which was carried out by applying a rectangular pulse to the samples. This pulse had the minimum amplitude necessary for the first trigger. Then, several measuring pulses with the minimum necessary amplitude for successive activations, which was identified with the value of the threshold voltage  $U_t$ , were applied. The results of the research are shown in Table.

The table shows the voltages of the trigger thresholds  $U_t$ , the maximum voltages on the samples  $U_s$ , the maximum residual voltage on the samples  $U_{max}$ , the minimum residual voltage on the samples  $U_{min}$ , the switching time to the low-resistance state  $\tau_s$ . Table 1 also shows the values of the electrical resistance of the samples to direct current  $R_e$  after 20-fold impulse exposure with the amplitude  $U_i$ . It was established that the

magnitudes of the amplitude-time characteristics do not depend on the polarity of the action of the current pulses on the film samples.

Table. Results of studies of amplitude-time characteristics of switching of thin-film samples of cadmium telluride and electrical resistance of these samples to direct current after a series of pulse impacts

d, $\mu\text{m}$	$U_t, \text{V}$	$U_s/U_i, \text{V}$	$(U_{\text{max}}-U_{\text{min}})/U_i, \text{V}$	$\tau_s, \text{ns}$	$R_e, \text{Ohm}$
3	75	42/285	(20-10)/285	<2	$1.7 \cdot 10^5$
3	75	38/71	(20-10)/271	<2	$2.0 \cdot 10^5$
4	70	40/214	(13-5)/214	<2	$1.3 \cdot 10^6$
4	70	50/211	(12-5)/211	2	$7.7 \cdot 10^6$
6	70	52/216	(15-7)/216	2	$5.6 \cdot 10^6$
6	75	51/225	(15-7)/225	2	$5.6 \cdot 10^6$
7	80	55/240	(20-10)/240	<2	$1.5 \cdot 10^6$
7	70	53/219	(20-10)/219	2	$1.7 \cdot 10^6$
8	105	120/316	(40-20)/316	2	$2.3 \cdot 10^6$

It was experimentally established that cadmium telluride layers with a thickness of 3 to 7  $\mu\text{m}$  can be used to create protection elements for ultra-high-frequency radio electronic equipment, since samples representing film layers of cadmium telluride placed in the housing of microwave diodes, when electric pulses of 1  $\mu\text{s}$  duration were applied to them, had switching time at the level of 2 ns and had a capacity of no more than 2 pF. At the same time, the value of the residual voltage could be reduced to 5 V, and the value of the activation voltage could be adjusted by the thickness of the base layer.

*Keywords:* switching process in thin films, cadmium telluride layer, protective element.

#### References

- [1] M. V. Kirichenko, A. N. Drozdov, D. S. Shkoda, R. V. Zaitsev, G. S. Khrypunov, K. O. Minakova, V. O. Nikitin, "Study of Fast Switching Processes in Cadmium Telluride Based Structures", *Journal of nano- and electronic physics*, vol. 14, no. 4, p. 04031, 2022.
- [2] M. V. Kirichenko, G. S. Khrypunov, M. G. Khrypunov, R. V. Zaitsev, A. N. Drozdov, "EMI protection elements on cadmium telluride thin films", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 459, p. 012009, 2018.
- [3] M. G. Khrypunov, R. V. Zaitsev, D. A. Kudii, A. L. Khrypunova, "Amplitude-time Characteristics of Switching in Thin Films of Cadmium Telluride", *Journal of nano- and electronic physics*, vol. 10, no. 1, p. 01016, 2018.

УДК 681.7:[535.8+62-4]

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФЕКТІВ ДИСЛОКАЦІЇ В НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛАХ ОПТИЧНИМИ МЕТОДАМИ

*Пятайкіна М. І., Стрілкова Т. О.*

*Харківський національний університет радіоелектроніки,  
Харків, Україна*

*E-mail: [mariia.piataikina@nure.ua](mailto:mariia.piataikina@nure.ua), [tetiana.strilkova@nure.ua](mailto:tetiana.strilkova@nure.ua)*

Важливим елементом автоматичного контролю та керування машинами, різноманітними технологічними процесами є напівпровідникові датчики, які ґрунтовані на перетворенні фізичних величин в електричні сигнали. Основним параметром напівпровідникових сенсорів є чутливість, яка суттєво залежить не тільки від властивостей матеріалів, які використовуються, а й від їх дефектності.

Вкрай важливим є модернізація технології отримання кристалічної структури напівпровідників та вдосконалення методів їх дослідження. Існування ідеальних кристалів можна уявити лише за певних умов, наприклад при температурі абсолютного нуля. Реальні ж кристалічні структури при ряді технологічних операцій (вирощування кристалу, окислення, епітаксія, дифузія тощо) зазнають дефектоутворення. Дефекти в напівпровідниках підрозділяють на точкові (вакансії, атоми в міжвузлях, атоми домішок у вузлах або/та міжвузлях), лінійні (крайова та гвинтова дислокації), поверхневі (границі між зернами кристалів, ряди лінійних дислокацій) та об'ємні (пори, тріщини, включення іншої речовини, напруженості навколо дефектів меншої мірності, кластери тощо). Поява дефектів пов'язана з процесами нагрівання та опромінення кристалів, з наявністю спеціально введених або неконтрольованих домішок, бруду, внаслідок особливостей вирощування кристалів тощо.

На утворення дефектів (дислокацій, кластерів, точкових дефектів) в процесі вирощування кристалів кремнію впливає декілька факторів. По-перше, це недостатній градієнт температур в установці, через який виникає переохолодження рідини поблизу фронту кристалізації, що призводить до формування полікристалу. Якщо в кристалі вже є дислокації, то висока швидкість та нерівномірне охолодження кристалу може привести до збільшення кількості дислокацій. По-друге, неможливо виростити бездислокаційні кристали, якщо концентрація легуючої домішки близька до границі розчинності (наприклад, більше  $10^{22}$  см<sup>-3</sup> у випадку фосфору, як в нашому дослідженні). Більшість кристалів легується до питомого опору порядку 1-10 Ом·см, тому виникнення дислокацій відбувається через наявність інших домішок, що дифундують (вуглецю, кисню). В той же час в бездислокаційних кристалах утворюються мікродефекти (дислокаційні петлі), які наявні тільки в напівпровідниках і мають розміри 80-3000 нм.

До утворення кристалографічних дефектів призводять термічні, механічні та хімічні напруги, які виникають під час термічного окису кремнію. Радіаційні дефекти в кристалічній структурі Si виникають через процеси первинного та вторинного зіткнення імплантованих іонів (фосфору, бору, миш'яку тощо) з атомами вихідного кристалу. При цих зіткненнях виникає велика концентрація точкових дефектів. Це пов'язано з наявністю пружного напруження навколо дислокацій та порушенням періодичності атомної решітки в області дислокації, що призводить до появи неспарених електронів, які можуть захоплювати електрони із зони провідності і внаслідок цього дислокація заряджається негативно в Si n-типу. В результаті біля негативно зарядженої дислокації буде створюватися потенційний бар'єр.

Створення циліндричної області просторового заряду навколо дислокації супроводжується захватом основних носіїв заряду. Якщо потік носіїв заряду йде перпендикулярно лініям дислокацій, то відбувається зменшення провідності матеріалу, в іншому випадку провідність не змінюється.

Кремній є одним з основних матеріалів для виготовлення компонентів та пристроїв функціональної електроніки, в тому числі й для сенсорів [1, 2]. Порівняно з іншими напівпровідниками (Ge, GaAs), кремній має ряд переваг: доступність, більш проста та дешева технологія виготовлення, хороші механічні та електричні характеристики.

Структурні дефекти в напівпровідниках негативно впливають на електричні параметри напівпровідникових приладів. Дослідження точкових дефектів, гвинтових та лінійних дислокацій, дендритів в зразку кремнію (111) легованого фосфором були наведені нами у матеріалах конференції [3].

До сучасних методів виявлення дефектів в структурах напівпровідників належать оптичні методи, електронна мікроскопія, рентгенівська топографія, метод декорування структурних дефектів домішками, металографічний метод (метод селективного травлення) та інші. Найбільш широке застосування отримали металографічний та рентгенівський методи.

Металографічний метод дозволяє виявляти дислокації та мікрodefekти в напівпровідниках, але лише ті, що перпендикулярні шліфу, тому щільність дислокацій, розрахована по кількості ямок травлення, є дещо заниженою. Цей метод дослідження дефектів в зразках Si було використано нами в роботі [3].

До оптичних методів контролю дефектів структур відносяться: візуально-оптичні, фотометричні, спектральні, тепловізійні, інтерференційні, дифракційні, поляризаційні, лазерні, голографічні та інші. Візуально-оптичний метод – найбільш доступний, простий та менш трудомісткий метод візуального контролю поверхневих дефектів матеріалу з використанням оптичних приладів (луп, мікроскопів, ендоскопів).

**XXII Міжнародна науково-технічна конференція “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”, 16-17 травня 2023 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна**

За допомогою оптичних методів є можливість отримати зображення дефектів в кристалах, наприклад, виявити такі недоліки кристалічної структури як границі зерен або субзерен, окремі дислокації, дефекти пакування. Оптичні методи дозволяють досліджувати об’єкти розміром менше 100 нм, щільністю до  $10^{12} \text{ см}^{-2}$  та спостерігати динаміку дислокаційних дефектів.

Досліджувані дефекти можуть мати різноманітні типи просторового розподілу, наприклад стохастичні (хаотичні) та детерміновані (зосереджені).

В доповіді представлено метод автоматичного дослідження дислокацій в кристалах. В якості основ методу обробки зображень дефектів в кристалах використані теоретичні та практичні положення, які опубліковані в роботі [4]. Моделювання процесу розпізнавання об’єктів, які досліджуються з обраними характеристиками виявлення, представлено на рис.1.

Метод автоматичного дослідження дозволяє:

- уточнювати форми дефектів;
- визначати їх розташування в кристалі;
- визначати просторові характеристики дефектів;
- формувати розподіл дефектів за розмірами.

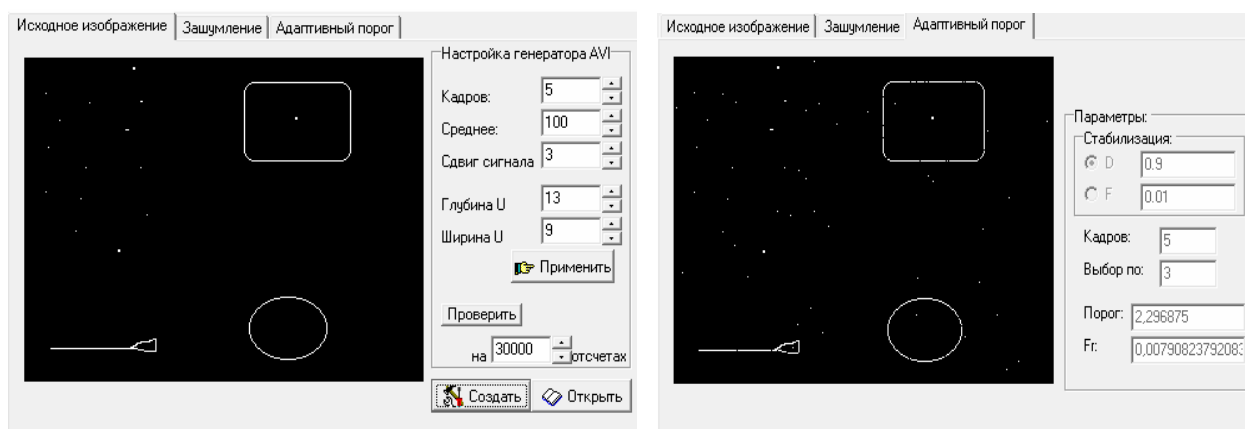


Рис. 1. Моделювання процесу розпізнавання об’єктів, які досліджуються з обраними характеристиками виявлення

Запропонований метод дозволяє формувати Big Data та надає можливість врахувати вплив процесів дифузії та самодифузії домішок, процесів дефектоутворення в напівпровідниках на електричні параметри напівпровідникових приладів.

**Ключові слова:** дефекти дислокацій; кристал; обробка зображень; щільність дислокацій

#### **Література**

- [1] M. Ferrero, R. Arcidiacono, M. Mandurrino, V. Sola, N. Cartiglia, *An Introduction to Ultra-Fast Silicon Detectors*, 2021.196 p.

**XXII Міжнародна науково-технічна конференція “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”, 16-17 травня 2023 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна**

- [2] Gian-Franco Dalla Betta, Marco Povoli «Progress in 3D Silicon Radiation Detectors», *Frontiers in Physics*, 2022, vol. 10, pp. 1-17.
- [3] Т. О. Стрілкова, О. С. Калмиков, Г. М. Бендеберя, М. І. Пятайкина, О. В. Поліщук «Стохастичні моделі вихідних сигналів в оптико-електронних системах», *Колективна монографія «Сучасні технології в науці та освіті»*, Сєверодонецьк, 2021, с. 256-259.
- [4] Т. О. Strelkova, A. I. Strelkov, V. M. Kartashov, A. P. Lytyuga, A. S. Kalmykov. «Methods of Reception and Signal Processing in Machine Vision Systems», *Examining Optoelectronics in Machine Vision and Applications in Industry 4.0.*, 2021, pp. 71-102.

УДК 681.785.4: [535.37+535.36+577.344]

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПОШИРЕННЯ ОПТИЧНОГО  
ВИПРОМІНЮВАННЯ В АНІЗОТРОПНОМУ СЕРЕДОВИЩІ**

*Калмиков О. С., Стрілкова Т. О.  
Харківський національний університет радіоелектроніки,  
Харків, Україна  
E-mail: [oleksandr.kalmykov@nure.ua](mailto:oleksandr.kalmykov@nure.ua), [tetiana.strilkova@nure.ua](mailto:tetiana.strilkova@nure.ua)*

Методики дослідження надслабкого випромінювання біологічних об'єктів поділяють: за факторами, які викликають хемілюмінесценцію; за часовим та просторовим розподілом; статистичними особливостями розподілу потоку сигнальних фотонів за часом та простором; статистичним аналізом шумової складової приймачів випромінювання.

Біологічні тканини являють собою середовища з низьким рівнем поглинання та високою здатністю розсіювання у видимому та інфрачервоному спектрі електромагнітних хвиль. Оптичне випромінювання в біологічних тканинах може поглинатися хромофорами. Розсіювання визначається морфологією біологічної тканини. Різниця показників заломлення клітинної мембрани, цитоплазми, мітохондрій, міжтканинної рідини суттєво впливають на розсіювання оптичного випромінювання в тканинах.

При великих рівнях розсіювання фотони можуть переміщуватись в середовищі впродовж деякого часу та розповсюджуватись довгими траєкторіями. Випромінювання характеризується дифузним, субдифузним та супердифузним процесом.

Основними методами реєстрації надслабкого випромінювання є фотометричний та фотографічний.

Труднощі при прийманні надслабкого оптичного випромінювання виникають при застосуванні кількісних методів обробки результатів. Процеси реєстрації характеризуються величинами відношення сигнал/шум менш 5, що ускладнює виявлення корисного випромінювання.

**XXII Міжнародна науково-технічна конференція “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”, 16-17 травня 2023 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна**

В роботах [1, 2] представлені моделі розповсюдження оптичного випромінювання в анізотропних середовищах. Особлива увага приділяється аналізу особливостей часового та просторового розподілу фотонів. Нами в роботах [3, 4] були представлені стохастичні моделі оптичного випромінювання з урахуванням статистичних властивостей та стійких законів розподілення.

В доповіді представлено розроблену модель для дослідження процесу розповсюдження фотонів в анізотропному середовищі. Модель враховує стохастичні параметри випромінювання, середовища, шумів фотоприймача. Процес формування генеральної сукупності випадкових величин ґрунтується на фізичній природі виникнення та розповсюдження надслабкого випромінювання в біологічних тканинах та взаємодії випромінювання з елементами фотоприймального пристрою. Аналізуються статистичні, просторові та енергетичні параметри випромінювання, яке реєструється.

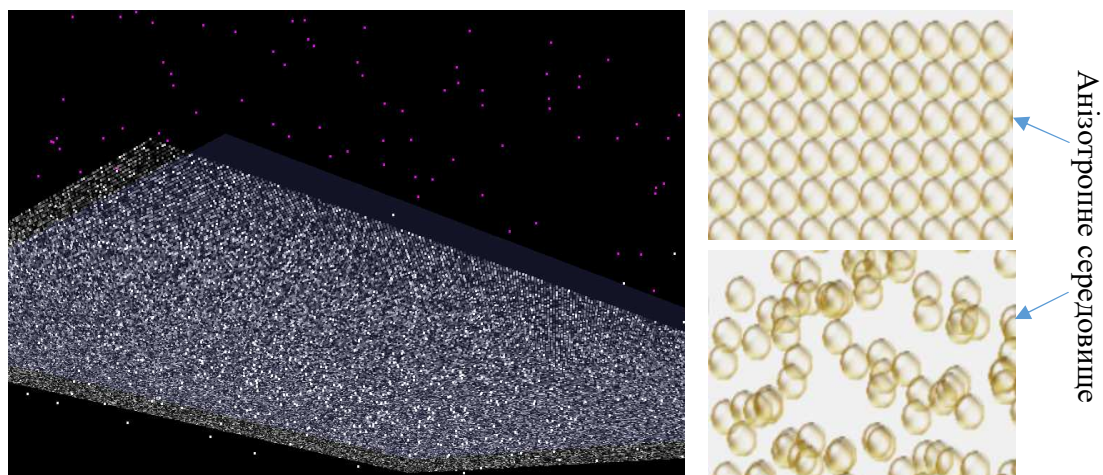


Рис. 1. 3D модель формування відгуку фотоприймача при реєстрації слабкого оптичного випромінювання

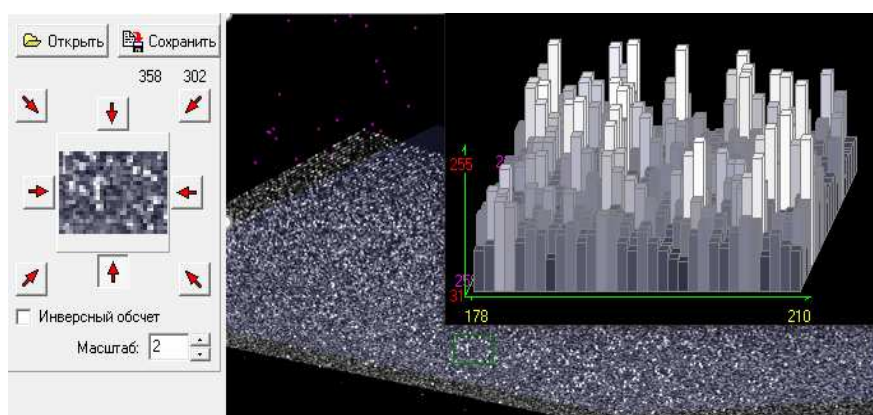


Рис. 2. Побудова гістограми інтенсивностей, які сформовані фотоприймачем за час накопичення

**XXII Міжнародна науково-технічна конференція “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”, 16-17 травня 2023 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна**

*Ключові слова:* надслабке випромінювання, хемілюмінесценція, дифузія фотонів, аномальна дифузія, обробка сигналів, оптико-електронна система.

**Література**

- [1] С. В. Павлов, С. Є. Тужанський, Т. І. Козловська, та А. В. Козак, «Імітаційна модель розповсюдження оптичного випромінювання в біотканинах», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с. 191-194, 2011.
- [2] V. Tuchin, D. Zhu, and E. Genina. *Handbook of Tissue Optical Clearing: New Prospects in Optical Imaging*. CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2022. DOI: 10.1201/9781003025252
- [3] Т. О. Стрілкова, О. С. Калмиков та О. П. Литюга, “Статистична модель сигналів в оптико-електронних системах при реєстрації надслабкого випромінювання”, на *XVII Міжнар. наук.-техн. конф. ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи*, Київ, 2019, с. 34-35.
- [4] Т. О. Стрілкова, О. С. Калмиков, та О. П. Литюга, «Реєстрація надслабкого випромінювання в оптико-електронних системах», на *XXI Між нар. наук.-техн. конф. ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи*, Київ, 2022, с. 28.

УДК 681.758

**АНАЛІЗ ОПТИЧНИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ  
ЛІНІЙНИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ ОБ’ЄКТІВ**

*Денисюк В. Ю., Гарбарчук Р. А., Холонівець А. В.  
Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна  
E-mail: [v.denysiuk@lntu.edu.ua](mailto:v.denysiuk@lntu.edu.ua)*

Сучасне машинобудування, приладобудування, робототехніка, оптичне виробництво, гідротехнічне будівництво та інші галузі промисловості тісно пов’язані з необхідністю точного вимірювання переміщення об’єктів і вимірюванням лінійних розмірів до них. Різноманіття областей використання вимірювачів лінійних переміщень і відстаней, постійне зростання вимог до точності датчиків, діапазону вимірюваних величин, а також спрямованість на вирішення конкретних практичних задач дозволяють говорити про те, що розробка і дослідження нових вимірювачів лінійних переміщень і вимірювачів відстаней, а також удосконалення існуючих датчиків є важливим і актуальним завданням.

З відомих високоточних методів вимірювання лінійних переміщень можна виділити інтерференційний і триангуляційний, а також метод з використанням оптичних растрів.

Лазерні інтерферометри мають великий діапазон вимірювання і високу точність, проте вони також мають високу вартість і складні в експлуатації. Триангуляційні датчики прості в реалізації і мають різні діапазони вимірюваних відстаней, що залежать від бази датчика, але меншу точність, ніж у інтерферометрів. Широко поширені датчики на оптичних растрах, основна похибка яких залежить від дискретності фотоприймача, що в них

використовується.

Можна окремо виділити деякі особливості існуючих вимірювальних приладів:

- існуючі вимірювачі лінійних переміщень є однокоординатними;
- більшість вимірювачів призначені для вимірювання поздовжніх переміщень;
- значна частина вимірювачів є контактними.

Таким чином, для вирішення задач, пов'язаних з вимірюванням поперечних переміщень об'єктів, необхідне ускладнення конструкції пов'язане з непрофільним використанням вимірювача. При необхідності здійснення вимірювань переміщень за двома і більше координатами, відбувається ще більше ускладнення конструкції через вимоги до взаємного розташування декількох вимірювачів [1].

Пропоновані методи вимірювання дозволяють проводити контактні і безконтактні вимірювання переміщення за двома координатами в напрямку нормального до напрямку поширення світлової хвилі. Дана особливість пропонованих методів уможливорює створення вимірювальних пристроїв, що дозволяють здійснювати:

- вимірювання і контроль неспіввісності отворів несучих елементів конструкцій приладів і пристроїв (монтування телескопів, блоки двигунів внутрішнього згоряння, кільця карданні);
- безпосереднє вимірювання величини переміщення об'єкта;
- вимірювання величини биття деталей і вузлів;
- центрування елементів механізмів і приладів (оправ об'єктивів, деталей корпусних конструкцій) тощо.

Перетворювачі лінійних переміщень призначені для інформаційного зв'язку за положенням між об'єктом, що позиціонується і пристроєм числового програмного керування або пристроєм цифрової індикації. Особливість цих перетворювачів полягає у використанні в якості міри довжини лінійної шкали, що є носієм вимірювального та індикаторного растрів. Датчики лінійних переміщень дозволяють визначити положення на лінійній осі без використання додаткових механічних передавальних елементів. Відкриті датчики лінійних переміщень застосовуються на верстатах і обладнанні, для роботи яких потрібна висока точність вимірювального значення. До найбільш поширених областей застосування відносяться: технологічне і вимірювальне обладнання напівпровідникової промисловості, установки автоматичного монтажу, ультрапрецизійні верстати і установки, наприклад, верстат для алмазного точіння елементів оптичних конструкцій, лоботокарні верстати для обробки магнітних дискових накопичувачів, шліфувальні верстати для обробки феритових матеріалів тощо, високоточні верстати, вимірювальні машини і компаратори, вимірювальні мікроскопи та інші прецизійні вимірювальні прилади, прямі приводи [2].

Робота оптико-електронних перетворювачів лінійних переміщень заснована на

реєстрації відносної величини потоку, що пройшов через вимірювальний та індикаторний растри оптичного випромінювання як координатно-періодичної функції взаємного просторового положення вимірювального та індикаторного растрів [3].

Перетворювачі послідовного підрахунку за методом визначення поточної координати контрольованого об'єкта можна розділити на три підгрупи: інкрементні перетворювачі, квазіабсолютні і абсолютні.

Інкрементний (накопичуючий) перетворювач реагує не на просторове положення, а на просторове переміщення, яке за допомогою спеціальної схеми поділяється на ряд елементарних збільшень. Накопичуючи ці збільшення шляхом підрахунку, перетворювач формує цифровий код, пропорційний вимірюваному просторовому положенню.

У випадку квазіабсолютних перетворювачів поточна координата починає визначатися шляхом підрахунку послідовних збільшень (як у накопичувальних) лише після проходження референтної мітки. В цьому випадку процес перетворення настає не відразу після включення обладнання.

В абсолютних перетворювачах не потрібне проходження референтних міток, і поточна координата визначається відразу при включенні. Таким чином, в абсолютних перетворювачах кожному значенню вхідного переміщення відповідає значення числового еквівалента, який формується на виході, як правило, у вигляді цифрового коду.

Існують різні типи сполучення растрів: муарове, ноніусне, обтюраційне. Ширина муарової смуги, при  $\alpha$  близькому до нуля, набагато більше розмірів використовуваних на практиці фотоприймачів. Дана обставина створює істотні переваги у використанні растрового сполучення з обтюраційними ланками. Пропускання обтюраційного сполучення таке ж, як і у муарового сполучення і виконує функцію фільтру вищих частот.

Найбільший вплив на основну похибку здійснюють дві складові: температурна похибка та похибка дискретизації. Решта складових похибки несуттєві. Температурний фактор можна враховувати при вимірюваннях і, отже, виключити з розрахунків. Інші фактори згідно з критерієм незначних похибок можна виключити. Таким чином, залишається невиключеною похибка дискретизації приладу, яка становить основну помилку вимірювання. Основні характеристики деяких існуючих аналогів представлені у таблиці 1.

З таблиці 1 видно, що сучасні оптико-електронні перетворювачі лінійних переміщень на оптичних растрах дозволяють досягати досить високої точності при лінійних вимірюваннях переміщень об'єктів.

Однак, для досягнення малих значень величин похибок необхідно, щоб матеріал, на якому виготовляється шкала, і підкладка були з досить низьким значенням температурного коефіцієнта лінійного розширення і необхідна лінійна

**XXII Міжнародна науково-технічна конференція “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”, 16-17 травня 2023 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна**

компенсація похибки по довжині у вимірвальній електроніці.

Таблиця 1. Порівняльні характеристики деяких растрових лінійних вимірвачів

Найменування серії	Тип	Діапазон вимірювання, мм	Похибка вимірювання, мкм	Дискретність, мкм
Heidenhain				
LIC 4015	Абсолютний	140 – 27040	±5	0,001
LIP 372	Інкрементний	70 – 270	±0,5	0,001
LIF 471		70 – 1020	±3	0,01
LIDA 473		140 – 3040	±5	0,01

*Ключові слова:* вимірювання, похибка, точність, перетворювач, растр.

**Література**

- [1] О. В. Афанасьєва, Ю. С. Курський, Є. М. Одаренко, *Оптичні вимірювання: навч. посіб.* Харків, Україна: ХНУРЕ, 2021. Ч.1.
- [2] Г. С. Тимчик, В. І. Скицюк, Т. Р. Ключко, *Оптичні вимірювання у механічній обробці деталей: монографія.* Київ, Україна: НТУУ «КПІ», 2009.
- [3] В. Ю. Денисюк, В. В. Пташенчук, “Аналіз методів метрологічного забезпечення високоточного контролю похибок механічних пристроїв переміщень об’єктів”, *«Перспективні технології та прилади»*: зб. статей. Вип. 21, с. 20–25, 2022.

УДК 623.4:681.7.069.24

**ПРОБЛЕМНІ ПИТАННЯ СИЛОВОГО УРАЖЕННЯ ЦІЛЕЙ  
ЛАЗЕРНОЮ ЗБРОЄЮ**

*Федоров П. М., Богучарський В. В., Гамалій Н. В.  
Центральний НДІ ОВТ ЗС України, Київ, Україна  
E-mail: [pamyf@i.ua](mailto:pamyf@i.ua), [bogww@ukr.net](mailto:bogww@ukr.net), [1974gamalii@ukr.net](mailto:1974gamalii@ukr.net)*

В сучасних умовах рівень розвитку лазерної техніки в будь-якій державі вважається одним з основних показників її економічного розвитку і промислової могутності. Крім цивільного використання, лазери знаходять широке застосування у військовій техніці: оптико-електронних системах зв'язку, локації, лазерних далекомірах, лазерних гіроскопах тощо. Загальною тенденцією останнього десятиліття є також використання лазерів як нетрадиційної зброї, призначеної для ураження противника. Розробка бойових лазерних систем для силового ураження наземних і повітряних цілей є одним з пріоритетних напрямів розвитку зброї на нетрадиційних принципах дії.

Можливі такі наслідки ураження залежно від потужності лазерної зброї: засліплення (тимчасове), термічні опіки особового складу;

**XXII Міжнародна науково-технічна конференція “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”, 16-17 травня 2023 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна**

функціональне придушення чутливих елементів датчиків оптико-електронних систем: інфрачервоних головок самонаведення, тепловізійних, телевізійних систем, далекомірів;

силовий тепловий вплив – пропалювання (механічне руйнування) елементів конструкції озброєння та військової техніки (ОВТ), яке призводить до виведення з ладу або знищення об'єктів ураження.

При проведенні оцінки можливості силового ураження озброєння та військової техніки сфокусованим лазерним випромінюванням на відстані до кількох кілометрів встановлено наступне.

1. Існує принципова можливість знищення (виведення з ладу) цілі шляхом руйнування (пропалювання) матеріалу її зовнішньої оболонки лазерним випромінюванням потужністю 10 кВт на відстані 1 км за ясної погоди без опадів.

2. Необхідними умовами для цього є, по-перше, фокусування лазерного променя на цілі і, по-друге, утримання "плями" лазерного випромінювання діаметром біля 1 см на ділянці цілі тих же розмірів протягом доволі тривалого часу – не менше 8 с.

3. Для реалізації цієї принципової можливості зразок лазерної зброї, призначений для цього (так звана лазерна гармата), повинен мати:

власне лазерну систему, яка має відповідну потужність, і в якій забезпечені одномодовий режим роботи і можливість фокусування променя на цілі;

систему наведення і супроводження цілі, здатну на дальності до декількох кілометрів в умовах турбулентної атмосфери забезпечити утримання лазерного променя площею кілька квадратних сантиметрів на приблизно схожій за площею ділянці цілі, що маневрує, протягом декількох секунд.

4. Створення системи наведення і супроводження цілі з такими можливостями, особливо для лазерних гармат, розміщених на рухомих носіях, що зазнають вібрації, є надто складним науково-технічним завданням рівня найкращих світових досягнень на даному етапі розвитку науки і техніки.

5. Вимоги до системи наведення і супроводження цілі будуть не такими жорсткими, якщо збільшити потужність лазерного випромінювання з 10 до 50–100 кВт. При цьому час утримання лазерного променя на цілі зменшиться із "занадто жорстких" 8 с до більш прийнятних значень 1,6 – 0,8 с. Подальше підвищення енергетики силових лазерних систем, особливо при їх розміщенні на наземних рухомих платформах (танки, броньовані машини), поки що неможливе через відсутність автономних джерел живлення настільки великої потужності.

6. Пропалювання лазерним променем окремих невеликих отворів в корпусах літаків, вертольотів, скоріше за все, недостатньо для боротьби з ними. Так само лазерні гармати потужністю до сотень кіловат навряд чи здатні завдати серйозної шкоди броньованій наземній техніці противника. Хоча потрапляння лазерного променя такої інтенсивності на людей гарантовано матиме для них смертельні

**XXII Міжнародна науково-технічна конференція “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”, 16-17 травня 2023 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна**

наслідки, цілком очевидно, що бойове застосування лазерних гармат проти живої сили противника тактично абсолютно невиправдане. Типовими об'єктами ураження лазерних гармат на дальності 0,5–3 км можуть бути повітряні цілі типу снарядів, мін, ракет, БПЛА, тощо, руйнування корпусу яких приводить до їх знищення або падіння.

7. Лазерні гармати, насамперед, можна розглядати як перспективний, поки що нетрадиційний засіб протиповітряної оборони (ППО) тактичної ланки. Враховуючи значну залежність дальності ураження лазерних гармат від стану атмосфери (погодних умов), подібні системи ППО можуть виступати не як альтернатива традиційним вогневим засобам, а, скоріше, як їх ефективне доповнення. Крім того, лазерні системи потужністю кілька десятків кіловат можуть знайти застосування для дистанційного розмінування мінних полів, а також для функціонального ураження оптико-електронних систем противника на великих відстанях – десятки кілометрів.

*Ключові слова:* лазерна зброя, фокусування випромінювання, силове ураження.

УДК 623.4.015.4(1-4)

## НЕСМЕРТЕЛЬНА ЗБРОЯ ПРОВІДНИХ КРАЇН СВІТУ

*Гамалій Н. В., Долгаленко О. В.  
Центральний НДІ ОБТ ЗС України, Київ, Україна  
E-mail: [1974gamalii@ukr.net](mailto:1974gamalii@ukr.net)*

На озброєнні армій, спецслужб і правоохоронних органів країн НАТО перебуває зброя й боєприпаси, які призначені для одночасного світлового та звукового впливу на противника або правопорушників. Прикладом такої комбінованої зброї не смертельної дії є акустично-засліплювальна система Non-Lethal Indirect Fire Munition (IDFM), що опрацьовується та випробовується МО США з 2014 року. Система IDFM створена з метою отримання можливості ведення вогню у відповідь без ризику для життя мирного населення в рамках програми розвитку і застосування нелетального озброєння.

У сучасних умовах ведення бойових дій незаконні бойові угруповання часто застосовують тактику ведення обстрілів з густозаселених територій. Система IDFM веде вогонь у відповідь, використовуючи нелетальні боєприпаси калібром 81 мм. Тим самим система забезпечує:

- ведення нелетального вогню на великі відстані з укриття для придушення противника, що мінімізує власні втрати та поранення;
- перекриття противнику доступу до окремих територій;
- сприяння переміщенню мирного населення в безпечні зони тощо.

**XXII Міжнародна науково-технічна конференція “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”, 16-17 травня 2023 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна**

Розробники системи також розглядають можливість додавання до боєзарядів ультрафіолетового або інфрачервоного фарбників з метою маркування та подальшої ідентифікації осіб, які знаходилися поблизу місця детонації.

Система IDFM розроблена на базі світлозвукової міни M853A1 калібру 81 мм та сумісна з існуючими мінометними та пусковими установками калібру 81 мм. Для мінімізації наслідків від падаючих частин снаряду, що можуть ушкодити цивільних, розроблена парашутна система. Вона включає два парашути: один призначений для хвостової частини, інший – для гільзи снаряду.

Основні характеристики системи IDFM:

ефективна дальність дії – 450–1500 м;

максимальна дальність дії – 4200 м (зафіксована на випробуваннях у 2016 році);

довжина боєприпасу – 64 см;

маса боєзаряду (14 нелетальних картриджів) – близько 680 г.

Кожен заряд є еквівалентом світлозвукової гранати M84, звук – 170–180 дБ, спалах світла на відстані до 1,5 м від епіцентру – більше 1 Мкд.

У США в рамках спільної програми розвитку нелетальної зброї продовжується фінансування досліджень комплексного впливу на людину оптичних випромінювачів і акустичних пристроїв з метою оцінки їхньої ефективності й визначення корисності практичного застосування. Тривають розробки комбінованої світлозвукової системи несмертельної дії – DSLA (Distributed Sound and Light Array), принцип дії якої полягає в поєднанні генерування акустичних сигналів високої частоти та одночасного негативного впливу на зір людини.

До основних режимів функціонування системи відносяться:

режим попередження;

режим світлозвукового впливу на ворогів (порушників).

У рамках функцій попередження DSLA світловими сигналами привертає увагу необхідних об'єктів, у той самий час по звуковому каналу передається інформація (конкретні інструкції) об'єктам. У другому режимі DSLA може серйозно перешкодити вчиненню різних агресивних дій, злочинів, розганяти юрбу, допомагати звільненню заручників тощо.

До складу системи DSLA входять три основні частини:

тепловізійна камера, що забезпечує виявлення цілей вночі та за складних метеорологічних умов;

акустичний підсилювач звуку THOR (Target High-Output Responder)-16S з максимальною вихідною потужністю 150 дБ;

чотири потужних прожектори яскраво-білого світла та два лазерних випромінювачі яскраво-зеленого світла.

**XXII Міжнародна науково-технічна конференція “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”, 16-17 травня 2023 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна**

Іншим видом комбінованої акустично-засліплювальної зброї є системи, які при зіткненні з ціллю або перешкодою впливають на них сильним звуковим ударом та потужним світловим спалахом.

Прикладом зброї, що формує при пострілі плазмову матерію є перспективна система Laser-Induced Plasma Effect (LIPE), яку розробляють вчені США в науковому підрозділі Міністерства оборони США за програмою Joint Non-Lethal Weapons Program (JNLWP). У проекті також беруть участь компанії Physical Optics і GEOST.

LIPE впливає на людей яскравим коротким (всього 1 нс) спалахом світла й дуже голосним звуком, який змушує ворога покинути поле бою. Розробники плазмової зброї LIPE уже добилися рівня потужності звуку плазмових установок у 120 дБ і намагаються перевищити його.

За визначенням основними факторами впливу світлозвукових боєприпасів є голосний звук вибуху і яскравий спалах, які приводять до тимчасової сліпоти й глухоти осіб, що перебувають у безпосередній близькості від епіцентру вибуху, що на якийсь час позбавляє їх можливості чинити ефективний опір. Як світлозвукові боєприпаси найчастіше застосовуються світлозвукові міни, світлозвукові металеві та ручні гранати.

Світлозвукові боєприпаси широко застосовуються військовим спецназом для захоплення противника живим, правоохоронними органами в ході затримки особливо небезпечних злочинців, при звільненні заручників, припиненні групових хуліганських проявів або масових заворушень.

Корпуси мін і гранат звичайно виготовляють або з крихкого пластику, що руйнується на дрібні осколки, які не завдають особливої шкоди, або у вигляді металевого контейнера, що не руйнується при вибуху, з отворами для виходу газів. Деякі гранати додатково споряджені гумовою картечкою, що спричиняє несмертельні травми (забиті місця м'яких тканин, підшкірні гематоми).

За способом застосування світлозвукові боєприпаси поділяють на:

міни (гранати), що приводяться в дію й доставляються до противника (правопорушника) за допомогою мінометів (гранатометів);

ручні гранати, що доставляються до противника (правопорушника) ручним киданням;

стаціонарні світлозвукові пристрої, які установлюють заздалегідь у місці ймовірної появи противника (правопорушника) або на територіях, що охороняються, та приводяться в дію дистанційно.

Світлозвукові гранати призначені для тимчасового придушення психовольової стійкості людей шляхом створення раптового звукового впливу до 172 дБ (звук понад 172 дБ може викликати крововилив, 190 дБ і вище – перфорацію барабаних перетинок) і спалаху яскравістю до 60 Мкд. Вони застосовуються при проведенні спеціальних операцій по захопленню злочинців, при припиненні

**XXII Міжнародна науково-технічна конференція “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”, 16-17 травня 2023 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна**

масових заворушень, у системі охоронної сигналізації тощо. Усі гранати пожежобезпечні й безосколкові. Безпечна відстань при киданні – до 2 м.

Сучасні моделі світлозвукових гранат, наприклад, NICO VTV-1, США, забезпечують тимчасове осліплення при спалаху на 3–5 с, більш низький тиск для зменшення ризику травмування при вибуху, захист рук завдяки металевому корпусу і наявності вентиляційних отворів зверху і знизу гранати.

*Ключові слова:* зброя несмертельної дії, світлозвукової системи несмертельної дії, світлозвукові боєприпаси.

УДК 528.5

**ЗУМ-ТРАНСФОКАТОР ДЛЯ НИТЯНОГО ДАЛЕКОМІРА  
ІЗ ДВОКОМПОНЕНТНОЮ ЗУМ-АФОКАЛЬНОЮ СИСТЕМОЮ  
НА ВАРІОЛІНЗАХ**

*Лазаренко К. С., Чиж І. Г.*

*Національний технічний університет України*

*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна*

*E-mail: [karinalisnak97@gmail.com](mailto:karinalisnak97@gmail.com), [i.g.chizh@gmail.com](mailto:i.g.chizh@gmail.com)*

Вимірювання дистанції до об'єктів нитяними далекомірами здійснюється з урахуванням положення переднього фокусу об'єктиву відносно вертикальної осі приладу, яка вказує його місце положення. При використанні в далекомірі фікс-об'єктиву розташування його переднього фокусу є незмінним, заздалегідь відомим і таким, що враховується у формулі розрахунку дистанції. Якщо ж в далекомірі для збільшення його робочого діапазону замість фікс-об'єктиву використовується зум-трансфокатор, то його передній фокус пересувається відносно вертикальної осі залежно від кутового збільшення зум-афокальної системи. І це потребує обов'язкового врахування вказаного явища, особливо, коли дистанція до об'єктів є відносно невеликою.

В роботі досліджено явище зсуву переднього фокусу зум-трансфокатора, в якому зум-афокальна система є двокомпонентною, галілеєвського типу і побудованою на двох варіолінзах. Знайдено залежності оптичних сил варіолінз від потрібного кутового збільшення зум-афокальної системи за умови, що її осьова довжина є незмінною. Виявлено характерну залежність зміни оптичної сили другого компоненту, яка є лінійною.

Дослідження проводилося з використанням теорії гаусової оптики систем, складених із тонких оптичних компонентів, представлених їх кардинальними параметрами, що адекватно моделюють зум-афокальну систему із варіолінзами.

Знайдено аналітичні вирази для оцінки положення переднього фокусу зум-трансфокатора, що враховують параметри і кутове збільшення зум-афокальної

системи, фокусну відстань фікс-об’єктиву та його осьове розташування відносно заднього компонента зум-афокальної системи. Завдяки ним виявлено суттєвий зсув переднього фокусу, ігнорування якого може істотно вплинути на похибку далекометрії. Так при осьовій довжині зум-афокальної системи у 100 мм зсув переднього фокусу може перевищувати 600 мм.

Головний висновок – врахування виявленого зсуву переднього фокусу зум-трансфокатора сприятиме значному підвищенню точності вимірювань дистанцій нитяними далекомірами, в яких задіяні досліджені зум-афокальні системи.

*Ключові слова:* зум-трансфокатор, зум-афокальна система на варіолінзах, нитяний далекомір.

УДК 621.384.3

## НЕОБХІДНІСТЬ СТВОРЕННЯ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ПОЛЯРИМЕТРИЧНОГО ТЕПЛОВІЗОРА

<sup>1)</sup>Сокол Б. В., <sup>2)</sup>Колобродов В. Г.

<sup>1)</sup>ДП “УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ”, Київ, Україна

<sup>2)</sup>Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: [sokolbohdan@ukr.net](mailto:sokolbohdan@ukr.net), [thermo@ukr.net](mailto:thermo@ukr.net)

Тепловізори використовують інфрачервону технологію для виявлення та вимірювання теплового випромінювання і стали популярними в різних галузях науки, промисловості та медицини. Поляриметричні тепловізори забезпечують кращу якість зображення об’єктів і зменшують шум та завади в зображенні. Вимірювання характеристик тепловізорів є важливим для коректної роботи приладу та отримання достовірних даних. Некоректні вимірювання можуть призвести до помилок в роботі тепловізорів, особливо це стосується тепловізорів військового призначення. Тому важливо мати правильно виміряні характеристики, які забезпечують надійність та ефективність роботи тепловізора в різних умовах.

Основні характеристики тепловізорів, які необхідно контролювати, включають:

1. Діапазон температур, який може вимірювати тепловізор.
2. Дальність зондування – відстань, на якій може бути виявлений об’єкт.
3. Температурне розділення.
4. Точність (відхилення від істинного значення температури).
5. Кут поляризації.

Контроль цих основних характеристик дозволить забезпечити надійність та ефективність роботи тепловізора в різних умовах, а також дозволить використовувати його в різних сферах діяльності з максимальною ефективністю.

**XXII Міжнародна науково-технічна конференція “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”, 16-17 травня 2023 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна**

Одним з методів контролю є калібрування. Калібрування – сукупність операцій, за допомогою яких за заданих умов на першому етапі встановлюється співвідношення між значеннями величини, що забезпечуються еталонами з притаманними їм невизначеностями вимірювань та відповідними показами з пов'язаними з ними невизначеностями вимірювань, а на другому етапі ця інформація використовується для встановлення співвідношення для отримання результату вимірювання з показу [1].

Рекомендується періодично калібрувати тепловізори в лабораторіях, які мають акредитацію згідно з ДСТУ EN ISO/IEC 17025 [2] та використовують калібровані еталонні джерела. Це повинно проводитись згідно з рекомендаціями виробника через певні інтервали часу або частіше, якщо тепловізор знаходиться в небезпечних умовах або використовується інтенсивно.

Під час калібрування виконують наступні операції:

1. Зовнішній огляд.
2. Перевірка працездатності (опробування).
3. Вимірювання характеристик поляриметричного тепловізора.
4. Оцінювання невизначеності вимірювань.

Зовнішній огляд проводять візуально звіренням фактичного стану з вимогами експлуатаційних документів на прилад (далі ЕД). Опробування тепловізора включає перевірку його працездатності згідно з вимогами ЕД, а також перевірку роботи у всіх режимах, передбачених ЕД та паспортом.

Основною відмінністю поляриметричного тепловізора від класичного є наявність поляризаційного фільтру, тому спочатку вимірювання проводяться як для класичного тепловізора.

Одним зі способів калібрування тепловізорів по температурі є порівняння значень приладу з відомими опорними значеннями. Найчастіше для цього використовують еталонні джерела абсолютно чорного тіла (далі АЧТ), які калібровані та мають простежуваність до Міжнародної системи одиниць (SI).

Поляриметричний тепловізор будемо характеризувати температурним розділенням (еквівалентною шуму різницею температур NETD - Noise Equivalent Temperature Difference) [3].

Оцінювання невизначеності вимірювань. Загалом, невизначеність вимірювання складається з різних елементів. Деякі з цих елементів можуть бути розраховані шляхом оцінки невизначеності вимірювання типу А з використанням статистичного розподілу значень вимірюваної величини, отриманих з декількох вимірювань, і можуть бути описані за допомогою стандартного відхилення. Інші елементи можуть бути розраховані шляхом оцінки невизначеності вимірювання типу В.

Стандартну невизначеність за типом А оцінюють для кожного середнього арифметичного значення вимірюваної величини, розраховуючи її за формулою:

$$u_A^T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}{n(n-1)}}, \quad (1)$$

де  $T_i$  – значення показів на випробуваному тепловізорі температури АЧТ в деякий момент часу;  $\bar{T}$  – середнє значення  $T_i$ ;  $n$  – кількість вимірювань.

Стандартну невизначеність за типом В оцінюють для кожного середнього арифметичного значення вимірюваної величини. При оцінюванні невизначеності за типом В враховують наступні складові невизначеності:

- стандартна невизначеність калібрування еталонних АЧТ, зі свідоцтва про калібрування джерела АЧТ;
- невизначеність, обумовлену дискретністю показів тепловізора,  $u_{B\Delta}^T$ ;
- невизначеність, викликану сукупністю факторів впливу систематичного характеру,  $u_{B\Delta}^T$ .

Розширену невизначеність розраховують як добуток сумарної стандартної невизначеності  $u_c$  та коефіцієнту охоплення ( $k = 2$  для довірчої ймовірності  $P = 0,95$ ):

$$U^T = k \cdot u_c^T = k \cdot \sqrt{(u_A^T)^2 + (u_{Be}^T)^2 + (u_{Bd}^T)^2 + (u_{B\Delta}^T)^2}. \quad (2)$$

Аналогічно оцінюються невизначеності вимірювань NETD, які будуть продемонстровані у наступній роботі.

Описаний метод дозволить оцінювати вихідні характеристики поляриметричних тепловізорів, а також зберегти ланцюг метрологічної простежуваності до одиниць SI. Одним з недоліком даної роботи є те, що існує декілька видів поляриметричних тепловізорів, які неможливо об'єднати в один універсальний метод калібрування, а саме калібрування температурного розділення.

*Ключові слова:* поляриметричний тепловізор, температурне розділення, NETD, методи контролю поляриметричного тепловізора, калібрування.

#### **Література**

- [1] Про метрологію та метрологічну діяльність. від 05.06.2014 № 1314-VII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1314-18#Text> (дата звернення 09.04.2023).
- [2] ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT; ISO/IEC 17025:2017, IDT); чинний від 2021-01-01. Технічний комітет стандартизації «Оцінка відповідності» (ТК 89).
- [3] V. G. Kolobrodov, V. I. Mykytenko, G. S. Tymchyk, B. V. Sokol, “Temperature resolution of computer integrated polarization thermal imager”, *Journal of Thermoelectricity*, no. 4, pp. 22–37, 2020.

УДК 621.317.7

## ФАКТОРИ ВПЛИВУ НА ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ЛАЗЕРНОГО ДЖЕРЕЛА ВИПРОМІНЮВАННЯ

*Колобродов В. Г., Сокол В. П.*

*Національний технічний університет України*

*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна*

*E-mail: [thermo@ukr.net](mailto:thermo@ukr.net), [vnalbandova@gmail.com](mailto:vnalbandova@gmail.com)*

Для оцінювання невизначеності вимірювача потужності лазерного випромінювання необхідно оцінити фактори, які впливають на його точність. Для цього необхідно оцінити процес вимірювання потужності лазерного випромінювання та основні фактори впливу на датчик вимірювача потужності лазерного випромінювання.

На загальну точність вимірювання потужності лазерного випромінювання впливають такі фактори:

1. Залежність чутливості датчика від довжини хвилі.

Усі датчики, що використовуються для вимірювання потужності в вимірювачах потужності лазерного випромінювання, є абсорберами, які не мають абсолютно плоску спектральну характеристику, тобто їх коефіцієнт поглинання залежить від довжини хвилі. З цієї причини вимірювальні датчики зазвичай потребують калібрування на більш ніж одній довжині хвилі. Якщо коефіцієнт поглинання змінюється відносно довжини хвилі незначним чином, тоді визначаються окремі області довжин хвилі і калібрування датчиків проводять в цих областях. У цьому випадку невизначеність вимірювання між довжиною хвилі, на яку було відкалібровано прилад, і довжиною хвилі вимірювання вважається в межах первинної похибки калібрування довжини хвилі. Якщо різниця поглинання між найближчою калібрувальною довжиною хвилі та довжиною хвилі вимірювання перевищує 1-2 %, то необхідно або додати до специфікації похибку, обумовлену довжиною хвилі в цій області, або калібрувати за безперервною калібрувальною кривою, що охоплює всі довжини хвиль у цій області.

2. Лінійність датчика вимірювача потужності.

Лінійність вимірювачів потужності лазерного випромінювання завжди вказується в опублікованій специфікації для теплових і піроелектричних датчиків, а очікувана невизначеність через нелінійність повинна бути додана до основної невизначеності калібрування. Для фотодіодних датчиків невизначеність лінійності завжди менша за  $\pm 1$  %, за винятком дуже близької до максимальної потужності. Якщо рівень потужності менше 70 % максимальної потужності (для фотодіодних датчиків), то лінійність датчику буде в межах  $\pm 0,5$  %.

3. Рівномірність зчитування по поверхні.

Однорідність вимірювачів потужності лазерного випромінювання загалом не вказується в специфікаціях, але в більшості випадків вона становить  $\pm 2\%$  максимального відхилення для положення променя в будь-якому місці в межах центральних  $50\%$  площі приймальної площадки. Оскільки калібрування вимірювачів потужності лазерного випромінювання проводиться з центруванням променя на поглиначі, якщо вимірювання проводиться з променем, розміщеним у центрі, і промінь не перевищує  $\frac{1}{4}$  від діаметру апертури, цю невизначеність в більшості випадків можна ігнорувати.

4. Залежність частоти імпульсу (для піроелектричних датчиків).

Піроелектричні датчики мають значну залежність від частоти імпульсу. Загалом, залежність від частоти імпульсу є низькою для частоти імпульсу менше  $70\%$  від максимальної частоти імпульсу. За максимальної частоти імпульсу можна очікувати, що невизначеність буде близькою до максимально заявленої.

5. Невизначеність калібрування блоку відображення.

Загалом невизначеність калібрування дисплея набагато менша за невизначеність калібрування та точність вимірювального датчика ( $\sim 0,3\%$ ), і тому її можна ігнорувати в більшості випадків.

6. Пошкодження поверхні датчика.

Пошкодження поверхні датчика вимірювача потужності лазерного випромінювання може вплинути на результат вимірювання, якщо пошкодження спричинить зміну поглинання. Один із способів перевірити це – трохи відсунути промінь від пошкодженої ділянки та оцінити кількісно зміну показника потужності лазерного випромінювання. Коли в специфікації вказується поріг пошкодження при певному значенні потужності, можуть мати місце косметичні пошкодження, які спричиняють деяку зміну кольору на поверхні, але специфікація виробника загалом визначає поріг пошкодження як ту потужність, яка викликає зміну більш ніж на  $1\%$  при зчитуванні.

7. Електромагнітні завади.

Вимірювачі потужності лазерного випромінювання повинні бути сертифіковані на відповідність вимогам європейських норм щодо електромагнітної сумісності. Майже на всіх частотах потужності випромінювання до межі, встановленої нормами стандарту [1], жодних завад не спостерігається. В окремих випадках на певних частотах можуть виникати помітні завади. Загалом відомо, що максимальні завади вимірювачів потужності лазерного випромінювання, які можуть спостерігатися на будь-якій частоті, становлять менше  $0,3\%$  від повної номінальної потужності.

Таким чином, результатом визначення факторів впливу на точність вимірювання потужності лазерного випромінювання є створення методики калібрування вимірювачів потужності лазерного випромінювання. Методика

**XXII Міжнародна науково-технічна конференція “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”, 16-17 травня 2023 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна**

включає в себе оцінювання складових невизначеності вимірювання потужності лазерного випромінювання та складання бюджету невизначеності.

*Ключові слова:* потужність лазерного випромінювання, невизначеність вимірювання, точність вимірювання.

**Література**

[1] ДСТУ EN 55011:2019 (EN 55011:2009, IDT; CISPR 11:2009, MOD). Обладнання промислове, наукове та медичне радіочастотне. Характеристики електромагнітних завад. Норми та методи вимірювання.

УДК 621:681.7

**ОСНОВИ КАЛІБРУВАННЯ ТЕЛЕВІЗІЙНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ  
АВТОМОБІЛЕМ**

*Стаднічук В. С., Колобродов В. Г.*

*Національний технічний університет України*

*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна*

*E-mail: [v.stadnichuk@kpi.ua](mailto:v.stadnichuk@kpi.ua)*

Багато процесів калібрування були автоматизовані за допомогою комп'ютерів. Автомобільна галузь не виключення. За останні роки автомобільна галузь значно прогресувала. Але залишився ряд проблем, такі як збільшення кута поля зору для більшого охоплення дороги при мінімальному викривленні простору. Адже відомо, що при збільшенні кута поля зору збільшується дисторсія (невідповідність геометричної подоби між об'єктом та його зображенням).

Відомі методи калібрування [1] використовують динамічний метод, коли визначається «vanishing point» - точки на нескінченності, та вже від них перераховуються коефіцієнти виправлення дисторсії. Інший відомий метод калібрування [2] вимагає знаходження прямих ліній або якогось відомого об'єкта під час руху.

Нами запропоновано метод статичного калібрування камери за допомогою статичного шаблону. Він дозволяє одноразово визначити характеристики камери та одноразово її відкалібрувати. Для цього не потрібні значні обчислювальні можливості та значні зусилля на відміну від попередніх методів. В якості шаблону застосовується структура з періодичними елементами. Для цієї задачі добре підходить шахова дошка, оскільки має чітко виражені межі [3]. Приклад показаний на Рис. 1.

Під час процедури калібрування визначаються внутрішні та зовнішні параметри камери, які надалі застосовуються для матриці гомографії. У подальшому для кожного зображення буде застосовуватися матриця гомографії, для перерахування параметрів пікселів.

XXII Міжнародна науково-технічна конференція “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”, 16-17 травня 2023 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

На Рис. 2 показано приклад зображення з дисторсією до калібрування, а на Рис. 3 зображено приклад зображення після калібрування камери.

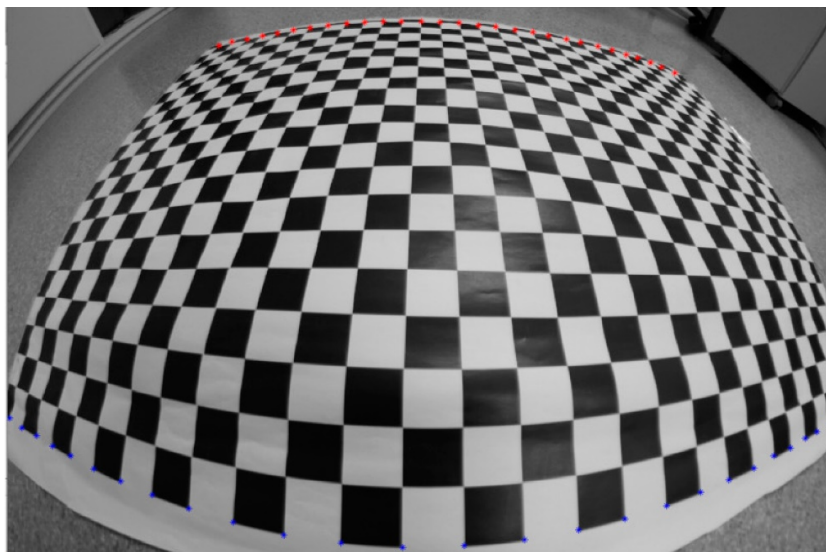


Рис. 1. Приклад шаблону для калібрування камери

Таким чином, запропонований метод калібрування телевізійних систем керування автомобілем дозволяє значно підвищити ефективність таких систем.

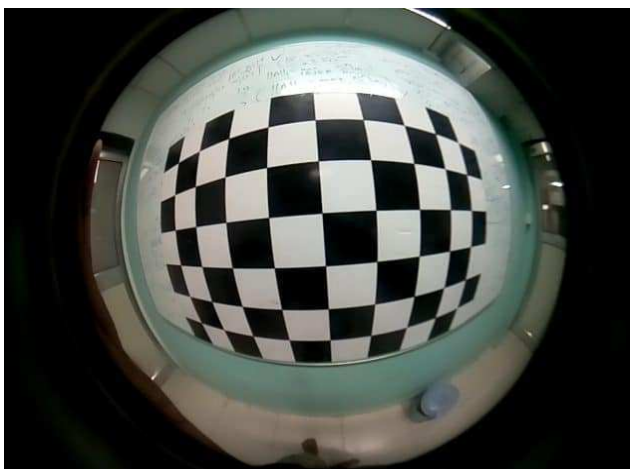


Рис. 2. Приклад зображення із дисторсією до калібрування



Рис. 3. Приклад зображення після калібрування камери

*Ключові слова:* автомобільна система активної безпеки, камера високої роздільної здатності, дисторсія, калібрування.

**Література**

- [1] M. Shell, "Final report of the european eSafety working group on Road Safety." (2002).
- [2] M. Bellino, Y. L. de Meneses, S. Kolski, & J. Jacot, "Calibration of an embedded camera for driver-assistant systems", *Proceedings. 2005 IEEE Intelligent Transportation Systems*, pp. 354-359, 2005.

- [3] M. Bellino, Y. L. de Meneses, P. Ryser, & J. Jacot, “Lane detection algorithm for an onboard camera”, *Proc. SPIE* 5663, *Photonics in the Automobile*, (16 February 2005). DOI: 10.1117/12.596866

UDC 004.31

## PHOTON INTEGRATED CIRCUITS FOR MATRIX TO VECTOR MULTIPLICATION

*Avdieionok I. I., Borovytsky V. M.*

*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»  
Kyiv, Ukraine*

*E-mail: [avdeionok.ira@gmail.com](mailto:avdeionok.ira@gmail.com), [vborovytsky@yahoo.com](mailto:vborovytsky@yahoo.com)*

### **Introduction**

Matrix-vector multiplication (MVM) is a key operation in artificial neural networks, integral transform and signal filtration [1-3]. The most interesting MVM realization is one layer or multi-layer photonic integrated circuits (PIC) that combine high productivity of MVM calculations with small dimensions and relatively small power consumption. It makes optical MVM PIC one of perspective alternatives to multi core processors. Unfortunately, absence of classification of such PIC. The goal of this work is to propose classification that covers all principal groups of MVM PIC.

### **Multilayer photonic integrated circuits for MVM**

We suggest dividing all MVM PICs into two groups. The first group contains PICs, in which the active elements, which play the main role in the MVM, are placed between the layers of the input and output optical waveguides. The second combines PIS, in which active elements are placed in the plane of optical waveguides. A typical PIC of the first group is the Enlight256 optical processor [4].

This PIC has 256 laser sources modulated by electrical inputs, a matrix of 256×256 liquid crystal spatial light modulators that define matrix coefficients, and 256 microlens photodetectors and readout circuitry to generate electrical output signals. In this PIC, the role of active elements is played by liquid crystal cells, which change their transmission coefficients according to the coefficients of the matrix. This was the first mass-produced MVM PIC, but it was not widely used. The advantage of Enlight256 is that it is a very fast MVM built in fully parallel mode. The disadvantage is the high cost, high complexity and limited accuracy of analog MVM. The matrix of liquid crystal spatial light modulators is the most expensive part of this IC, which reduces the widespread adoption of Enlight256 [5]. Another well-known design of an optical MVM is based on a matrix of laser diodes with resonators, matrices of photodetectors integrated with an ADC, matrices of specialized masks of diffraction structures and a digital control device [6]. The input signal is formed by the control laser diodes, which form the main matrix and vector. The result is read from photo receivers. As a result of the intervention, the

result of calculations of digit partial sums, results of transfers and multiplication is formed. Due to the digital representation of values at the input of the system, an increase in processing time and some complication of post-processing of the result, the accuracy of calculations can be increased, the combination with digital electronic devices can be simplified, and it also makes it possible to process variable numbers. The result is read from the radiation intensity indicator. In this MVM, the role of active elements is played by the masks of diffraction structures, which divide the input optical systems into a matrix of photodetectors by matrix coefficients.

### **Planar photonic integrated circuits for MVM**

In this group, MVM PICs have active elements placed in the plane of the optical waveguides. Typical PICs of this group are matrices of microring resonators (MCR) [7] [8]. They use the wavelength multiplexing (WDM) method for MVM - WDM-MVM. The input optical signals are fed to the MRR front module, which works as a narrow spectral filter, and acts as an active element of the MVM. This module forms one optical signal in one optical waveguide, collects optical signals with different wavelengths and amplitudes corresponding to one of the input signals. In other words, the device performs modulation and multiplexing of the input optical signal. Then one multiplexed signal is divided, and it enters the next block - the core of the MRR matrix. For given wavelengths, these MMRs can change the transmission of optical signals according to the corresponding matrix coefficients. This block forms a set of output optical signals, each output signal has a certain wavelength, and its amplitude is proportional to the multiplication of the amplitudes of the input signal (vector) by the matrix row coefficients determined by the transmission coefficient for the MRR. The spectral transmittance can be changed by changing the optical path length in the MMR, for example by changing the refractive index or temperature. PICs with MRR have a very interesting topology and are considered one of the best solutions for optical MVM [9] - [12].

A planar MVM PIC with a light modulator matrix is described in the patent [11]. Each light modulator changes the transmission coefficient according to the coefficients of the matrix. It is suggested to use electro-optical, acousto-optical or thermo-optical modulators. This PIC has a simple and economical planar design. It performs analog MVM, which reduces the accuracy of MVM.

An alternative approach is to use the Mach-Zehnder interferometer (MZI) method for MVM (MZI-MVM) [12]-[16]. These PICs have a two-dimensional periodic structure with miniature MZIs at the nodes. Each MZI has two interference arms in the form of optical waveguides, but in one arm there is a phase-shifting device. In most cases, this device is an optically active element that changes its refractive index depending on the applied voltage. Thus, the MZI becomes an active element of the MVM. As a result, this block introduces a certain phase shift in one arm of the obstacle, and also changes the transparency coefficient of the miniature MZI. MZI matrices allow to implement analog or digital multiplication [12]. In some PICs, diffractive optical elements can be used in

combination with MZIs to perform the sequential MVMs required to implement multilayer neural networks.

### **Conclusions**

1. It is proposed the classification of MVM PICs on two groups. The first group contains PICs, in which the active elements, which play the main role in the MVM, are placed between the layers of the input and output optical waveguides. The second group includes IPs that have active elements placed in the plane of light guides.

2. The biggest number of PIC performs analog MVM. In this case, the MVM results are sensitive to the dispersion of optical properties of active elements such as liquid crystal cells, photochromic cells, MMR, etc. But the fast MVM, compact and economical design, and in some cases low power consumption open wide prospects for the application of MVM PIC in sensors, robotics, drone controls, and smart devices.

3. The authors believe that multilayer MVM PICs with matrices of modern electrochromic films are the most promising. The advantage of such a PIC is a fast MVM and a low price due to a simple and economical manufacturing process. The disadvantage is the small accuracy of analog MVM results, but it can be sufficient for many applications in the hardware implementation of artificial neural networks and digital image processing units.

*Keywords:* photon integrated circuits, matrix to vector multiplication, MVM PICs

### **References**

- [1] H. Pituach, G. Naplada, "EnLight256 8000 Giga MAC/sec fixed point DSP," *Product information, Lenslet Ltd*, 2003.
- [2] J. Barhen et al., "High performance FFT on multicore processors", in *Proceedings of the Fifth International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2010*, pp. 1-6. DOI: 10.4108/ICST.CROWNCOM2010.9283.
- [3] Г. Л. Лисенко, С. С. Тужанський, М. М. А. Альравашді, "Оптоелектронний суматор помножувач для реалізації алгоритму DMAС", *Опт-ел. інф-енерг. техн.*, Вип. 2(32), с. 43–56, 2017.
- [4] V. A. Pilipovich, A. K. Esman, I. A. Goncharenko and V. K. Kuleshov, "An optical matrix multiplier", DOI: 10.1364/JOT.73.000834.
- [5] A. N. Tait, T. F. de Lima, M. A. Nahmias, B. J. Shastri and P. R. Prucnal, "Reconfigurable analog photonic networks", in *2017 IEEE Photonics Conference (IPC)*, pp. 267-268, 2017.
- [6] T. F. d. Lima, B. J. Shastri, A. N. Tait and M. A. Nahmias, "Progress in neuromorphic photonics" *Nanophotonics*, vol. 1, no. 39, 2016. DOI: 10.1515/nanoph-2016-0139.
- [7] H. Seyringer, Heinz, S. Höchst, J. Lindau, "Optischer Matrix-Vektor Multiplizierer", *Patent DE 10 2004 014 658 A1* 2005.10.13.
- [8] V. Bangari, B. A. Marquez, H. Miller, A. N. Tait, and et. Digital Electronics and Analog Photonics for Convolutional Neural Networks (DEAP-CNNs), DOI: 10.1109/JSTQE.2019.2945540, 2019 October.
- [9] J. J. Carolan, M. Prabhu, S. A. Skirlo, Y. Shen, and et., "Apparatus and methods for optical neural network", *Patent US 11,334,107 B2*, 2022.
- [10] Y. Shen, L. Jing, R. Dangovski, P. Xie, and et., "Optoelectronic computing system", *Patent US 2020/0250534 A1*, 2020.

- [11] H. Zhou, J. Dong, J. Cheng, W. Dong, and et. "Photonic matrix multiplication lights up photonic accelerator and beyond", *Light: Science & Applications*, 2022. DOI: 10.1038/s41377-022-00717-8.
- [12] H. H. Zhu, J. Zou, H. Zhang, Y. Z. Shi and et., "Space-efficient optical computing with an integrated chip diffractive neural network", *Nature Communications*, 13:1044, 2022, p.1-9. DOI: 10.1038/s41467-02228702-0

UDC 004.383.3

## APPLICATION OF PROGRAMMABLE AMPLIFIER IN FACET VISION SYSTEMS

*Antonenko Vytalii, Borovytsky Volodymyr*  
*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*  
*Kyiv, Ukraine*

Email: [taikatalvi13@gmail.com](mailto:taikatalvi13@gmail.com), [vborovytsky@yahoo.com](mailto:vborovytsky@yahoo.com)

Inspired by the natural vision systems of insects and crustaceans, compound eye systems comprise multiple optical units known as ommatidia [1, 2]. Each ommatidium is responsible for capturing a portion of the visual field, providing a wide field of view and high sensitivity to motion. Artificial facet elements, the individual components of these systems, seek to replicate the performance of their biological counterparts while leveraging modern technology's flexibility and advantages. In such system all facet elements work in parallel and independently of each other and that make fast measurement of the angular velocity of objects in its field of view by calculating discrete correlation functions of the photoreceptor signals. In our solution each facet element consists of optic lens, an array of photodiodes, programming amplifier (MCP6S26) and ARM-based microcontroller that makes calculation of optical flow maps [3, 4].

The MCP6S26 is a programmable gain amplifier (PGA) developed by Microchip Technology, designed to amplify and condition weak input signals. It has some features that make it a good solution to create a working prototype of artificial facet element:

1. Programmable gain control: The MCP6S26 provides a programmable gain range from 1 to 32, enabling dynamic adjustment of the amplification factor based on lighting conditions and application requirements.

2. Low noise and low signal distortion: The amplifier has low noise and distortion characteristics, ensuring high quality signal amplification and high signal-to-noise (SNR) ratio.

3. Multiple input channels: The MCP6S26 supports up to six input channels, allowing the integration of multiple photodiodes in a single artificial facet element.

To connect the programmable amplifier to the microcontroller we use an SPI interface that provides a fast-settling time of the input signal from multiple photodetectors and its amplification factor. In our prototype of artificial facet element, we use next connection scheme.

The proposed architecture can be considered as a big set of equal channels - the “smart groups” of several pixels with read-out electronics and a digital microcontroller that can extract only the useful data and send it out. The working prototype of this facet element has demonstrated ability to measure distribution of speed and direction of optical flow thought its field of view in the very short time [5, 6, 7].

*Keywords:* facet vision system, programmable amplifier, signal processing, microcontroller.

#### References

- [1] M. F. Land, “The optical structures of animal eyes,” *Current Biology*, т. 15, pp. 319-323, DOI: 10.1016/j.cub.2005.04.041, 2005.
- [2] M. A. Arbib, *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*, Second Edition, London, England: The MIT press, 2003.
- [3] V. Borovytsky та V. Antonenko, “Image sensor with parallel signal processing for motion detection,” *Proc. of SPIE*, т. 11351, 2020.
- [4] В. Боровицький та В. Антоненко, «Датчик швидкості для безпілотного літального апарату», Патент u 2019 07417 Україна, 03 07 2019.
- [5] V. Borovytsky та V. Antonenko, “Biologically inspired compound eye,” *Proc. of SPIE*, т. 11369, 2019.
- [6] V. Borovytsky та V. Antonenko, “Speed measurement sensor for an unmanned aerial vehicle”. Патент u2019 07417, Ukraine, 2019.
- [7] В. Антоненко, Система технічного зору: мд: 152 Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка, Київ, 2018, р. 92.

UDC 681.5.01

## SIGNAL GENERATION AND READOUT IN MULTI BEAM DRONE POSITIONING SYSTEM

*Averin Dmytro, Borovytsky Volodymyr*  
*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*  
*Kyiv, Ukraine*  
*Email: [averindmytro@gmail.com](mailto:averindmytro@gmail.com), [vborovytsky@yahoo.com](mailto:vborovytsky@yahoo.com)*

The proposed multi beam drone position system does not use digital cameras during take-off, landing and goods delivery. The main idea is the application of the spatial structure of infra-red (IR) beams. These beams transmit coded data about the direction to the landing site in three-dimensional (3D) space.

This system contains parts: the first one is the illumination part. It is installed around a landing zone on the ground. The second part is the receiving part that is fixed on the drone [1-5]. The illumination part includes a power source, a control unit and two or more beam formation units (BFU), which illuminate low-energy IR beams. Each beam transmits digital codes that set the direction to the landing site in 3D space.

When forming a package of rays, it is necessary to calculate the length of the

package, the width of one component of the signal, and the frequency of the signal. The length of the package is chosen by us, and the width and frequency of the signals must be coordinated with the frequency of the radiation receiver ( $F_{res}=F_{em}$ ). This frequency is written in the documentation of the selected radiation receiver. The generation of a certain frequency can be done with the help of generation devices, hardware method or programming. In the case of [1-5], generation by software method using a microcontroller was used. The generation took place by turning on and off the LEDs with a certain time interval. Time is calculated as follows:

$$t_s = \frac{1}{F_{em}}.$$

Next, we need to set the width of one signal. To do this, using the documentation for the radiation receiver, you need to find out the time that the photoreceiver can receive the signal. Next, you need to calculate the number of pulses of a certain frequency:

$$N_{min} = \frac{T_{min}}{t_s} \quad N_{max} = \frac{T_{max}}{t_s}.$$

where  $T_{min}$ ,  $T_{max}$  – minimum and maximum time that the photoreceiver can receive the signal, respectively.

Having the parameters of a unit signal, it can be used to create a beam bundle.

The receiving unit receives these signals. The signal enters the radiation receiver, converts it into an electrical signal, which is fed to the microcontroller. In [1-5] signal processing is implemented using an interrupt. When a signal appears, the microcontroller switches to interrupt mode and executes the program recorded for this mode. When the next signal appears in the microcontroller, the interrupt flag acquires the value "1", the program checks this value after certain time intervals. If the value is "1", we write that there is a signal, if the value is "0", then there is no signal. Next, reset the interrupt flag to "0" and wait for the next signal. We do this until the whole package arrives. Further, this information is processed, and a conclusion is drawn regarding the position of the drone in space relative to the landing zone. The algorithm for calculating local coordinates is described in [6]

*Keywords:* LED, measurements, radiation sources, positioning system, landing system

#### References

- [1] D. Averin, V. Borovytsky and V. Mykytenko, “Drone positioning systems that uses digital cameras,” *Bulletin of Kyiv Polytechnic Institute Series Instrument Making*, July 2022. DOI: 10.20535/1970.63(1).2022.260632.
- [2] D. Averin, V. Borovytsky and S. Tuzhanskyi, “Local positioning system for drones without usage of digital cameras,” *Optoelectronic Information-Power Technologies*, vol. 42, no. 2, pp. 5-11, October 2022. DOI: 10.31649/1681-7893-2021-42-2-5-11
- [3] V. Borovytsky and D. Averin, “Optical-Electronic positioning system”. *Ukraine Patent* 141943, 2020.
- [4] V. Borovytsky and D. Averin, “Optical sensor for drone coordinate measurements,” *Proc. SPIE*, vol. 11352, 2020.

**XXII Міжнародна науково-технічна конференція “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”, 16-17 травня 2023 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна**

- [5] Averin, D., & Borovytskyi, V. “Multi-beam optical sensor for measuring drone coordinates”, *Bulletin of Cherkasy State Technological University*, (1), 5–12, 2023. DOI: 10.24025/2306-4412.1.2023.267070
- [6] Averin, D., & Borovytskyi, V., “Coordinate measurement in multi-beam drone positioning system”, *Scientific journal of TNTU*, 2023.

UDC 681.72:620.3

## MOTORIZED FOCUS DRIVERS FOR DIGITAL MICROSCOPES

*Hudz Oleksiy, Borovytsky Volodymyr*  
*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*  
*Kyiv, Ukraine*

*Email: [alexevgood@gmail.com](mailto:alexevgood@gmail.com), [vborovytsky@yahoo.com](mailto:vborovytsky@yahoo.com)*

Digital microscopes have become increasingly popular in various fields, such as biological research, medical diagnostics, and materials science, due to their ability to capture high-resolution images of microscopic structures [1-5]. One of the most critical components of a motorized digital microscope is a focus driver, which allows for precise control of the distance between the objective lens and the specimen. Motorized focus can also be combined with other automation features, such as autofocus units, motorized stages for specimen, motorized illumination units with optical filters and, etc. There are several types of motorized focus drivers that are commonly used in digital microscopes: servo, step, and piezo motor drivers [1-3].

Servo motor drivers use direct current motors, linear or rotation encoders and feedback loop to continuously adjust the position of the objective lens until it reaches the desired focus point. They are ideal for applications that require fast and precise focusing. Advantages of servo motor drivers are high speed, smooth movements, and good accuracy. The disadvantages are high price and complexity.

Step motor drivers can be programmed to move with definite increments. Their advantages are sufficient precision and repeatability, simple control, and compatibility with digital electronics. The disadvantages are noise and vibration.

Piezo motor drivers are incredibly precise, very stable and can fix the current position without power supply. On the other side, they are slow and very expensive.

The important parameters such as the range and speed of focusing, and the positioning accuracy and repeatability have to be considered for selection of focus driver.

**Keywords:** digital microscopy, focus driver, motorized focus, piezo-based focus.

### References

- [1] W. B. Amos, “Focus Drives for Microscopy”, *Microscopy Today*, 27(3), 36-41, 2019.
- [2] F. Huang, & Z. Chen, “Automated Focusing Techniques in Biological Microscopy”, *Journal of Microscopy*, 275(1), 1-13, 2019.

- [3] J. Roszkowiak, & T. Kozacki, “Performance Evaluation of Motorized Focusing System for 3D Microscopy”, *Optics and Lasers in Engineering*, 106, 82-88, 2018.
- [4] A. Schnell, & H. Witte, “Automated Microscope Control with Micro-Manager”, *Methods in Molecular Biology*, 2130, 343-356, 2020.
- [5] M. Weigert, U. Schmidt, & T. Boothe, “Focus on Microscopy: Automated Microscope System for High-Throughput Imaging”, *PLoS Biology*, 16(1), e2006193, 2018.

UDC 621.382

## POLARIZATION CONTRASTS DETECTION WITH TELEVISION-TYPE SYSTEMS

*Mykytenko V. I.*

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"  
Kyiv, Ukraine*

*Email: [v.mykytenko@kpi.ua](mailto:v.mykytenko@kpi.ua)*

Until recently, the use of polarimetric methods in remote sensing was limited mainly to meteorological problems. Now such methods of analysis are increasingly being introduced into the solution of security and military tasks. In such tasks, one of the most important factors in the effectiveness of surveillance systems is the ability to work in real time. That is, the methods of information processing must be compatible on the time scale with the receipt of a television image by the operator [1].

Complete analysis of the type and degree of radiation polarization is carried out using polarimeters. These methods are based on the use of a sequential combination of phase plates and polarizers (Fig.) [2]

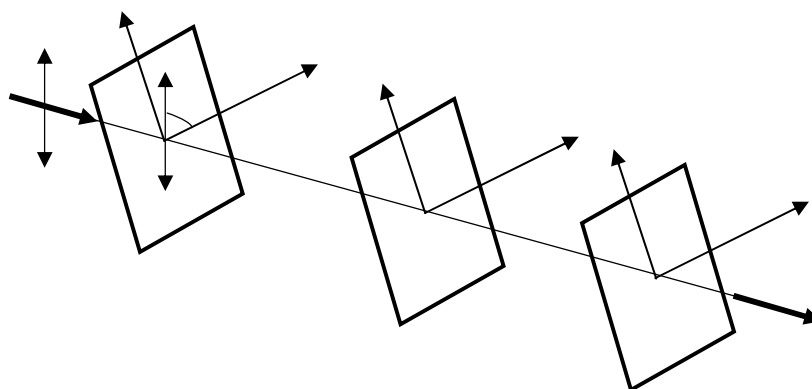


Fig. An optical setup for polarization analysis: 1, 3 - quarter wave plate, 2 – linear polarizer

Rotation through certain angles of these elements makes it possible to estimate the state of polarization at the output of the elements over the entire Poincaré sphere by determining the corresponding coefficients. Mechanical rotation and calculation of

coefficients noticeably slow down the determination of polarization contrasts. There are methods for determining the coefficients without the use of rotating optical elements, for example, based on Bragg modulators [3]. However, they are difficult to implement in a television camera.

In a number of practical applications, there is no need to fully analyze the state of the radiation polarization of the object's scene. This can be the detection of an object with plane polarized radiation against an anisotropic background or the detection of an object with anisotropically polarized radiation against a background with plane polarized radiation. The first case is typical when observing artificial objects against natural backgrounds, the second - when observing air objects against the sky. In this case, to obtain a polarization contrast, it is sufficient to use one rotating polarizer operating according to the method of crossed polarizers. The essence of the method lies in the use of the Malus law, in which the rotation of the analyzer axes relative to the polarizer leads to a change in the intensity of light passing through the elements according to the formula [4]

$$I' = I \cdot \cos^2 \varphi ,$$

where  $\varphi$  is the angle between the polarizer and analyzer axes. In remote observation, the direction of the polarizer axis is replaced by the direction of the predominant polarization of the radiation of an object or background.

This method was used, for example, in a number of space video polarimeters [5]. However, its use is associated with overcoming a number of difficulties. First, the accuracy of the method is not high. It is limited by the extinction coefficients of the polarizers and low sensitivity to changes in the angle of radiation polarization near the values of  $0^\circ$  and  $90^\circ$ , which correspond to the coaxial and orthogonal orientation of the polarizer axes. Secondly, there is mechanically rotating optical element in the optical scheme. Accordingly, the reliability of the design decreases when it is used in the field.

The report considers a technical solution for a television-type video polarimetric transmitting camera, in which a magneto-optical rotator based on the Faraday effect is installed at the input. The issues of increasing the contrast of the polarimetric contrast in the visible and infrared spectral ranges are considered.

*Keywords:* electro-optical surveillance system, object recognition, polarization evaluation.

#### **References**

- [1] V. I. Mykytenko and V. M. Senatorov, “Determination of target acquisition and recognition time with engagement of land unmanned complex”, in *XXI Міжнар. наук.-техн. конф. Приладобудування: стан і перспективи*, Київ, 2022, с. 43 – 44.
- [2] A. Kumar, A. Ghatak, “Polarization of light with applications in optical fibers”, *Proc. of SPIE*. 2011.
- [3] P. S. Westbrook, T. A. Strasser, T. Erdogan “In-Line Polarimeter Using Blazed Fiber Gratings”, *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, vol. 12, no. 10, pp. 1352-1354, 2000.
- [4] Malus's Law [Online]. Available: <http://www.physicshandbook.com/laws/maluslaw.htm>
- [5] A. Н. Шутов, “Видеополариметры”. *Оптический журнал*, № 5, с. 3-10, 1993.

УДК 004.94 621.32 628.9

## КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ВИПРОМІНЮВАННЯ

*Кравченко І. В.*

*Національний технічний університет України*

*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна*

*E-mail: [kravchenko.igor@lll.kpi.ua](mailto:kravchenko.igor@lll.kpi.ua)*

В якості робочих еталонів для експериментального оцінювання та теоретичних розрахунків параметрів фотоприймачів та оптико-електронних систем використовуються світловимірювальні лампи розжарювання. Для деяких типів ламп виробники вказують спектральну щільність енергетичної світності для деякої кількості стандартизованих довжин хвиль: FEL, NPL/GES тощо, для інших вказують робочу кольорову температуру: NBS87, NBS1133, СИС, СИП тощо.

З урахуванням спектральних властивостей колб з кварцового скла світловимірювальних ламп вони можуть застосовуватися для ультрафіолетового, видимого та інфрачервоних діапазонів NIR (IR-A), SWIR (IR-B), тобто для довжин хвиль від 0.2 мкм до 2.6 мкм.

Випромінювальні властивості тіла розжарювання обумовлюються матеріалом тіла: вольфрамом, та його формою.

Найбільш придатними для застосування в комп'ютерних моделях джерел випромінювання вважалися табличні дані «рекомендованих значень випромінювальної здатності вольфраму» групи акад. А. Є. Шейндліна. Використання цього джерела сьогодні в Україні не рекомендується. Найбільш застосовуваними в науково-технічних міжнародних джерелах є експериментальні дані спектральної щільності нормального коефіцієнту випромінювання вольфраму Де Воса (J. C. De Vos). Ці дані наведені у вигляді графіків для температур від 1600 К до 2800 К з кроком 200 К в діапазоні (0.22 - 2.7) мкм. Саме ці дані використані в розрахункових моделях Національного інституту стандартів і технологій США та Національної фізичної лабораторії Фінляндії.

Промисловістю виробляються лампи з кольоровою температурою 2856 К, 2950 К тощо. Актуальним є питання отримання табличних значень спектральної щільності коефіцієнта випромінювання вольфраму для діапазону температур до 3000К.

Для розширення табличних даних використано метод лінійного прогнозування з розрахунком коефіцієнтів кореляції, методи Берга для кожної довжини хвилі з діапазону (0.23 – 2.7) мкм:

$$\varepsilon_k = \sum_{i=0}^{k-1} a_i \varepsilon_i.$$

**XXII Міжнародна науково-технічна конференція “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”, 16-17 травня 2023 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна**

де  $a_i$  – коефіцієнти кореляції даних;  $\epsilon_i$  – відомі табличні значення у вузлах рівномірної сітки.

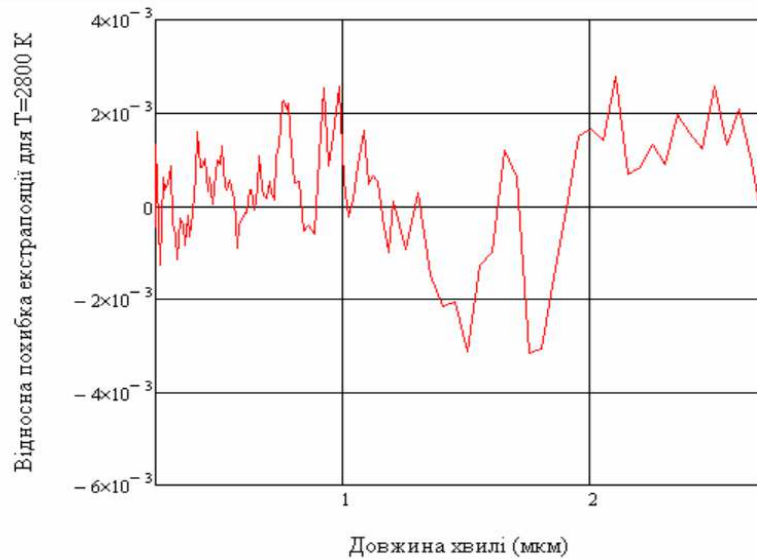


Рис. 1. Відносна похибка екстраполяції спектрального коефіцієнта випромінювання вольфраму за даними Де Воса для T=2800 K

Проведений аналіз виявив, що для даних Де Воса найбільш доцільним є застосування екстраполяції за трьома точками. Результати моделювання для значень з температурою 2800 K наведені в таблиці 1 та на рис. 1.

Таблиця 1.

	SSE *10 <sup>-5</sup>	$\Delta_{\max}$ *10 <sup>-3</sup>	$\delta_{\max}$ *10 <sup>-3</sup>	СКВ *10 <sup>-5</sup>
2 точки	2.83	1.48	3.44	4.92
3 точки	2.20	1.00	3.16	4.34
4 точки	3.17	1.32	5.82	5.21
5 точок	3.72	1.43	5.80	5.65

В результаті комп'ютерного моделювання отримані табличні значення з чотирма вірними знаками нормального коефіцієнту випромінювання вольфраму в діапазонах (0.23 – 0.8 ) мкм з кроком 0.1 мкм, (0.8 – 1.2) мкм з кроком 0.2 мкм, (1.2 – 2.7) мкм з кроком 0.5 мкм для діапазону температур від 1600 K до 3200 K з кроком 200 K.

*Ключові слова:* лампа розжарювання, коефіцієнт випромінювання вольфраму, комп'ютерна модель.

UDC 681.7.067.23

## SWIR CATADIOPTIC LENSES FOR CUBESAT SATELLITE

<sup>1)</sup>Sokurenko V. M. and <sup>2)</sup>Sokurenko O. M.

<sup>1)</sup>National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

<sup>2)</sup>Optical and mechanical college of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

E-mail: [sokurenko2@meta.ua](mailto:sokurenko2@meta.ua)

CubeSat satellites are widely used to conduct science experiments, test different instruments, provide commercial applications, and support educational projects. To enable research in geology and agriculture, CubeSat optics should operate in different spectral ranges, including short-wave infrared (SWIR) wavelengths. For this purpose, the catadioptric systems are more perspective than pure lens systems, because they can deliver high image quality and have long focal lengths enabling high spatial resolution.

In this research, a set of SWIR catadioptric systems was developed with the optical design software PODIL. The optical design task was carried out practically in the automatic mode by applying a modified modern evolution algorithm.

As a numerical example, an optical schematic diagram of the 350-mm F/4 SWIR lens designed for a nanosatellite is shown in Fig.1. It is intended to operate within the spectral range of 0.4 to 1.8 micrometers.

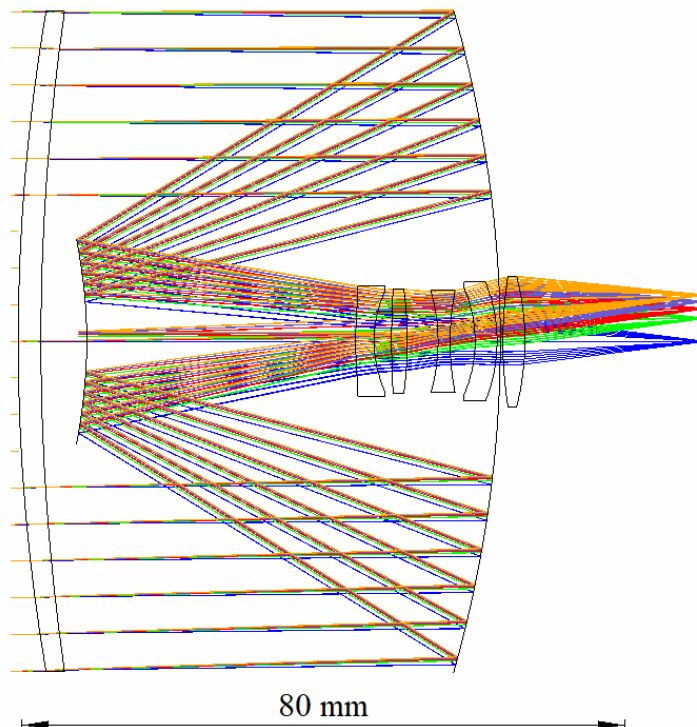


Fig. 1. Schematic optical diagram of the developed 350-mm F/4 SWIR catadioptric lens having angular field of view of 2 degrees

The considered catadioptric lens contains a front meniscus lens, two second-order aspheric mirrors, and a five-lens aberration corrector.

The optical system has an effective focal length of 350 mm and an entrance pupil diameter of 87,5 mm. The angular field of view is 2°, and the image circle diameter is 12.2 mm. The total track (i.e., the axial distance from the external lens surface to the image plane) does not exceed 93 mm.

The polychromatic RMS spot radius is 1 μm on the optical axis and 2 μm at the image periphery.

Fig. 2 illustrates the polychromatic diffraction MTF charts evaluated for different field points. The maximum relative distortion is 1 %.

The report presents the design results for a set of SWIR catadioptric lenses with different focal lengths. It may be interesting for nanosatellite developers and optical designers.

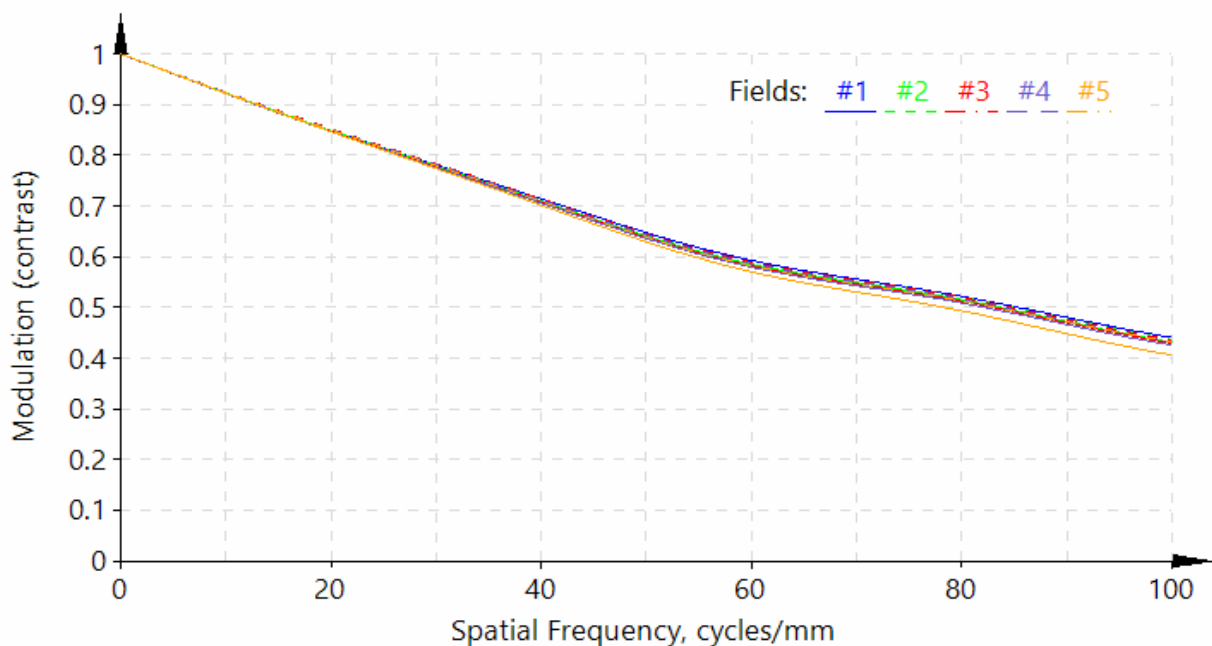


Fig. 2. Polychromatic diffraction MTFs of the developed 320-mm F/4 SWIR catadioptric lens: field numbers #1 to #5 correspond to field angles 0°, 0.5°, 0.71°, 0.86°, and 1°, respectively

**Keywords:** SWIR, CubeSat, nanosatellite, catadioptric lens, mirror, second-order aspheric, MTF.