

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Одеський національний університет імені
І. І. Мечникова

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE
OF UKRAINE
Odesa I. I. Mechnykov National University

**СЕНСОРНА
ЕЛЕКТРОНІКА
І МІКРОСИСТЕМНІ
ТЕХНОЛОГІЇ
2021 — Т. 18, № 1**

**SENSOR
ELECTRONICS
AND MICROSYSTEM
TECHNOLOGIES
2021 — VOL. 18, No. 1**

Науково-технічний журнал

Scientific and Technical Journal

Заснований 13.11.2003 року
Виходить 4 рази на рік

It is based 13.11.2003 року
The Journal issue four times a year

УДК 681.586

UDC 681.586

Засновник Одеський національний
університет імені І. І. Мечникова

Founded by Odesa I. I. Mechnykov
National University

За підтримки Українського фізичного
товариства

At support of the Ukrainian Physical
Society

Свідоцтво про державну реєстрацію
КВ № 8131

Certificate of State Registration KB № 8131

Журнал входить до переліку фахових видань
ВАК України з фізико-математичних,
технічних та біологічних наук

The Journal is a part of list of the issues
recommended by SAK of Ukraine on physical
and mathematical, engineering and biological
sciences

Журнал реферується РЖ «Джерело»
і ВІНІТІ (Росія), включено в міжнародні бази
Index Copernicus, РІНЦ, наукова електронна
бібліотека Cross Ref. Elibrary, Directory of
Research Journal Indexing, General Impact
Factor EBSCO

The Journal is reviewed by RJ “Djereło”
and RJ ICSTI (Russia), is included in the
International Base Index Copernicus, RSCI,
Cross Ref. Elibrary, Directory of Research
Journal Indexing, General Impact Factor
EBSCO

Видається за рішенням Вченої ради
Одеського національного університету
імені І. І. Мечникова
Протокол № 9 від 22.03.2021 р.

Publishes on the resolution of Odesa
I. I. Mechnykov National University
Scientific Council
Transaction No. 9, 22.03.2021

Адреса редакції:
вул. Дворянська, 2, МННФТЦ (НДЛІ-3),
Одеський національний університет
імені І. І. Мечникова, Одеса, 65082, Україна.
Тел./Факс: +38(048)723-34-61

Editorial address:
2, Dvoryanskaya Str., ISEPTC (RL-3),
Odesa I. I. Mechnykov National University,
Odesa, 65082, Ukraine.
Ph./Fax: +38(048)723-34-61

Редакційна колегія

Головний редактор – **В. А. Сминтина**
Заступник головного редактора – **Я. І. Лепіх**
А. П. Балабан (Одеса, Україна) –
відповідальний секретар

О. Є. Беляєв (Київ, Україна)
І. В. Блонський (Київ, Україна)
В. Г. Вербицький (Київ, Україна)
Б. М. Галкін (Одеса, Україна)
Ю. В. Гуляєв (Москва, Росія)
Ю. О. Гунченко (Одеса, Україна)
А. Д'Аміко (Рим, Італія)
Н. Джаффрезік Рене (Ліон, Франція)
С. В. Дзядевич (Київ, Україна)
Г. В. Єльська (Київ, Україна)
В. О. Іваниця (Одеса, Україна)
О. М. Калашніков (Ноттінгем, Велика Британія)
О. В. Коваленко (Дніпро, Україна)
І. А. Кравченко (Одеса, Україна)
В. Г. Литовченко (Київ, Україна)
С. В. Ленков (Київ, Україна)
Є. В. Малахов (Одеса, Україна)
А. Медвідь (Ріга, Латвія)
А. С. Опанасюк (Суми, Україна)
С. М. Рябченко (Київ, Україна)
В. А. Скришевський (Київ, Україна)
О. П. Солдаткін (Київ, Україна)
М. Ф. Стародуб (Київ, Україна)
Й. М. Стахіра (Львів, Україна)
М. В. Стріха (Київ, Україна)
М. В. Ткач (Чернівці, Україна)
А. Чаудхрі (Чандігар, Індія)
Є. М. Шерегій (Жешув, Польща)

Editorial Board

Editor-in-Chief – **V. A. Smyntyna**
Vice Editor-in-Chief – **Ya. I. Lepikh**
A. P. Balaban (Odesa, Ukraine) –
responsible editor

A. E. Belyaev (Kyiv, Ukraine)
I. V. Blonskii (Kyiv, Ukraine)
V. G. Verbitsky (Kyiv, Ukraine)
B. M. Galkin (Odesa, Ukraine)
Yu. A. Gulyaev (Moscow, Russia)
Yu. O. Gunchenko (Odesa, Ukraine)
A. D'Amiko (Rome, Italy)
N. Jaffrezik Renault (Lyon, France)
S. V. Dzyadevych (Kyiv, Ukraine)
G. V. Elskaya (Kyiv, Ukraine)
V. O. Ivanytsia (Odesa, Ukraine)
O. M. Kalashnikov (Nottingham, United Kingdom)
O. V. Kovalenko (Dnipro, Ukraine)
I. A. Kravchenko (Odesa, Ukraine)
V. G. Litovchenko (Kyiv, Ukraine)
S. V. Lenkov (Kyiv, Ukraine)
E. V. Malakhov (Odesa, Ukraine)
Arturs Medvids (Riga, Latvia)
A. S. Opanasyuk (Sumy, Ukraine)
S. M. Ryabchenko (Kyiv, Ukraine)
V. A. Skryshevsky (Kyiv, Ukraine)
A. P. Soldatkin (Kyiv, Ukraine)
N. F. Starodub (Kyiv, Ukraine)
J. M. Stakhira (Lviv, Ukraine)
M. V. Strikha (Kyiv, Ukraine)
M. V. Tkach (Chernivtsi, Ukraine)
A. Chaundhri (Chandigarh, India)
E. M. Sheregii (Rzeszow, Poland)

Науковий редактор випуску
та відповідальний за випуск – **Я. І. Лепіх**

ЗМІСТ

CONTENTS

Сенсори фізичних величин**Physical sensors**

M. A. Glauberman, Ya. I. Lepikh, P. O. Snigur
 NOISE INFLUENCE ON THE RESOLUTION
 OF THE SENSORS BASED ON MAGNETIC
 TRANSISTOR STRUCTURES 4

М. А. Глауберман, Я. І. Леніх, П. О. Снігур
 ВПЛИВ ШУМІВ НА РОЗДІЛЬНУ
 ЗДАТНІСТЬ ДАТЧІКІВ НА ОСНОВІ
 МАГНІТОТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУР

Оптичні, оптоелектронні і радіаційні**сенсори****Optical and optoelectronic and radiation
sensors**

*V. M. Skobeeva, V. A. Smytyna, M. I. Kiose,
 N. V. Malushin*

INCREASING THE
 PHOTOLUMINESCENCE EFFICIENCY
 OF CdS NC GROWN IN A GELATINOUS
 ENVIRONMENT 10

*В. М. Скобеєва, В. А. Сминтина, М. І. Кіосе,
 Н. В. Малущин*

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
 ФОТОЛЮМІНЕСЦЕНЦІЇ НК CdS,
 ВИРОЩЕНИХ В ЖЕЛАТИНОВОМУ
 СЕРЕДОВИЩІ

Біосенсори**Biosensors**

*O. O. Soldatkin, O. V. Soldatkina,
 V. M. Arkhyrova, I. I. Piliponskiy,
 L. S. Rieznichenko, T. G. Gruzina,
 S. M. Dybkova, S. V. Dzyadevych,
 A. P. Soldatkin*

APPLICATION OF GOLD
 NANOPARTICLES FOR IMPROVEMENT
 OF ANALYTICAL CHARACTERISTICS
 OF CONDUCTOMETRIC ENZYME
 BIOSENSORS 20

*O. O. Солдаткін, О. В. Солдаткіна,
 В. М. Архипова, І. І. Пилипонський,
 Л. С. Рєзніченко, Т. Г. Грузіна,
 С. М. Дибкова, С. В. Дзядевич,
 О. П. Солдаткін*

ВИКОРИСТАННЯ НАНОЧАСТИНОК
 ЗОЛОТА ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ
 АНАЛІТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
 КОНДУКТОМЕТРИЧНИХ ФЕРМЕНТНИХ
 БІОСЕНСОРІВ

Сенсори та інформаційні системи**Sensors and information systems**

*V. I. Santoniy, Ya. I. Lepikh, V. V. Yanko,
 L. M. Budiyanskaya, I. A. Ivanchenko,
 A. P. Balaban*

INSTALLATION FOR PHYSICAL
 SIMULATION OF LASER LOCATION
 PROCESSES 35

*В. І. Сантоній, Я. І. Леніх, В. В. Янко,
 Л. М. Будіяньська, І. О. Іванченко,
 А. П. Балабан*

УСТАНОВКА ФІЗИЧНОГО
 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЛАЗЕРНОЇ
 ЛОКАЦІЇ

Персоналії. Професор Віталій Стріха:**штрихи до портрету фізика**

(до 90-річчя від дня народження) 53

Інформація для авторів**Вимоги до оформлення статей**

у журнал 59

Information for authors**The requirements on papers**

preparation 62

СЕНСОРИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

PHYSICAL SENSORS

PACS: 75.50.Pp, 81.40.Wx УДК: 621.382

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2021.1.227405>

ВПЛИВ ШУМІВ НА РОЗДІЛЬНУ ЗДАТНІСТЬ ДАТЧИКІВ НА ОСНОВІ МАГНІТОТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУР

М. А. Глауберман, Я. І. Лепіх, П. О. Снігур

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова
вул. Дворянська, 2, 65082, Одеса, ndl_lepikh@onu.edu.ua

ВПЛИВ ШУМІВ НА РОЗДІЛЬНУ ЗДАТНІСТЬ ДАТЧИКІВ НА ОСНОВІ МАГНІТОТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУР

М. А. Глауберман, Я. І. Лепіх, П. О. Снігур

Анотація. Абсолютна чутливість - параметр, що безпосередньо зв'язує збуджуючу величину з відгуком на неї є визначальною фізичною характеристикою абсолютної більшості перетворюючої структури незалежно від принципу роботи. Цей параметр вважається і основним критерієм якості виробу при використанні таких структур як датчиків відповідних величин. Тому завдання підвищення чутливості перетворювачів залишається актуальним і в зв'язку зі зростаючою кількістю датчиків, побудованих на нових принципах: нові матеріали, нові функціональні можливості і зростаючі вимоги, що впливають з умов експлуатації датчиків.

Ключові слова: магнітотранзисторні структури, чутливість, шуми.

NOISE INFLUENCE ON THE RESOLUTION OF THE SENSORS BASED ON MAGNETIC TRANSISTOR STRUCTURES

M. A. Glauberman, Ya. I. Lepikh, P. O. Snigur

Abstract. Absolute sensitivity is a parameter that directly connects the disturbing value with the response to it, is the determining physical characteristic of the absolute majority of the conversion structure, regardless on the operation principle. This parameter is also considered the main criterion for the quality of the product when using such structures as sensors of the corresponding values. Therefore, the problem of the transducer sensitivity increasing remains relevant in connection with the increasing the sensor number built on new principles: new materials, new functionality and increasing the requirements arising from the sensor operating conditions.

Keywords: magnetotransistor structures, sensitivity, noise.

ВЛИЯНИЕ ШУМОВ НА РАЗРЕШАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ МАГНИТОТРАНЗИСТОРНЫХ СТРУКТУР

М. А. Глауберман, Я. И. Лепих, П. А. Снегур

Аннотация. Абсолютная чувствительность – параметр, непосредственно связывающий возмущающую величину с откликом на нее, является определяющей физической характеристикой абсолютного большинства преобразовательных структур, независимо от принципа работы. Этот параметр считается и основным критерием качества изделия при использовании таких структур в качестве датчиков соответствующих величин. Поэтому задача повышения чувствительности преобразователей остается актуальной и в связи с возрастающим количеством датчиков, построенных на новых принципах: новых материалах, новых функциональных возможностях и возрастающих требований, вытекающих из условий эксплуатации датчиков.

Ключевые слова: магнитотранзисторные структуры, чувствительность, шумы.

Вступ

Відомо, що однією з основних характеристик датчиків магнітного поля на основі магнітотранзисторних структур (МТС) є чутливість. Відомо також, що чутливість датчиків будь-якої фізичної величини побудованих на основі напівпровідникових матеріалів і структур залежить від власних шумів. Магніточутливість МТС будь-якого типу обумовлена виникненням магнітного поля зі струмом неосновних носіїв, що протікають по поверхні розділу колектор-база. Експериментальні дослідження чутливих МТС в умовах дії шумів залишається актуальним завданням, якому присвячена дана робота.

Розглянуто двоколекторна дифузійна МТС, як модельне уявлення, придатне для опису практично будь-яких різновидів цих структур.

Результати досліджень та їх обговорення

Сучасні можливості мікроелектроніки дозволяють шляхом інтеграції на єдиному чіпі з первинним перетворювачем електронної схеми обробки сигналу, підвищити рівень вихідного сигналу до як завгодно великого значення, в результаті чого прагнення до підвищення абсолютної чутливості втрачає актуальність. Однак разом з посиленням корисного відгуку неминуче зростає вплив факторів, що обмежують роздільну здатність датчика - шуми при реєстрації змінних магнітних полів в разі маг-

ніточутливих транзисторних структур (МТС), і залишковий сигнал, точніше - його неконтрольовані зміни під дією зовнішніх факторів при реєстрації постійних полів. Таким чином, саме роздільна здатність МТС стає головним критерієм якості цих структур як датчиків.

Роздільну здатність МТС (мінімальне значення магнітної індукції, яке можна зареєструвати перетворювачем), прийнято оцінювати мінімальним полем B_{\min} і еквівалентним полем B_{eq} [1]:

$$B_{\min} \equiv S_A^{-1} \sqrt{S(f)}; \quad (1)$$

$$B_{eq} \equiv S_A^{-1} \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} S(f) df}, \quad (2)$$

де $S(f)$ - спектральна щільність потужності шумів на частоті f ; $f_1 \dots f_2$ - частотний діапазон, в якому оцінюється B_{eq} . Очевидно, що для практичних застосувань, де якості приладу оцінюються в кінцевому діапазоні частот, найбільш важливий параметр B_{eq} .

Низькочастотні шуми типу $1/f$ (флікер-шум [2]) в двоколекторних ДМТ виявляються добре корельованими для струмів різних колекторів, як для вертикальних структур, так і для горизонтальних з поздовжньою віссю [3,4]. Важливо відзначити, що експериментальні вертикальні структури в залежності від умов зсувів можуть виявляти відсутність кореляції і навіть антикореляцію [5].

Нами експериментально досліджувалися шумові властивості ДМТ з поперечною віссю типу представленого схематично на рис 1.

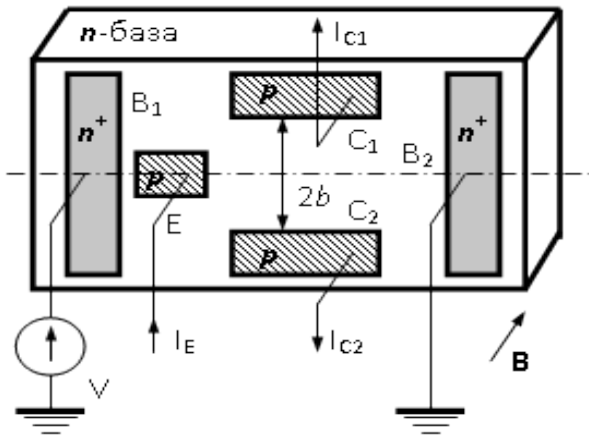


Рис. 1. Горизонтальні ДМТ з поперечною магнітною віссю з дрейфовим переносом

Використовувалися зразки з кремнію p-типу з питомим опором $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, розмірами емітера $30 \times 40 \text{ мкм}$, відстанню емітер - база (B_2) 300 мкм і міжколекторною відстанню $2b = 190 \text{ мкм}$. Коефіцієнт передачі струму становив $\alpha \approx 0.01$. Визначалися спектральні щільності потужності флюктуючих величин x :

$$S_x(f) = \frac{\langle x^2 \rangle}{\Delta f}$$

Результати вимірювань показані на рис. 2. Тут крива 1 представляє спектральні щільності колекторних струмів S_{I1} і S_{I2} ($S_{I1} = S_{I2}$); 2 - теж для різниці цих струмів SD; 3 - функцію кореляції $\Gamma_{I2}(f)$:

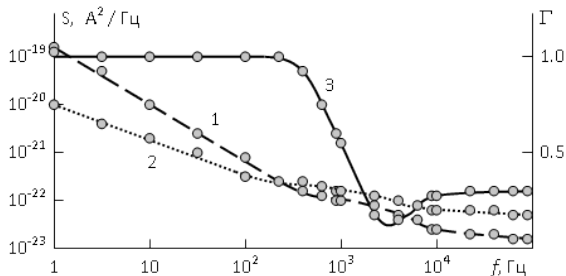


Рис. 2. Шумові властивості ДМТ

$$\Gamma_{I2}(f) = \frac{\text{Re}[S_{I2}(f)]}{S_{I1}(f)} = 1 - \frac{S_D(f)}{2S_{I1}(f)},$$

де $\text{Re}(S_{I2})$ - речова частина перехресної спектральної щільності (уявна зневажливо мала через відсутність ємнісного зв'язку між колекторами).

Видно, що в діапазоні частот $1 \dots 400 \text{ Гц}$ шуми сильно корельовані. У подвійному логарифмічному масштабі залежність $S_D(f)$ має на цій ділянці кутовий коефіцієнт -0.962 , що відповідає фліккер-шумам. В діапазоні $0.4 \dots 4 \text{ кГц}$ спектральні щільності колекторних струмів, а особливо їх різниці, мають плато, що характерно для лоренцевого спектра шуму, обумовленого генерацією-рекомбінацією носіїв заряду. На частотах понад 10^4 Гц шуми ДМТ мають «білий» спектр і являють собою дробовий шум.

Факт сильної взаємної позитивної кореляції шумових струмів колекторів в діапазоні $1 \dots 400 \text{ Гц}$ може бути пояснений флюктуаціями струму інжекції в емітерному переході, які одночасно впливають на обидва колектори. Наслідком такої кореляції для низькочастотного шуму є високе відношення сигнал / шум ($C / Ш$), яке визначається як

$$C/Ш(f) = \Delta I_C * \left[\int_{f_1}^{f_2} S_D(f) df \right]^{-1/2} = \Delta I_C * \left\{ \int_{f_1}^{f_2} S_{I1}(f) * [1 - \Gamma_{I2}(f)] df \right\}^{-1/2},$$

де $\Delta I_C = I_{C1}(B) - I_{C2}(B)$.

Тоді для $(1 - \Gamma_{I2}) \sim 2 * 10^{-3}$, $B = 1 \text{ Тл}$ і $S_{I1} = K/f$, де $K = \text{const}$ визначається з рис. 2, отримуємо $C / Ш = 8.25 * 10^5$. При цьому вимога $C / Ш = 1$ дає

$$B_{eq} \equiv \frac{2(1 - \Gamma_{I2})}{\Delta I_C} * \left[\int_{f_1}^{f_2} \frac{df}{f} \right]^{-1/2},$$

величина якого в діапазоні $1 \dots 400 \text{ Гц}$ приймає значення $8.7 * 10^{-6} \text{ Тл}$.

Оскільки дробові (білі) шуми колекторних струмів практично не корельовані, саме ними і обмежується дозвіл ДМТ. Для таких шумів спектральна щільність

$$S(f) = \frac{\partial \langle i_C \rangle}{\partial f} = 2eI_C,$$

де i_C - поточне значення шумового струму колектора. Маючи для наших структур з експерименту $S_A \approx 5 \cdot 10^{-4}$ А / Тл, в області $f > 10^4$ Гц (рис. 2) отримуємо $B_{min} = 4 \cdot 10^{-8}$ Тл*Гц^{1.2}, що відповідає, згідно [6] найбільш високим з відомих значень для перетворювачів магнітного поля всіх видів (0.05 ... 40 мкТл / Гц^{1.2}).

Беручи до уваги (2), можна записати [7]:

$$B_{eq}^2 = \frac{2eI_C}{S_A^2} (f_2 - f_1).$$

Тоді (2) можна переписати у вигляді

$$B_{eq} = \frac{1}{S_R \sqrt{\alpha}} \sqrt{\frac{2e(f_2 - f_1)}{I_E}},$$

де лише перший співмножник правої частини містить параметри ДМТ.

Важливо відзначити, що вищевикладене істотно лише для змінних (нехай навіть для як завгодно низькочастотних, квазістаціонарних) магнітних полів. Очевидно, що при вимірюванні полів строго постійних будь-які шуми можуть бути відфільтровані. Тому для постійних полів якість перетворювача оцінюється величиною залишкового сигналу [8] і відповідної йому магнітної індукції:

$$B_{eq} = \frac{\Delta I_0}{S_A} = I_E^{-1} \frac{\Delta \alpha}{\alpha S_R},$$

де ΔI_0 і $\Delta \alpha$ - різниці відповідно колекторних струмів і коефіцієнтів передачі для кожного з колекторів у відсутності магнітного поля.

Висновки

Роздільна здатність ДМТ в змінних магнітних полях визначається відношенням сигнал / шум. В області постійних магнітних полів вона

визначається величиною залишкового сигналу. І в тому і в іншому випадку роздільна здатність ДМТ є монотонно зростаючою функцією двох параметрів структури - ефективності перетворення і коефіцієнта передачі струму.

Список використаної літератури

- [1]. Comparison of noise properties of different magneticfield semiconductor integrated sensors / A. Chovet, Ch. S. Roumenin, G. Dimopoulos, N. Mathieu // Sensors and Actuators. - 1990. - Vol. A22, Nos. 1-3. - P. 790-794.
- [2]. Van der Zil A. Edinoe predstavlenie shumov tipa 1/f v elektronnyh priborah: Fundamental'nye istochniki // TIHER. - 1988. - T.76, No.3. - S. 28-57 (in Russian).
- [3]. Nathan A., Baltes H. P. Integrated silicon magnetotransistors: High sensitivity or high resolution? // Sensors and Actuators. - 1990. - Vol. A22, Nos.1-3. - P. 780-785.
- [4]. Noise correlation in dual-collector magnetotransistors / A. Nathan, H. P. Baltes, D. R. Briglio, T. Doan // IEEE Transactions on Electron Devices. - 1989. - Vol.36, No.6. - P. 1073-1075.
- [5]. Castagnetti R., Baltes H. Noise correlation and operating conditions of dual-collector magnetotransistors // Sensors and Actuators. - 1991. - Vol.A26, Nos.1-3. - P. 363-367.
- [6]. Shumovye svoystva dvuhkollektornogo magnitotranzistora / I. M. Vikulin, M. A. Glauberman, V. V. Egorov, N. A. Kanishcheva // Radiotekhnika i elektronika. - 1992. - T.37, No.4. - S. 760-762 (in Russian).
- [7]. Chovet A., Mathcey N. Noise and Resolution of Semiconductor Integrated Magnetic Sensors // Sensors and Actuators A. - 1992. - V.32, Nos 1-3. - P. 682-687.
- [8]. Popovic R. S., Widmer R. Sensitivity and noise of a lateral bipolar magnetotransistor in CMOS technology // Int. Electron. Dev. Meet., San Francisco, Calif., Dec. 9-12, 1984. Techn. Dig. - New York, N.Y., 1984. - P. 568-571.
- [9]. Huijsing J. H. Signal conditioning on the sensor chip. // Sensors and Actuators. - 1986. - Vol.10, Nos 3&4. - P. 219-237.

Стаття надійшла до редакції 10.02.2021 р.

PACS: 75.50.Pp, 81.40.Wx UDC: 621. 382

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2021.1.227405>

NOISE INFLUENCE ON THE RESOLUTION OF THE SENSORS BASED ON MAGNETIC TRANSISTOR STRUCTURES

M. A. Glauberman, Ya. I. Lepikh, P. O. Snigur

Odesa I. I. Mechnikov National University, 2, Dvoryanskaya str., Odesa, 65082,
ndl_lepikh@onu.edu.ua

Summary

The main characteristics of transistor magnetosensitive structures (MTS), on the basis of which sensors of various physical quantities are built, for example, magnetic field sensors, are sensitivity and resolution. These characteristics are determined and depend on the properties of semiconductor materials and the actions of external destabilizing factors.

In this work, we investigated the effect of the intrinsic noise of transistor structures on their sensitivity.

The research was carried out on a model version of the MTS - a two-collector magnetoresistor (TMT) of wide application in practice, and the results of research on it can be extended to various designs,

It is shown that the dependence of this characteristic, expressed by the signal/noise ratio in constant (quasi-stationary) magnetic fields, is determined by the value of the residual signal arising under the influence of external factors. Their influence can be reduced by reducing the residual signal and compensating external influences using schematic methods.

Keywords: magnetotransistor structures, sensitivity, noise.

PACS: 75.50.Pp, 81.40.Wx УДК: 621. 382

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2021.1.227405>

ВПЛИВ ШУМІВ НА РОЗДІЛЬНУ ЗДАТНІСТЬ ДАТЧИКІВ НА ОСНОВІ МАГНІТОТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУР

М. А. Глауберман, Я. І. Лепіх, П. О. Снігур

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова
вул. Дворянська, 2, 65082, Одеса, ndl_lepikh@onu.edu.ua

Реферат

Основними характеристиками транзисторних магніточутливих структур (МТС), на основі яких будуються датчики різних фізичних величин, наприклад, датчики магнітного поля є чутливість і роздільна здатність. Ці характеристики визначаються і залежать від властивостей напівпровідникових матеріалів і дій зовнішніх дестабілізуючих факторів.

У даній роботі досліджувався вплив власних шумів транзисторних структур на їх чутливість.

Дослідження проводилися на модельному варіанті МТС - двоколекторному магніторезисторі (ДМТ) широкого застосування на практиці, а результати досліджень на ньому можуть бути поширені на різні конструкції.

Показано, що залежність цієї характеристики, що виражається відношенням сигнал / шум в постійних (квазі-стаціонарних) магнітних полях, визначається величиною залишкового сигналу, що виник під дією зовнішніх чинників. Їх вплив може бути знижено шляхом зменшення залишкового сигналу і компенсацією зовнішніх впливів схематичними методами.

Ключові слова: магніотранзисторні структури, чутливість, шуми.

OPTICAL AND OPTOELECTRONIC AND RADIATION SENSORS

ОПТИЧНІ, ОПТОЕЛЕКТРОННІ І РАДІАЦІЙНІ СЕНСОРИ

PACS 81.05.Dz, УДК 621.32; 535. 37

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2021.1.227406>

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФОТОЛЮМІНЕСЦЕНЦІЇ НК CdS, ВИРОЩЕНИХ В ЖЕЛАТИНОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ

В. М. Скобеєва¹, В. А. Сминтина², М. І. Кіосе², Н. В. Малущин¹

¹НДІ фізики Одеського національного університету імені І. І. Мечникова, 65082, Одеса,
вул. Пастера, 27, Україна. e-mail: v_skobeeva@ukr.net

²Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, 65082, Одеса, вул. Дворянська, 2,
Україна. e-mail: mihail20032015@gmail.com

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФОТОЛЮМІНЕСЦЕНЦІЇ НК CdS, ВИРОЩЕНИХ В ЖЕЛАТИНОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ

В. М. Скобеєва, В. А. Сминтина, М. І. Кіосе, Н. В. Малущин

Анотація. Досліджено оптичні та люмінесцентні властивості наноструктур КТ CdS / ZnS, та КТ CdS легованих літієм, отриманих по золь-гель технології у водному розчині желатини. З спектрів оптичного поглинання наноструктур КТ CdS / ZnS визначено що товщина шару оболонки, відповідає товщині одного моношару ZnS. У спектрах люмінесценції виявлено значне зростання інтенсивності світіння наноструктури. Спектри поглинання нелегованих і легованих НК CdS збігаються, що свідчить про відсутність зміни розміру НК та відсутність утворення сполуки літію з сіркою. Спектри люмінесценції КТ, легованих літієм, демонструють збільшення інтенсивності люмінесценції що пов'язано з пасивацією поверхневих станів.

Ключові слова: Люмінесценція, сульфід кадмію, сульфід цинку, наноструктура ядро-оболонка, легування.

INCREASING THE PHOTOLUMINESCENCE EFFICIENCY OF CdS NC GROWN IN A GELATINOUS ENVIRONMENT

V. M. Skobeeva, V. A. Smyntyna, M. I. Kiose, N. V. Malushin

Abstract. The optical and luminescent properties of nanostructures of CdS / ZnS QDs and CdS QDs doped with lithium, obtained by the sol-gel technology in an aqueous solution of gelatin, have

been studied. It was determined from the optical absorption spectra of the CdS / ZnS QD nanostructures that the thickness of the shell layer corresponds to the thickness of one ZnS monolayer. The luminescence spectra revealed a significant increase in the intensity of luminescence nanostructure. The absorption spectra of undoped and doped CdS NCs coincide, which indicates that there is no change in the NC size and the absence of the formation of a lithium-sulfur compound. The luminescence spectra of lithium-doped QDs demonstrate an increase in the luminescence intensity, which is associated with the passivation of surface states.

Keywords: Luminescence, cadmium sulfide, zinc sulfide, core-shell nanostructure, doping.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ НК CdS, ВЫРАЩЕННЫХ В ЖЕЛАТИНОВОЙ СРЕДЕ

В. М. Скобеева, В. А. Смынтына, М. И. Киосе, Н. В. Малушин

Аннотация. Исследованы оптические и люминесцентные свойства наноструктур КТ CdS / ZnS, и КТ CdS легированных литием, полученных по золь-гель технологии в водном растворе желатины. Из спектров оптического поглощения наноструктур КТ CdS / ZnS определено, что толщина слоя оболочки, соответствует толщине одного монослоя ZnS. В спектрах люминесценции обнаружен значительный рост интенсивности свечения наноструктуры. Спектры поглощения нелегированных и легированных НК CdS совпадают, что свидетельствует об отсутствии изменения размера НК и отсутствии образования соединения лития с серой. Спектры люминесценции КТ, легированных литием, демонстрируют увеличение интенсивности люминесценции что связано с пассивацией поверхностных состояний.

Ключевые слова: Люминесценция, сульфид кадмия, сульфид цинка, наноструктура ядро-оболочка, легирование.

ВСТУП

Квантові точки (КТ) або нанокристали (НК) з'єднань A_2B_6 є перспективними для практичного застосування в електроніці в якості світловипромінюючих пристроїв і діодних лазерів [1], а також в медицині для біологічного флуоресцентного маркування [2,3]. У цих напрямках ефективність люмінесценції КТ є основною характеристикою, яка і визначає успішність створення світловипромінюючих і імуносенсорних пристроїв на їх основі. Незважаючи на те, що напівпровідникові нанокристали показали великі перспективи в якості нового класу флуорофорів в біологічній візуалізації, інтенсивність їх люмінесценції часто виявляється недостатньою або деградує з часом. Це пов'язано з тим, що в НК поверхня грає вирішальну роль в порівнянні з об'ємом. Внаслідок не скомпенсованих обірваних ва-

лентних зв'язків на поверхні НК утворюються безвипромінювальні центри рекомбінації, пасткові центри захоплення носіїв. Крім того, внаслідок відсутності або недостатньої висоти потенційного бар'єру між КТ і зовнішнім водорозчинним середовищем може спостерігатися витік екситонів з об'єму, що також знижує ефективність люмінесценції.

Таким чином, питання синтезу напівпровідникових НК з високим квантовим виходом і підвищення ефективності їх люмінесценції є актуальними. У літературі описані численні способи вирішення цієї проблеми, мета яких зводиться до пошуків, як способів пасивації поверхні шляхом її обробки, так і до розробки способів покриття поверхні оболонкою з шириною забороненої зони, більшою ніж у НК [4-8].

Для спостереження люмінесценції у видимій області спектра застосовуються такі напів-

провідникові матеріали, як сульфіді і селеніди металів кадмію та цинку. Для НК сульфідів і селенідів кадмію в якості оболонки найбільш підходить напівпровідник ZnS, у якого ширина забороненої зони $E_g = 3,7$ eV, яка більше, ніж, наприклад, у CdS ($E_g = 2,4$ eV). Крім того, використання сульфідів цинку може сприяти більшій стабільності і меншій токсичності НК CdS (Se).

Огляд літературних джерел показує, що найбільше число публікацій по створенню і дослідженню наноструктур ядро - оболонка відноситься до структур CdSe / ZnS і відносно мале - до CdS / ZnS. Однак, останнім часом з'являються роботи з дослідження двох і тришарових структур CdSe / CdS / ZnS, в яких присутні поєднання двох шарів CdS / ZnS, властивості яких будуть впливати на функціонування всієї наноструктури.

У роботах [5,9], крім спостереження посилення флуоресценції наноструктур CdSe / CdS в формі ядро-оболонка, була відзначена сильна залежність оптичної щільності і люмінесценції від модифікації поверхні. Це може залежати від середовища, в якому здійснюється синтез колоїдних наноматеріалів, від органічних і біологічних середовищ, які оточують і взаємодіють зі наноструктурою. Останнє означає, що властивості колоїдних гетерогенних структур будуть залежати від конкретних способів їх отримання, а саме, від типу і хімічного складу стабілізатора розмірів НК, стехіометрії поверхні, характеру взаємодії стабілізатора з поверхнею в залежності від рН середовища.

Огляд фотолюмінісцентних властивостей колоїдних НК A₂B₆ типу «ядро - оболонка» наведено в монографії [10]. В роботі представлені результати впливу розмірів ядра і оболонки і співвідношення їх розмірів на квантовий вихід фотолюмінесценції, котрий може досягати 80%. Автори звертають увагу на роль внутрішньої структури, як важливого параметра, який можна використовувати для зміни оптичних і електронних властивостей гетероструктурних композитів. Представлені в монографії роботи свідчать про складність взаємодій в наноструктурах з великою кількістю параметрів, які впливають на їх властивості, що потребує подальших експериментальних досліджень.

До цієї ж проблеми ставляться і дослідження модифікації поверхні нанокристалів.

Під модифікацією поверхні розуміються такі процеси, як взаємодія з органічною речовиною, структурна перебудова в результаті окислення, легування різними домішками. Проблема легування КТ атомами металів вимагає розуміння процесів їх вбудовування в решітку нанокристалів, які налічують сотні або тисячі атомів, фізики та хімії процесів асоціації домішкових атомів з власними дефектами НК, а також питань впливу легування на спектр люмінесценції і квантову ефективність світіння. В першу чергу це становить інтерес щодо легування атомами лужних металів, для яких гіпотетично передбачається велика ймовірність вбудовування в решітку НК атомів з малими радіусами.

Дослідження впливу легування атомами лужних металів на інтенсивність люмінесценції НК і плівок сульфідів кадмію і кристалів інших з'єднань описані в роботах [11-13]. Так, в спектрі люмінесценції НК CdS, легуваних Li автори роботи [11] спостерігали появу в спектрі світіння короткохвильової смуги з $\lambda_{\text{макс}} = 520$ нм, природа якої пов'язана з дефектом заміщення - Li_{Cd} , який є глибоким донором з енергією активації 0,4 eV. Ці результати свідчать про легування об'єму НК. У той же час, досліджуючи вплив домішки літію на люмінесценцію монокристалів CdTe, авторами роботи [12,] не виявлено впливу процесів легування на властивості об'єму основного матеріалу, але було встановлено утворення тонкого, легovanого літієм, поверхневого наноструктурованого шару. Характерно, що якщо у вихідних зразках люмінесценція була відсутня, то в результаті легування вони проявляли інтенсивну люмінесценцію. У ряді випадків легування КТ атомами металів сприяє не тільки підвищенню ефективності емісії, а також модулює деформацію решітки між шарами гетероструктур типу ядро - оболонка [13]. Автори цих досліджень демонструють, що на здатність проникати в кристалічну решітку впливають заряд і розмір легуючих атомів. В роботі [16] проведено дослідження впливу домішки літію на параметри люмінесценції піролітичних плівок на основі CdS. Досліджено вплив концентрації доміш-

ки літію і температури синтезу на параметри люмінесценції піролітичних плівок на основі CdS. Виявлено, що при введенні домішки літію, з одного боку, зменшується концентрація центрів безвипромінювальної рекомбінації, а з іншого - збільшується концентрація вільних електронів. З цього випливає, що одночасно відбуваються, як процеси пасивації поверхневих станів, так і легування об'єму.

Таким чином, дослідження фізико-хімічних, технологічних способів, спрямованих на підвищення квантової ефективності НК CdS є мало вивченими і представляє науковий і практичний інтерес.

У даній роботі представлені дослідження технологічних способів посилення люмінесценції НК CdS, вирощених у водному розчині желатини, як шляхом створення оболонки ZnS, так і шляхом легування.

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

В якості прекурсорів в реакції синтезу НК CdS використовувалися нітрат кадмію $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ і сульфід натрію Na_2S . Водний розчин желатини використовувався для стабілізації розмірів НК. Сіль цинку ZnCl_2 слугувала для створення оболонки НК CdS. У якості джерела літію використовувався хлорид літію (LiCl).

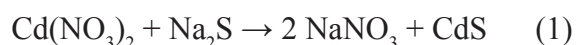
Слід зазначити, що в даній роботі НК CdS були синтезовані у желатиновій матриці, молекулярна структура якої не протидіє дифузії атомів, як прекурсорів, так і легуючих атомів, що дозволяє проведення нарощування оболонки в одностадійному процесі.

Для вимірювання спектрів оптичної щільності використовувався спектрофотометр СФ-26 зі спектральним діапазоном від 186 до 1100 нм. Вимірювання спектрів люмінесценції проводилось з використанням твердотілого лазера LCS-DTL-374QT з накачуванням, напівпровідниковими діодами, які працюють в режимі оптико-акустичної модуляції.

2.1. Синтез КТ і нанокompatитів

У водний розчин 1% желатини було додано 5 мл. водного розчину $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ (0.25 моль / л)

з наступним перемішуванням протягом 10 хв., після чого додано по краплях 5 мл. водного розчину Na_2S (0.25 моль / л). Реакція синтезу відбувалася протягом 20 хвилин при температурі 40°C при безперервному перемішуванні. У міру протікання реакції колір розчину змінювався від прозорого до помаранчевого. Хімічна реакція синтезу описується рівнянням (1):



Нарощування оболонки на НК CdS здійснювалося наступним чином. У колоїдний розчин 1% желатини який містить наночастки CdS було додано 5 мл. водного розчину ZnCl_2 (0,25 моль / л.) і розчин перемішувався протягом 10 хв. Після закінчення цього часу колір розчину змінювався з помаранчевого на світло - жовтий.

Легування НК CdS проводилось наступним чином: в розчин 1% желатину додавали водний розчин $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ (0.2 моль / л) і водний розчин (LiCl_2) (0.2 моль / л) з наступним перемішуванням протягом 10 хв. В отриманий розчин по краплях додавали водний розчин Na_2S (0.2 моль / л). Процес здійснювався при безперервному перемішуванні протягом 20 хвилин при температурі 40°C. В кінці реакції розчин набував яскраво жовтий колір.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1. Оптичні і люмінесцентні властивості структури ядро - оболонка CdS / ZnS.

Спектри люмінесценції КТ CdS і наноструктури типу ядро-оболонка CdS / ZnS представлені на рис.1. Помітно значне збільшення інтенсивності люмінесценції наноструктури CdS / ZnS в порівнянні до КТ CdS. Дане явище може бути пов'язане з формуванням оболонки ZnS навколо ядра CdS, в результаті чого носії заряду ефективно обмежені в області ядра за рахунок потенційного бар'єру, утвореного між двома напівпровідниками з різними ширинами заборонених зон ($E_g = 2,4$ eV і 3,7 eV, відповідно, для CdS і ZnS). Крім того, оболонка ZnS відокремлює поверхню КТ CdS від навколишнього середовища - водного розчину желатини. Це зменшує концентрацію нерадіаційних

поверхневих дефектів і покращує квантовий вихід фотолюмінесценції.

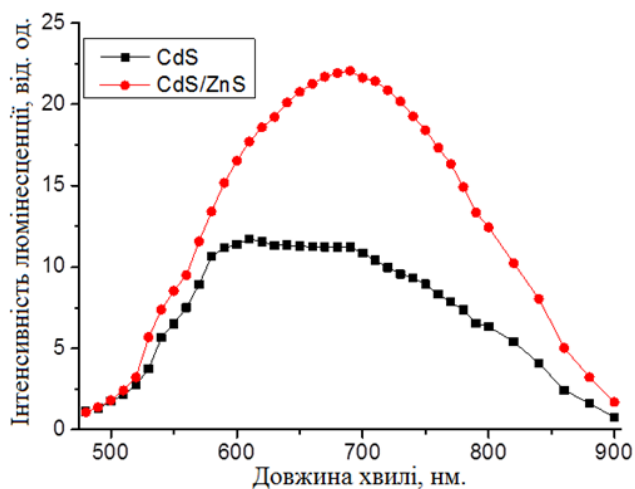


Рис. 1. Спектри фотолюмінесценції КТ CdS і наноструктури CdS / ZnS

Оптичні характеристики досліджуваних зразків підтверджують факт нарощування шару ZnS на КТ CdS. В спектрі поглинання (рис.2) спостерігається червоне зміщення для наноструктур CdS / ZnS в порівнянні з КТ ядра CdS, що вказує на формування структури CdS / ZnS, а не на утворення твердого розчину $Cd_xZn_{1-x}S_{1-y}$, як це спостерігалось в роботі [14]. В останньому випадку спектр поглинання був би зміщений в більш короткохвильову область у порівнянні зі спектром вихідних структур через більшу енергію забороненої зони твердого розчину $Cd_xZn_{1-x}S_{1-y}$.

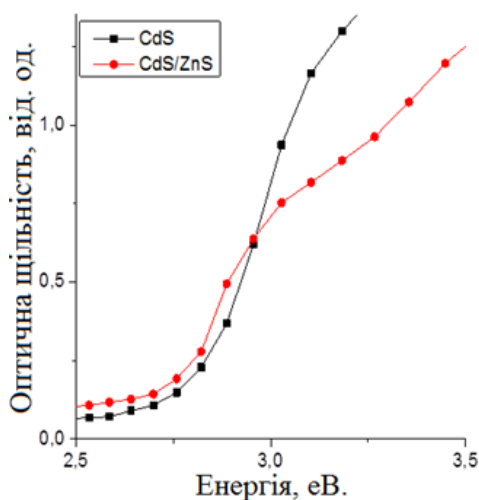


Рис. 2. Спектри оптичної щільності КТ CdS і наноструктури CdS / ZnS

Той факт, що на спектрах поглинання не проявляються максимумів, відповідних оптичним переходам між дискретними рівнями, свідчить про досить великий розподіл НК за розмірами. У цьому випадку ці спектри оптичної щільності були продиференційовані. На рис. 3 представлені диференційовані спектри, максимуми яких відповідали першому оптичному переходу в КТ CdS і в наноструктурах CdS / ZnS. За величиною зміщення ширини забороненої зони (ΔE_g) щодо ширини забороненої зони об'ємного кристала з використанням наближення ефективних мас за формулою (2) оцінювався середній радіус наночастинок [15]:

$$R = \frac{h}{\sqrt{8\mu\Delta E_g}} \quad (2)$$

Тут h - постійна Планка; $\mu = ((m_{e^*})^{-1} + (m_{h^*})^{-1})^{-1}$, де $m_{e^*} = 0.19m_e$, $m_{h^*} = 0.8m_e$ - відповідно ефективні маси електрона і дірки в сульфіді кадмію, m_e - маса вільного електрона; ΔE_g - різниця між шириною забороненої зони в наночастиці і об'ємному кристалі CdS (2.4 eV). Результати розрахунків представлені в таблиці 1.

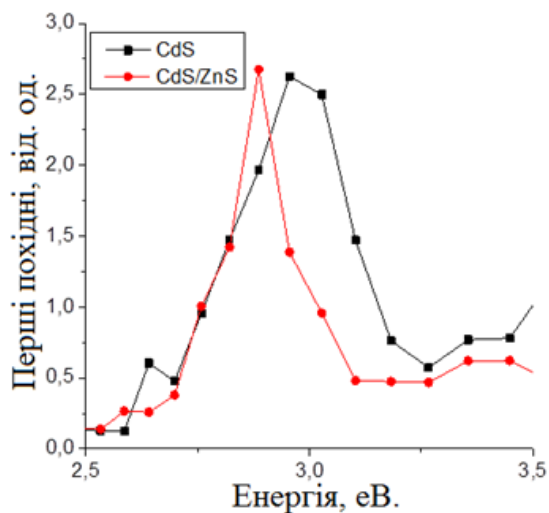


Рис. 3. Диференційовані спектри поглинання КТ CdS, CdS / ZnS

Таблиця 1
Ширина забороненої зони і розмір КТ

КТ	E_g (eV)	R (nm)	d (nm)
CdS	2,95	5,8	2,9
CdS/ZnS	2,88	6,1	3,05

Зміна розміру діаметру наноструктури відносно КТ CdS дорівнює Δd ($d_{CdS/ZnS} - d_{CdS}$) = 0.15 nm. Відомо, що іонний радіус цинку 0,074 nm, що може свідчити про утворення моношару ZnS.

Характерно, те що, як показує розкладання спектрів люмінесценції КТ CdS і CdS / ZnS на складові елементарні смуги, (рис. 4 і 5), в спектрах наноструктури CdS / ZnS не спостерігаються нові спектральні смуги, що доводить відсутність легування КТ CdS цинком. Однак, не виключено, що іони цинку можуть займати вакантні місця V_{Cd} на поверхні кристала, зменшуючи кількість центрів конкуруючої рекомбінації.

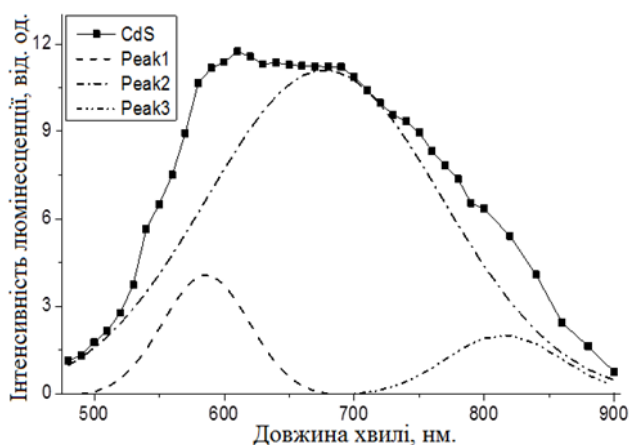


Рис. 4. Розкладання спектрів люмінесценції КТ CdS

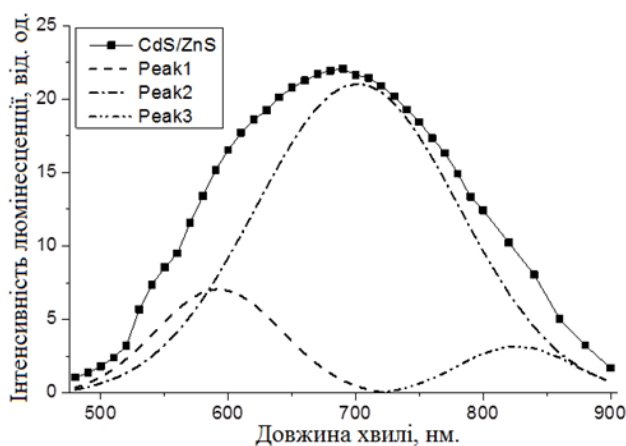


Рис. 5. Розкладання спектрів люмінесценції КТ CdS / ZnS

3.2. Оптичні і люмінесцентні властивості НК CdS, легованих літієм.

Як вже зазначалося вище, фізико-хімічні процеси легування нанокристалів є недостатньо вивченими. Зокрема, це стосується питання щодо типу створюваних дефектів і місць їх локалізації, а саме, в об'ємі або на поверхні. З цього приводу представляє інтерес дослідити вплив домішки літію на інтенсивність фотолюмінесценції НК CdS.

Як видно з рис. 6, спектри поглинання нелегованих і легованих НК CdS збігаються, що свідчить про відсутність зміни розміру НК та про відсутність утворення сполуки літію з сіркою.

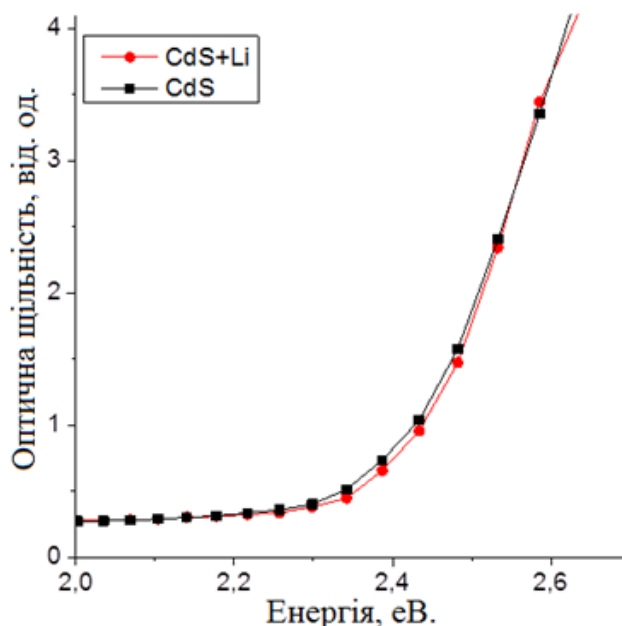


Рис. 6. Спектри поглинання КТ CdS і CdS легованих Li

Спектри люмінесценції КТ, легованих літієм, представлені на рис. 7. вони демонструють збільшення інтенсивності люмінесценції в 3.5 рази. Дане явище може бути пояснено декількома факторами. По-перше, літій може пасивувати поверхневі дефекти, зменшуючи кількість безвипромінювальних центрів рекомбінації. По-друге, якщо припустити, що впровадження атомів літію в міжвузля кристалічної решітки CdS приводить до формування дрібних донорних центрів, які можуть бути іонізовані при кімнатній температурі, то збільшення концен-

трації носіїв заряду в зоні провідності, буде сприяти посиленню інтенсивності ФЛ.

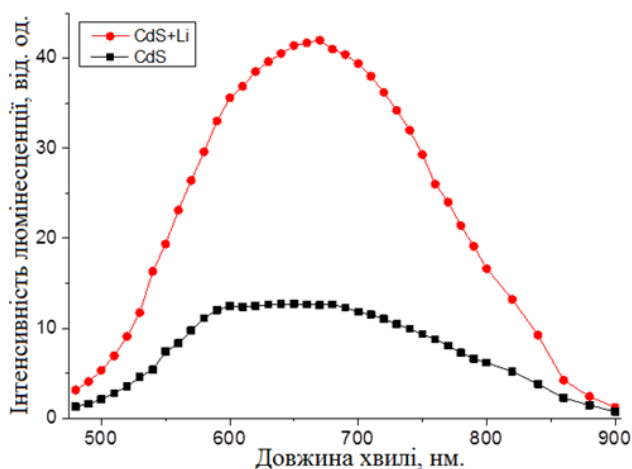


Рис. 7. Люмінесценція КТ CdS і CdS легованих Li

З огляду на те, що спектр люмінесценції КТ CdS, легованих Li, представляє широку смугу, то було проведено розкладання цієї смуги на складові (Рис.8.). З порівняння з аналогічним поданням для нелегованих КТ CdS (Рис.4.), видно, що в результаті легування не виникли нові смуги фотолюмінесценції.

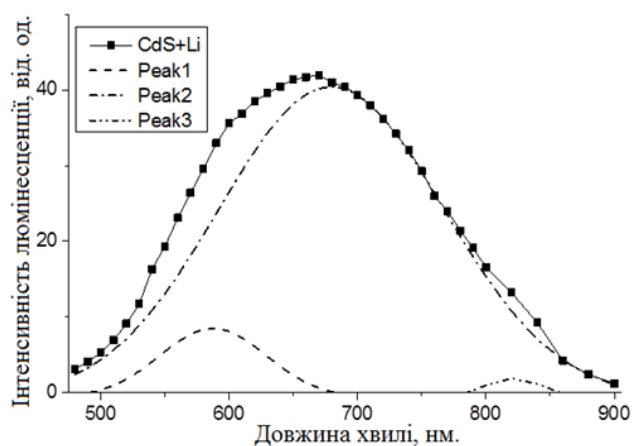


Рис. 8. Розкладання спектрів люмінесценції КТ CdS легованих Li

У випадку легування КТ CdS атомами літію можна було б очікувати люмінесценцію в короткохвильовій області. Звернемо увагу на те, що вирощені нами КТ CdS по золь-гель технології в водному розчині желатини не виявляли люмінесценцію в короткохвильовій області спектра. Це пов'язано з великою концентраці-

єю глибоких центрів, що характерно для даної технології. Превалювання каналів рекомбінації через глибокі центри в порівнянні з каналами екситонної або крайової люмінесценції призводить до реєстрації широких смуг в довгохвильовій області.

ВИСНОВОК

В роботі описані результати досліджень щодо збільшення інтенсивності люмінесценції КТ CdS. Розглянуто два способи: шляхом утворення структури ядро - оболонка і шляхом легування КТ. Відмінною особливістю технології нарощування оболонки являється те, що нарощування здійснюється в одному процесі, а не на вирощені КТ CdS. З спектрів оптичного поглинання наноструктур КТ CdS / ZnS визначена товщина шару оболонки, яка відповідає товщині одного моношару ZnS. Спостерігалось зростання інтенсивності світіння наноструктури.

Дослідження результатів впливу домішки літію на спектр та інтенсивність люмінесценції КТ CdS показало відсутність смуг люмінесценції, пов'язаних з літієм і збільшення інтенсивності світіння КТ в 3,5 рази, що пов'язано з пасивацією поверхневих станів.

Список використаної літератури

- [1]. A. L. Rogach, N. Gaponik, J. M. Lupton, C. Bertoni, D. E. Gallardo, S. Dunn, Alexander Eychmüller. Light-Emitting Diodes with Semiconductor Nanocrystals. *Angewandte Chemie International Edition* 47 (35), 6538-6549. DOI: 10.1002/anie.200705109.
- [2]. Jonathan S. Steckel, John P. Zimmer, Seth Coe-Sullivan, Nathan E. Stott, Vladimir Bulovic', and Mounqi G. Bawendi. Blue Luminescence from (CdS)ZnS Core-Shell Nanocrystals. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2004, 43, 2154–2158. DOI: 10.1002/anie.200453728.
- [3]. Quantum dot bioconjugates for imaging, labelling and sensing Medintz, I. L., Uyeda, H. T., Goldman, E. R. & Mattoussi, H. *Quantum dot bioconjugates for imaging, labelling and sensing Nature Materials* 2005 4(6):435-446. DOI: 10.1038/nmat1390.

- [4]. Fábio Pereira Ramanery, Alexandra Anselmo Piscitelli Mansur, Herman Sander Mansur. Synthesis and Characterization of Water-dispersed CdSe/CdS Core-shell Quantum Dots Prepared via Layer-by-layer Method Capped with Carboxylic-functionalized Poly(Vinyl Alcohol). *Materials Research*. 2014; 17 (Suppl. 1): 133-140 DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392014005000060>.
- [5]. Adolfas K. Gaigalas, Paul DeRose, Lili Wang, and Yu-Zhong Zhang. Optical Properties of CdSe/ZnS Nanocrystals. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. Volume 119 (2014). P. 609-628. <http://dx.doi.org/10.6028/jres.119.026>.
- [6]. Bonghwan Chon, Sung Jun Lim, Wonjung Kim, Jongcheol Seo, Hyeonggon Kang, Taiha Joo, Jeeseong Hwang and Seung Koo Shin. Shell and ligand-dependent blinking of CdSe-based core/shell nanocrystals. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2010, 12, 9312-9319 DOI: 10.1039/b924917f.
- [7]. Sung Jun Lim, Bonghwan Chon, Taiha Joo, and Seung Koo Shin. Synthesis and Characterization of Zinc-Blende CdSe-Based Core/Shell Nanocrystals and Their Luminescence in Water. *J. Phys. Chem. C*, 2008, Vol. 112, No. 6, 1744-1747; <https://doi.org/10.1021/jp710648g>.
- [8]. James Cassidy, Mikhail Zamkov. Nanoshell quantum dots: Quantum confinement beyond the exciton Bohr radius. *J. Chem. Phys.* 152, 110902 (2020); <https://doi.org/10.1063/1.5126423>.
- [9]. Dmitri V. Talapin, Andrey L. Rogach, Andreas Kornowski, Markus Haase, , and Horst Weller. Oxide–Trioctylphosphine Mixture Highly Luminescent Monodisperse CdSe and CdSe/ZnS Nanocrystals Synthesized in a Hexadecylamine–Trioctylphosphine. *Nano Letters* 2001, 1, 4, 207–211. <https://doi.org/10.1021/nl0155126>.
- [10]. D. V. Korbutiak, O. V. Kovalenko, S. I. Budzuliak, O. V. Melnychuk «Nanostruktury napivprovidnykovykh spoluk A2V6 ; Nizhyn, vydavnytstvo NDU im. M. Hoholia, 2020, 184 s. (*in Ukrainian*).
- [11]. V. A. Smyntyna, V. M. Skobeeva, N. V. Malushin, Lyuminescentnye svoystva nanokristallov sulfida kadmiya, legirovannykh atomami litiya i alyuminiya. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. T. 2 (8) 1/2011. C. 55-58 (*in Russian*).
- [12]. Mazur T. M., Slyotov M. M., Kinzerska O. V., Prokopiv V. V. Optical properties of CdTe doped Li. Abstract book International Research and Practice Conference “Nanotechnology and Nanomaterials” (NANO-2020). 26-29 August 2020. Lviv, Ukraine, p.392. <https://virtual-nano-2020.b2match.io/>.
- [13]. Friedfeld, M. R., Stein, J. L., Johnson, D. A., Park, N., Henry, N. A., Enright, M. J., Cossairt, B. M. (2019). Effects of Zn²⁺ and Ga³⁺ doping on the quantum yield of cluster-derived InP quantum dots. *The Journal of Chemical Physics*, 151(19), 194702. doi:10.1063/1.5126971.
- [14] Yu. A. Nitsuk, M. I. Kiose, Yu. F. Vaksman, V. A. Smyntyna, I. R. Yatsunskyi: Optical properties of CdS nanocrystals, doped with zinc and copper. *Physics and technology of semiconductors*, 2019, volume 53, no. 3.
- [15] A. I. Gusev, A. A. Rempel'. *Nanokristallicheskie materialy* (M., Fizmat-lit, 2000), c. 224 (*in Russian*).
- [16]. Majorova T. L., Klyuev V. G. Lyuminescentnye svoystva polikristallicheskih plenok sulfida kadmiya, legirovannykh metallami pervoj grupy. *Vestnik VGU, seriya: fizika. matematika*, 2006, № 2. P. 85-90 (*in Russian*).

Стаття надійшла до редакції 03.02.2021 р.

PACS 81.05.Dz, UDC 621.32; 535. 37

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2021.1.227406>

INCREASING THE PHOTOLUMINESCENCE EFFICIENCY OF CdS NC GROWN IN A GELATINOUS ENVIRONMENT

V. M. Skobeeva¹, V. A. Smyntyna², M. I. Kiose², N. V. Malushin¹

¹Research Institute of Physics of Odesa I. I. Mechnikov National University,
65082, Odesa, street Pasteur, 27, Ukraine

² Odesa I. I. Mechnikov National University, 65082, Odesa, street Dvoryanska, 2, Ukraine

Summary

The aim of this work is to study the technological methods of enhancing the luminescence of NC CdS grown in an aqueous solution of gelatin, both by creating a ZnS shell and by doping. Nanoparticles and nanostructures obtained using sol-gel technology in aqueous gelatin solution were investigated by spectrometry by optical density and luminescence spectra. The optical density spectra of CdS / ZnS nanostructures were differentiated, from which the energy of the band gap of the QD was determined, and the size of nanoparticles was calculated. The thickness of the shell layer, which corresponds to the thickness of one ZnS monolayer, is determined. In the luminescence spectra, a significant increase in the luminous intensity of 2 times the CdS / ZnS nanostructure was revealed. When the luminescence spectra of CdS and CdS / ZnS QDs are decomposed into constituent elementary bands, no new spectral bands are observed in the spectra of the CdS / ZnS nanostructure, which proves the absence of doping of CdS QDs with zinc. The absorption spectra of non-doped and doped CdS NCs coincide, which indicates no change in the size of the NC and the absence of the formation of a compound of lithium with sulfur. Luminescence spectra of lithium-doped QDs show a 3.5-fold increase in luminescence intensity.

Keywords: band gap, sol-gel technology, core-shell nanostructure, optical density, luminescence, impurity doping.

PACS 81.05.Dz, УДК 621.32; 535. 37

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2021.1.227406>

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФОТОЛЮМІНЕСЦЕНЦІЇ НК CdS, ВИРОЩЕНИХ В ЖЕЛАТИНОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ

В. М. Скобеєва¹, В. А. Сминтина², М. І. Кіосе², Н. В. Малушин¹

¹НДІ фізики Одеського національного університету імені І. І. Мечникова,
65082, Одеса, вул. Пастера, 27, Україна

²Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, 65082, Одеса, вул. Дворянська, 2,
Україна

Реферат

Метою даної роботи являться дослідження технологічних способів посилення люмінесценції НК CdS, вирощених у водному розчині желатини, як шляхом створення оболонки ZnS, так і шляхом легування. Наночастинки та наноструктури, що отримані за допомогою

золь-гель технології у водному розчині желатини, досліджувались методами спектрометрії за спектрами оптичної щільності та люмінесценції. Спектри оптичної щільності наноструктур CdS / ZnS були продиференційовані, з яких було визначено енергію ширини забороненої зони КТ, та розраховано розмір наночастинок. Визначено товщину шару оболонки, яка відповідає товщині одного моношару ZnS. У спектрах люмінесценції виявлено значне зростання інтенсивності світіння в 2 рази наноструктури CdS / ZnS. При розкладанні спектрів люмінесценції КТ CdS і CdS / ZnS на складові елементарні смуги, в спектрах наноструктури CdS / ZnS не спостерігаються нові спектральні смуги, що доводить відсутність легування КТ CdS цинком. Спектри поглинання нелегованих і легуваних НК CdS збігаються, що свідчить про відсутність зміни розміру НК та відсутність утворення сполуки літію з сіркою. Спектри люмінесценції КТ, легуваних літієм, демонструють збільшення інтенсивності люмінесценції в 3.5 рази.

Ключові слова: Ширина забороненої зони, золь-гель технологія, наноструктура ядро-оболонка, оптична щільність, люмінесценція, домішкове легування.

БІОСЕНСОРИ

BIOSENSORS

УДК: 543.06 + 577.15 + 543.555

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2021.1.227408>

ВИКОРИСТАННЯ НАНОЧАСТИНОК ЗОЛОТА ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ АНАЛІТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНДУКТОМЕТРИЧНИХ ФЕРМЕНТНИХ БІОСЕНСОРІВ

*О. О. Солдаткін^{1,4}, О. В. Солдаткіна², В. М. Архипова¹, І. І. Пилипонський¹, Л. С. Рєзніченко²,
Т. Г. Грузіна², С. М. Дибкова², С. В. Дзядевич^{1,3}, О. П. Солдаткін^{1,3}*

¹Інститут молекулярної біології і генетики НАН України,
вул. Заболотного 150, Київ, 03143, Україна.

²Інститут біоколоїдної хімії ім. Ф.Д. Овчаренка НАН України,
бульвар Академіка Вернадського, 42, Київ, 03142, Україна

³Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
вул. Володимирська, 64, Київ, 01003, Україна,

⁴Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського", пр-т Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна

e-mail: alex_sold@yahoo.com, olgasoldatkina@yahoo.com, lrieznichenko@gmail.com,
gruzinatamara@gmail.com, sdybkova@gmail.com, dzyad@yahoo.com, a_soldatkin@yahoo.com

ВИКОРИСТАННЯ НАНОЧАСТИНОК ЗОЛОТА ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ АНАЛІТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНДУКТОМЕТРИЧНИХ ФЕРМЕНТНИХ БІОСЕНСОРІВ

*О. О. Солдаткін, О. В. Солдаткіна, В. М. Архипова, І. І. Пилипонський, Л. С. Рєзніченко,
Т. Г. Грузіна, С. М. Дибкова, С. В. Дзядевич, О. П. Солдаткін*

Анотація. В роботі перевірено можливість використання наночастинок золота (НЧЗ) для модернізації біоселективних елементів біосенсорів з метою покращення їхніх аналітичних характеристик. В якості дослідної моделі було використано біоселективні елементи біосенсорів на основі ацетилхолінестерази, бутирилхолінестерази та глюкозооксидази. Іммобілізацію ферментів на поверхнях електрохімічних перетворювачів проводили за рахунок поперечної зшивки молекул відповідних ферментів та бичачого сироваткового альбуміну глутаровим альдегідом. В роботі оптимізували умови іммобілізації ацетилхолінестерази з наночастинка-

© О. О. Солдаткін, О. В. Солдаткіна, В. М. Архипова, І. І. Пилипонський,
Л. С. Рєзніченко, Т. Г. Грузіна, С. М. Дибкова, С. В. Дзядевич, О. П. Солдаткін, 2021

ми золота. Для цього, підбирали оптимальну концентрацію зшиваючого агенту (глутарового альдегіду), тривалість іммобілізації, співвідношення ферменту та НЧЗ, концентрацію та розмір НЧЗ. Досліджено робочі характеристики біосенсорів на основі ферментів і НЧЗ та порівняно їх з характеристиками біосенсорів на основі лише ферментів. Також досліджувався вплив на стабільність біосенсорів при додаванні НЧЗ до біоселективного елементу біосенсорів, а саме відтворюваність безперервної роботи біосенсорів, відтворюваність приготування біосенсорів та їхня стабільність при зберіганні.

Показано, що використання НЧЗ в складі біоселективних елементів може покращити деякі характеристики біосенсорів, що може бути перспективним для їхнього подальшого застосування в біосенсориці.

Ключові слова: біосенсор, фермент, наночастинки золота, ацетилхолінестераза, бутерил-холінестераза, глюкозооксидаза, кондуктометрия, біоселективні елементи.

APPLICATION OF GOLD NANOPARTICLES FOR IMPROVEMENT OF ANALYTICAL CHARACTERISTICS OF CONDUCTOMETRIC ENZYME BIOSENSORS

O. O. Soldatkin, O. V. Soldatkina, V. M. Arkhypova, I. I. Piliponskiy, L. S. Rieznichenko, T. G. Gruzina, S. M. Dybkova, S. V. Dzyadevych, A. P. Soldatkin

Abstract. In this work, the possibility of application of gold nanoparticles for modification of bioselective elements of conductometric biosensors to improve their analytical characteristics has been tested. A bioselective elements of biosensors based on acetylcholinesterase, butyrylcholinesterase and glucose oxidase have been studied as a model of such system. Immobilization of enzymes on the surface of conductometric transducers was carried out by covalent crosslinking of enzymes by using a crosslinking agent (glutaraldehyde). The conditions for immobilization of acetylcholinesterase with gold nanoparticles in BSA membranes were optimized. The optimal concentration of glutaraldehyde, time of immobilization process, ratio of an amount of enzyme and gold nanoparticles, and the concentration and size of gold nanoparticles were selected. The improved characteristics of the developed biosensors based on enzymes and gold nanoparticles were investigated and compared with the characteristics of biosensors based only on enzymes without nanoparticles addition. It was shown, how the addition of gold nanoparticles to the bioselective element of the biosensor affects the stability of biosensors. In particular, the reproducibility of signals during continuous operation of biosensors, the reproducibility of the manufacture of biosensors and their stability during storage were investigated.

Thus, it was shown, that the application of gold nanoparticles in the composition of bioselective elements can improve some characteristics of biosensors, which may be promising for further biosensor application.

Keywords: conductometric biosensor, enzyme, gold nanoparticles, acetylcholinesterase, butyrylcholinesterase, glucose oxidase, bioselective elements.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКИХ ФЕРМЕНТНЫХ БИОСЕНСОРОВ

*А. А. Солдаткин, О. В. Солдаткина, В. Н. Архипова, И. И. Пилипонский, Л. С. Резниченко,
Т. Г. Грузина, С. Н. Дыбкова, С. В. Дзядевич, А. П. Солдаткин*

Аннотация. В работе проверена возможность использования наночастиц золота для модификации биоселективных элементов кондуктометрических биосенсоров для улучшения их аналитических характеристик. В качестве модели исследовались биоселективные элементы биосенсоров на основе ацетилхолинэстеразы, бутирилхолинэстеразы и глюкозооксидазы. Имобилизацию ферментов на поверхности кондуктометрических преобразователей проводили ковалентной сшивкой молекул ферментов с БСА с помощью сшивающего агента (глутарового альдегида). В работе оптимизировали условия имобилизации ацетилхолинэстеразы с наночастицами золота. Для этого подбирали оптимальную концентрацию глутарового альдегида, длительность процесса имобилизации, соотношение количества фермента и наночастиц золота, концентрацию и размер наночастиц золота. Исследовали рабочие характеристики разработанных биосенсоров на основе ферментов и наночастиц золота и сравнивали их с характеристиками биосенсоров на основе только ферментов без использования наночастиц. Изучали влияние на стабильность биосенсоров добавления наночастиц золота в биоселективный элемент биосенсора. В частности, проверяли воспроизводимость сигналов при непрерывной работе биосенсоров, воспроизводимость изготовления биосенсоров и их стабильность при хранении.

Показано, что использование наночастиц золота в составе биоселективных элементов может улучшить некоторые характеристики биосенсоров, что может быть перспективным для дальнейшего изучения и применения.

Ключевые слова: кондуктометрический биосенсор, фермент, наночастицы золота, ацетилхолинэстераза, бутирилхолинэстераза, глюкозооксидаза, биоселективный элемент.

ВСТУП

Розробка нових методів діагностування захворювань людини та сільськогосподарських тварин є надзвичайно актуальним завданням біотехнології. Одним із перспективних підходів є використання нових аналітичних приладів – біосенсорів, технології створення яких об'єднують в собі передові досягнення в галузі біології, фізики, хімії, математики, мікроелектроніки тощо. Одним із варіантів вдосконалення біосенсорних методів діагностики є використання наноматеріалів в складі цих приладів. Останнім часом біосумісні наноматеріали на основі благородних металів, полімерів та вуглецю все більше включаються в склад біосенсорів. При цьому різні наноструктури використовують для підвищення відповідного

аналітичного параметра біосенсора: ефективності роботи, стабільності, чутливості або селективності визначення.

Наночастинки золота (НЧЗ) можуть широко використовуватись в біосенсорах на основі ферментів. НЧЗ є високопровідними та біосумісними, можуть утворювати міцні тілові зв'язки між органічними речовинами (наприклад, залишками цистеїну ферментів) [1]. Таким чином, наночастинки утворюють відповідне мікросередовище для іммобілізації ферменту. Крім того, активність іммобілізованого ферменту може бути збережена шляхом іммобілізації на НЧЗ [2].

На даний момент, в світі вже відомо про розробку низки біосенсорів з використанням НЧЗ [3-5]. Наприклад, дослідники розробили біосенсор для аналізу форменатату (фосфорор-

ганічний пестицид). Для цього використали фермент лакказу, іммобілізовану на золотому електроді, що був попередньо модифікований електрохімічно нанесеними НЧЗ [6]. Аналіз базувався на інгібуванні лактазної активності пестицидом. Біосенсор був успішно застосований для детекції форменатату в плодах. Інший кондуктометричний біосенсор був розроблений для визначення пероксиду водню на основі пероксидази хрону, іммобілізованої в плівці хітозану з НЧЗ діаметром 10 нм [7]. Цікаво, що додавання наночастинок призвело до зменшення чутливості біосенсора, яке було пояснене авторами за рахунок різниці в окислювальних станах НЧЗ та активного центру пероксидази хрону. Відомо також про розробку потенціометричного біосенсора для визначення пестициду гліфосату [8]. Біосенсор був створений на основі уреазу, іммобілізованої з НЧЗ (Ø2,5 нм). Гліфосат інгібував уреазу, що детектувалось за рахунок зменшення сигналу амоній-чутливого електрода. Інший біосенсор розроблявся для визначення активності протейнінази А, він базувався на пероксидазі хрону, антитілах (IgG) та НЧЗ [9]. Використання наночастинок дозволяло зменшити робочий потенціал до 0,08 В.

Зміна діаметру НЧЗ внаслідок їх агрегації, а саме зростання розміру під час синтезу, призводить до зміни оптичних властивостей їхньої суспензії (змінюється адсорбція світла, що супроводжується зміною кольору). Це явище було використано для розробки біосенсора для колориметричного визначення інгібіторів ацетилхолінестерази [10]. За відсутності інгібіторів фермент каталізував розщеплення ацетилтіохоліну до оцтової кислоти та тіохоліну. Тіохолін зменшував концентрацію $AuCl_4^-$, що призводило до збільшення діаметра НЧЗ та зміни кольору суспензії від слаборожевого до фіолетового. У присутності інгібіторів ацетилхолінестерази, у зразку не спостерігалось ні зростання агрегації НЧЗ, ні відповідної зміни кольору розчину.

Зважаючи на позитивний вплив присутності НЧЗ на аналітичні характеристики біосенсорів, було сформульовано мету даної роботи, а саме дослідити вплив наночастинок золота з

розмірами 30 нм та 20 нм на робочі аналітичні характеристики кондуктометричних біосенсорів на основі АцХЕ, БуХЕ та ГОД. Проведення комплексних досліджень щодо розроблення та модифікації біоселективних елементів біосенсорів наночастинами золота дасть відповідь, чи може дана технологія впливати на аналітичні характеристики ферментних біосенсорів для визначення важливих метаболітів.

2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

2.1. Матеріали

В роботі використовували такі ферменти та реактиви: глюкозооксидаза (ГОД) з *Aspergillus niger* (ЕС 1.1.3.4) активністю 272 од.акт./мг (Genzyme, UK); ацетилхолінестераза (АцХЕ) із електричного вугря (ЕС 3.1.1.7) активністю 426 од.акт./мг; бутирилхолінестераза (БуХЕ) із сироватки крові коня (ЕС 3.1.1.8.) активністю 13 од.акт./мг; бичачий сироватковий альбумін (фракція V); 50% водний розчин глутарового альдегіду (ГА); бутирилхолінхлорид, ацетилхолінхлорид фірми „Sigma-Aldrich Chemie” (Німеччина). Наночастинок золота, використані в роботі, синтезували за методом Туркевич-Френса [11-12] у власній модифікації шляхом відновлення золотохлористоводневої кислоти ($\geq 99.9\%$ trace metals basis, Sigma-Aldrich) цитратом натрію у присутності карбонату калію.

Сполуки для приготування буферів та інші неорганічні сполуки, що використовувалися в роботі, були вітчизняного виробництва та мали ступінь чистоти „х.ч.” та „ч.д.а.”.

2.2. Характеризація наночастинок золота

Морфологію синтезованих наночастинок золота визначали методами трансмісійної електронної мікроскопії (JEM-1400 (Jeol, Японія), центр колективного користування НАН України при Інституті мікробіології та вірусології імені Д.К. Заболотного НАН України) та лазерно-кореляційної спектрометрії (Zetasizer-3, “Malvern Instruments Ltd”). Згідно отриманих даних наночастинок мали сферичну форму і середній розмір відповідно 20 і 30 нм (рис. 1).

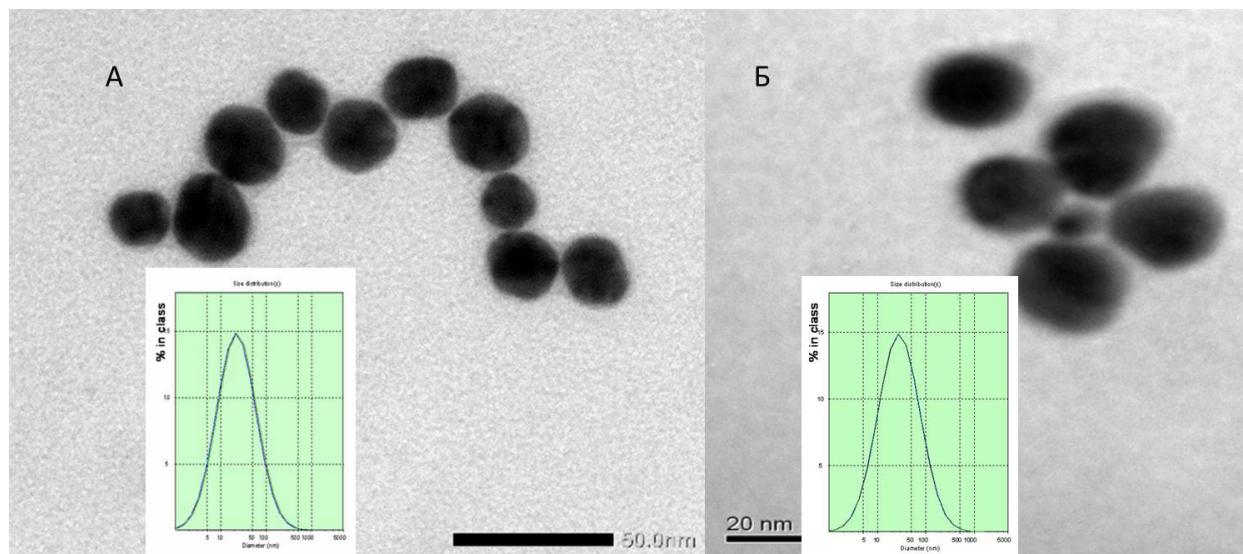


Рис. 1. Електронно-мікроскопічні зображення і розподіл за гідродинамічним діаметром наночастинок золота розміром 20 нм (А) та 30 нм (Б)

2.3. Коїмобілізація ферментів з наночастинками золота в БСА мембрані з використанням розчину глутарового альдегіду

Для виготовлення біоселективних елементів біосенсорів шляхом коїмобілізації наночастинок золота і ферментів, була використана методика іммобілізації в розчині ГА (шляхом ковалентної іммобілізації ферментів і допоміжних речовин на поверхню кондуктометричного перетворювача). Базовий ферментний розчин містив 5% (тут і далі – масова частка) ацетилхолінестерази (або 10% бутирилхолінестерази чи глюкозооксидази), 5 % БСА у 100 мМ фосфатному буфері, рН 7,0.

Для формування біоселективних елементів з використанням наноматеріалів, колоїдний розчин наночастинок золота ($\varnothing 20$ нм та $\varnothing 30$ нм) (концентрація 38,6 мкг/мл) змішували з ферментними розчинами у різних співвідношеннях, а саме 5:1, 3:1, 2:1, 1:1, 1:2, 1:3, 1:5. Потім для формування мембран на поверхні перетворювача, отриману суміш наночастинок з ферментом змішували 1:1 з водним розчином ГА (0,2-1%).

Перед нанесенням ферментних мембран, чутливі ділянки кондуктометричного перетворювача обробляли спиртом за допомогою ватного тампона. Далі їх промивали дистильова-

ною водою, та знову насухо протирали ватним тампоном. Одразу після цього суміш ферменту, наночастинок золота та ГА наносили на робочі поверхні перетворювачів та висувували протягом 40 хв. на повітрі за кімнатної температури. Нанесення мембран відбувалося за допомогою мікродозатора "Eppendorf" 0,1-2,5 мкл. Приблизний об'єм суміші, який необхідно нанести на поверхню перетворювача для формування однієї мембрани складає 0,1 мкл.

Для формування референтних мембран (мембран порівняння), усі процедури з приготування розчинів та нанесення мембран виконувались так само, як і для формування робочих ферментних мембран, але замість ферментів в розчині додавали БСА за тих же самих концентрацій. Після іммобілізації, біосенсори відмивали в робочому буферному розчині від незв'язаних компонентів біомембрани та надлишку глутарового альдегіду.

2.4. Кондуктометричні перетворювачі

При створенні кондуктометричних перетворювачів в якості матеріалу для виготовлення використовуються благородні метали, а для підкладки - непровідні матеріали, а саме скло або кераміка. Матеріал підкладки, як правило, не впливає на чутливість кондуктометричного перетворювача. Кондуктометричні електроди

найчастіше виготовляються фотолітографічним способом після термовакуумного напылення шару золота на підкладку із ситалу [13].

Саме цей підхід був використаний для створення кондуктометричних перетворювачів, використаних в даній роботі. Використовувались перетворювачі, виготовлені згідно наших рекомендацій в Інституті фізики напівпровідників імені В.С. Лашкарьова (м. Київ, Україна). Вони мають розмір 5×30 мм та складаються з двох ідентичних золотих гребінчастих електродів (рис. 2). Кожна така система складається із 20 пар растрових електродів, що мають ширину та зазор між ними 20 мкм із загальною площею чутливої поверхні біля 2 мм^2 .

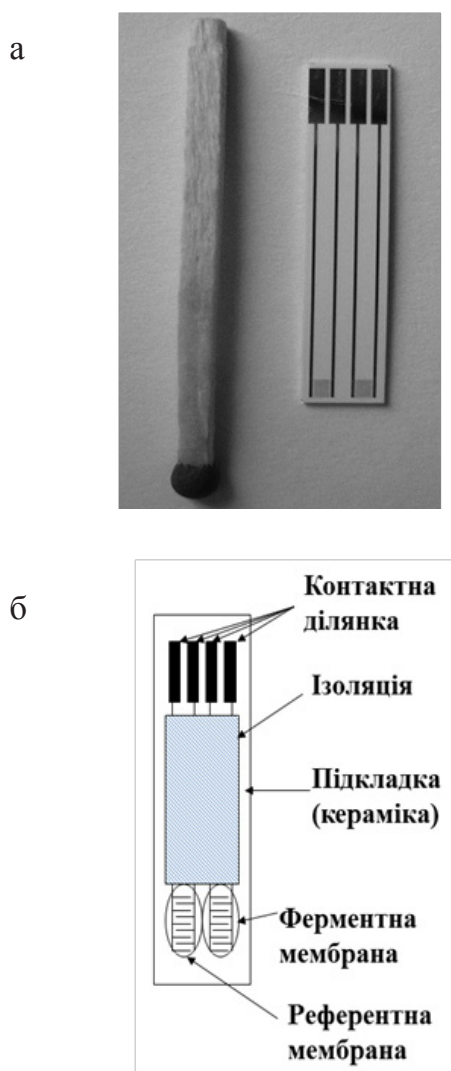


Рис. 2. Зовнішній вигляд (а), та схема будови (б) кондуктометричного перетворювача на основі золотих гребінчастих електродів нанесених на ситалову основу

2.5. Схема експериментальної установки для кондуктометричних вимірювань на основі портативного аналізатора «МСП-3»

На рис. 3 представлено схему експериментальної кондуктометричної установки для проведення біосенсорних вимірювань, де зліва приведено схематичний вигляд самого біосенсора. На одну пару електродів (1) цього біосенсора наносили робочу мембрану на основі ферментів (3). На другу пару електродів (2) наносили референтну мембрану на основі БСА (4). Портативний кондуктометр «МСП-3» (5) був розроблений та виготовлений в Інституті електродинаміки НАН України. Також кондуктометрична схема включала в себе тримач для біосенсора (6) і штатив (7). При проведенні вимірювань на основу штативу встановлюють робочу комірку (8) з досліджуванним розчином (9), а весь сенсорний блок встановлюють на магнітний перемішувачий пристрій (10). Портативний вимірювальний прилад «МСП-3» підключається до електромережі через адаптер мережі живлення (11), до біосенсору - сполучними дротами через контакт (12), а до персонального комп'ютера (13) зі встановленим пакетом відповідного програмного забезпечення - через контакт (14). Вимірювання проводили при частоті струму 37 кГц та амплітуді 14 мВ.

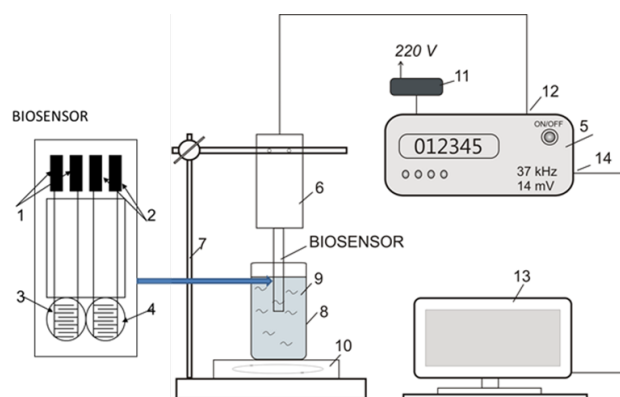


Рис. 3. Схема кондуктометричної установки на основі портативного аналізатора «МСП-3»

2.6. Методика вимірювання

Біосенсор поміщали у робочу комірку об'ємом 2 мл, заповнену буферним розчином. Після отримання стабільного початкового сигналу (базової лінії) в комірку з робочим буфером додавали певну аліквоту вихідного розчину субстрату. Концентрацію субстратів змінювали додаванням до робочого буферу відповідних порцій концентрованих вихідних розчинів субстратів.

Усі дослідження проводилися щонайменше із 3-кратним повторенням. Завдяки використанню диференційного режиму вимірювань, неспецифічних змін вихідного сигналу, пов'язаних зі зміною температурних показників, рН середовища, електричними наводками, не спостерігалось.

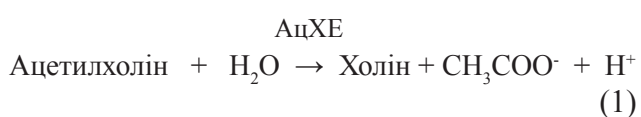
Результати наведено, як середньо квадратичне значення \pm квадратична похибка середнього значення за результатами n незалежних експериментів. Різницю між двома групами оцінювали за допомогою t -тесту Ст'юдента, статистично достовірною вважалася різниця, коли $p \leq 0,05$.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Для дослідження впливу додавання наночастинок золота до біоселективного елементу біосенсора на його функціонування, необхідно перевірити основні аналітичні характеристики біосенсора за традиційної процедури іммобілізації ферментів та з використанням наночастинок.

Відповідно першим етапом даної роботи необхідно було оптимізувати умови іммобілізації АцХЕ з наночастинками, щоб далі порівняти отримані аналітичні характеристики даного біосенсора з біосенсором на основі традиційного методу іммобілізації.

Робота біосенсора на основі АцХЕ ґрунтується на наступній ферментативній реакції:



В процесі проходження ферментативної реакції (1) при каталітичній дії ацетилхолінесте-

рази відбувається розщеплення ацетилхоліну на холін та оцтову кислоту. Оцтова кислота дисоціює на залишок кислоти і протон, при цьому збільшується локальна концентрація іонів в робочій мембрані, що, відповідно, призводить до зміни провідності розчину в приелектродній області, яка реєструється кондуктометричним перетворювачем [14, 15].

В даній роботі іммобілізацію АцХЕ з наночастинками золота на поверхню кондуктометричних перетворювачів проводили в розчині ГА, при цьому глутаровий альдегід утворював ковалентні зв'язки між ферментом та допоміжними речовинами (БСА); під час цього процесу активність ферменту змінювалась, в залежності від концентрації ГА та часу іммобілізації.

Для підбору оптимальної концентрації ГА виготовляли біоселективні елементи з масовою часткою ГА від 0,2% до 1%. Відгуки на субстрат (100 мкМ ацетилхолін) були дуже маленькими за концентрації ГА - 1%. Це пояснюється тим, що залишкова активність ферменту після іммобілізації в присутності високої концентрації ГА була низькою. Втім, за низької концентрації ГА (0,2%) відгуки на ацетилхолін (АцХ) були значно більші, але спостерігалось поступове зменшення цих відгуків біосенсора під час багаторазового використання, обумовлене поступовим вимиванням ферменту з біоселективного елементу. Тому для подальшої роботи було вирішено використовувати концентрацію ГА 0,4% при іммобілізації ферменту в біоселективному елементі біосенсора, за якої відгуки на субстрат були достатньо високі, а швидке зменшення відгуків при безперервній роботі не спостерігалось.

Також було перевірено роботу біосенсора в залежності від тривалості процесу іммобілізації ферменту (створення біоселективного елементу) (від 20 до 40 хвилин). При іммобілізації протягом 20 хв спостерігалось поступове зменшення відгуків впродовж роботи біосенсора, обумовлене недостатньо стійкою іммобілізацією ферменту, а при іммобілізації 40 хв відгуки були менші, ніж в решті випадків, ймовірно через сильне зшивання ферменту. Для подальших іммобілізацій було обрано оптимальний час - 25 хв, за якого відгуки біосенсорів були достатньо великими та стабільними.

Аналітичні характеристики біосенсора також залежать від складу біоселективної мембрани. Цей параметр суттєво впливає на чутливість біосенсора, саме тому необхідно було підібрати оптимальне співвідношення компонентів в біоселективній мембрані. Наступним експериментом був підбір оптимального співвідношення колоїдного розчину наночастинок золота (концентрація 38,6 мкг/мл) з ферментною сумішшю (5% АцХЕ) під час іммобілізації. В результаті було отримано низку біосенсорів на основі різних співвідношень цих двох розчинів (5:1, 3:1, 2:1, 1:1, 1:2, 1:3, 1:5). Перевірялась залежність відгуків біосенсорів від співвідношення АцХЕ та НЧЗ, а саме відгуки біосенсора в стані ферментативного насичення субстратом (2 мМ ацетилхолін) (Рис. 4). Як видно з рисунка, оптимальне співвідношення розчинів фермента і наночастинок золота – 3:1, відповідно.

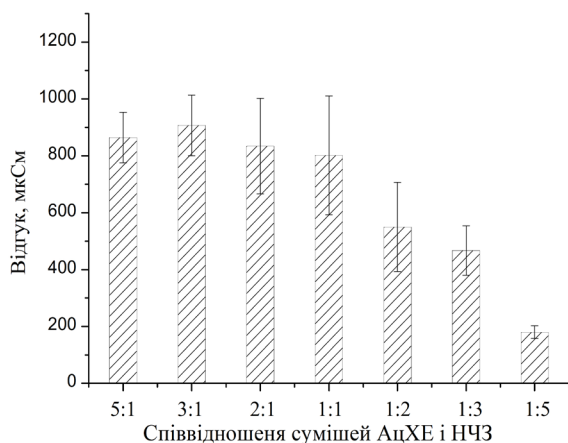


Рис. 4. Відгуки АцХЕ-біосенсорів на основі різних співвідношень фермента і наночастинок золота в біоселективному елементі. Концентрація субстрату - 2 мМ ацетилхоліну

Щоб перевірити вплив різних концентрацій НЧЗ на характеристики біосенсорів, було створено групу біосенсорів на основі АцХЕ та НЧЗ (30 нм) за їх різноманітних концентрацій в біоселективних мембранах. Для кожного з цієї групи біосенсорів було отримано кілька відгуків на концентрації АцХ, що лежать на лінійній частині калібрувальних кривих АцХЕ-біосенсора (рис. 5), за якими можна охарактере-

ризувати чутливість біосенсора. Аналізуючи отримані результати (табл. 1) видно, що при концентрації НЧЗ 38,6 мкг/мл та 19,3 мкг/мл відгуки біосенсорів практично не змінювались порівняно з біосенсором на основі лише 9,65 мкг/мл.

Таблиця 1

Порівняння чутливості АцХЕ-біосенсорів на основі різних концентрацій наночастинок золота до субстрату

Концентрація субстрату у вимірювальній комірці	Сигнали біосенсорів на основі АцХЕ з 30 нм НЧЗ різної концентрації		
	38,6 мкг/мл	19,3 мкг/мл	9,65 мкг/мл
0,1 мМ АцХ	149	139	102
0,2 мМ АцХ	297	265	196
0,5 мМ АцХ	701	638	457

Для аналізу впливу наночастинок золота на іммобілізацію біологічного матеріалу та функціонування біосенсорів, необхідно було порівняти основні характеристики біосенсорів з та без додавання наночастинок золота $\varnothing 20$ нм та 30 нм. Для кращого порівняння у всіх варіантах іммобілізації було використано однакову кількість ферменту.

За результатами досліджень побудовано калібрувальні графіки для кожного типу біосенсора (Рис.5).

За отриманими калібрувальними кривими видно, що найкращою чутливістю до субстрату (АцХ) характеризувались біосенсори на основі наночастинок золота 30 нм. Але лінійний діапазон роботи був кращим для біосенсора на основі традиційної методики іммобілізації без наночастинок. Окрім самих калібрувальних кривих для аналізу шуму, дрейфу та мінімальної границі визначення оцінювали параметри реальних відгуків біосенсорів на різні концентрації АцХ. Вплив на такі важливі аналітичні характеристики біосенсора, як чутливість, мінімальна границя визначення, лінійний діапазон роботи, шум та дрейф базової лінії, було скомпоновано в таблиці 2 для усіх варіантів біосенсорів.

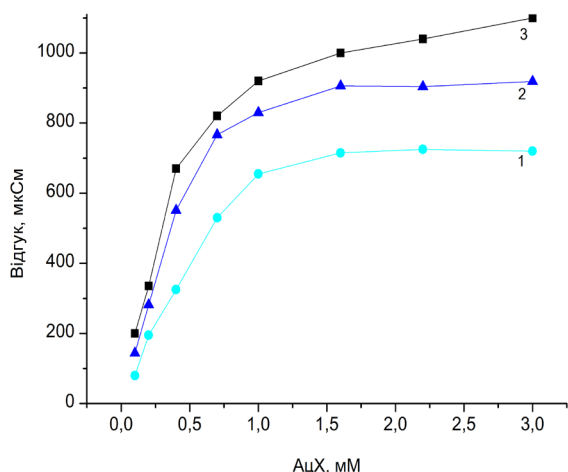


Рис. 5. Калібрувальні криві біосенсора на основі ацетилхолінестерази без використання наночастинок (крива 1), з наночастинами золота 20 нм (крива 2) та з наночастками золота 30 нм (крива 3)

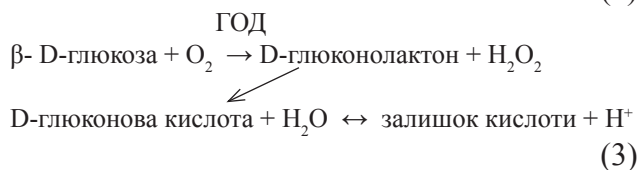
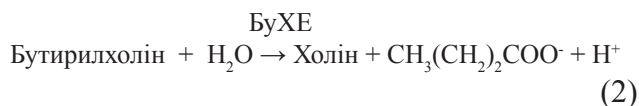
Таблиця 2

Порівняння характеристик біосенсорів на основі різних варіантів іммобілізації

Характеристики біосенсорів	Варіанти іммобілізації		
	в краплі ГА без НЧЗ	в краплі ГА з НЧЗ (30 нм)	в краплі ГА з НЧЗ (20 нм)
Чутливість, мкСм/мМ	783	1835	1354
Мінімальна границя визначення, мкМ	2,0	1,0	1,5
Лінійний діапазон роботи, мМ	до 0,7	до 0,4	до 0,4
Дрейф, мкСм /хв	12,3	12,1	15,3
Шум, мкСм	5,2	6,1	6,8

Отже, було показано, що цілком можливим та перспективним є створення біосенсорів шляхом коіммобілізації ферменту з НЧЗ, причому даний варіант іммобілізації не поступався за ефективністю поширеній методиці іммобілізації АцХЕ в розчині ГА.

Метою наступного етапу роботи було показати, чи ці ж НЧЗ (30 нм) можуть бути використані і для іммобілізації інших часто використовуваних в біосенсоріці ферментів – бутирилхолінестерази (БуХЕ) та глюкозооксидази (ГОД). Ці ферменти каталізують перетворення бутирилхоліну (БуХ) (2) та глюкози (3):



В даних реакціях відбувається утворення іонів, які призводять до зміни провідності розчину, що може реєструватись кондуктометричним перетворювачем [14, 15].

Ми використали для іммобілізації НЧЗ з розміром частинок 30 нм, оскільки в попередній частині роботи саме вони показали найкращі результати при розробці АцХЕ-біосенсорів. Отримані калібрувальні криві біосенсорів на основі коіммобілізації ферментів (БуХЕ та ГОД) з НЧЗ було порівняно з калібрувальними кривими біосенсорів на основі традиційної іммобілізації в розчині глутарового альдегіду (рис. 6). Виявилось що використання НЧЗ в складі БуХЕ-біосенсора позитивно вплинуло на чутливість даного біосенсора до БуХ (рис. 6а). Біосенсори на основі ГОД з НЧЗ, були придатні до використання, хоча, як видно з рисунку 6б, вони мали трошки вузький лінійний діапазон роботи, а чутливість до глюкози була практично однаковою з біосенсорами на основі лише ГОД.

Ще однією з важливих характеристик біосенсорів є відтворюваність роботи біосенсорів. Щоб дослідити, як наявність НЧЗ у мембрані біосенсора впливає на цей показник, ми протягом одного робочого дня з інтервалом 40 хвилин отримували відгуки біосенсорів на основі різних ферментів (АцХЕ, БуХЕ та ГОД) з та без НЧЗ на 1 мМ концентрацію відповідного субстрату. При цьому всі варіанти біосенсорів, що тестувались, весь час між вимірюваннями залишались у робочому буферному розчині за

кімнатної температури. Для порівняння було пораховано середньоквадратичну похибку вимірювань. Як видно з рис. 7, усі біосенсори на основі різних ферментів з/без НЧЗ при квазі-безперервній роботі протягом дня характери-

зувалися високою відтворюваністю сигналів. Відповідно додавання до біоселективних елементів НЧЗ майже не вплинуло на стабільність роботи біосенсорів.

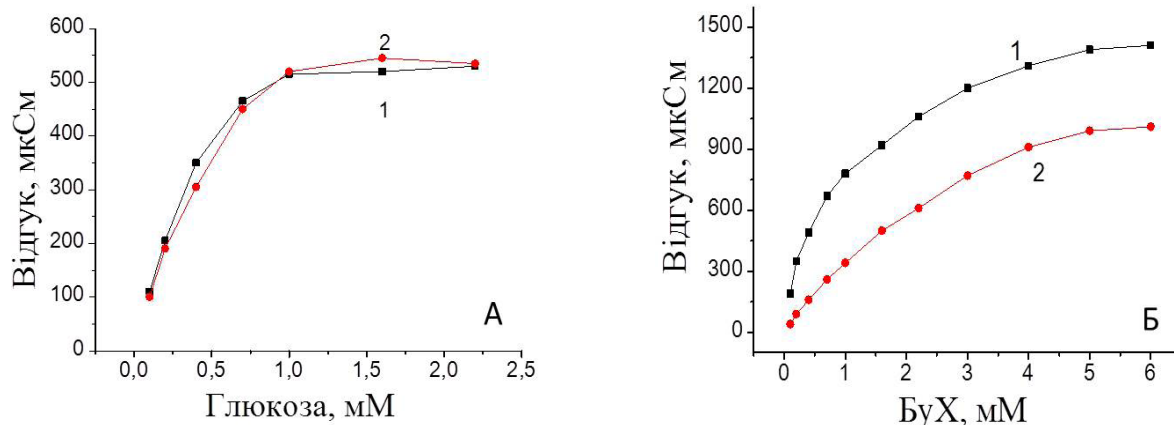


Рис. 6. Калібрувальні криві біосенсора на основі глюкозооксидази (а) та бутирилхолінестерази (б) без наночастинок (1) та з 30 нм НЧЗ (2)

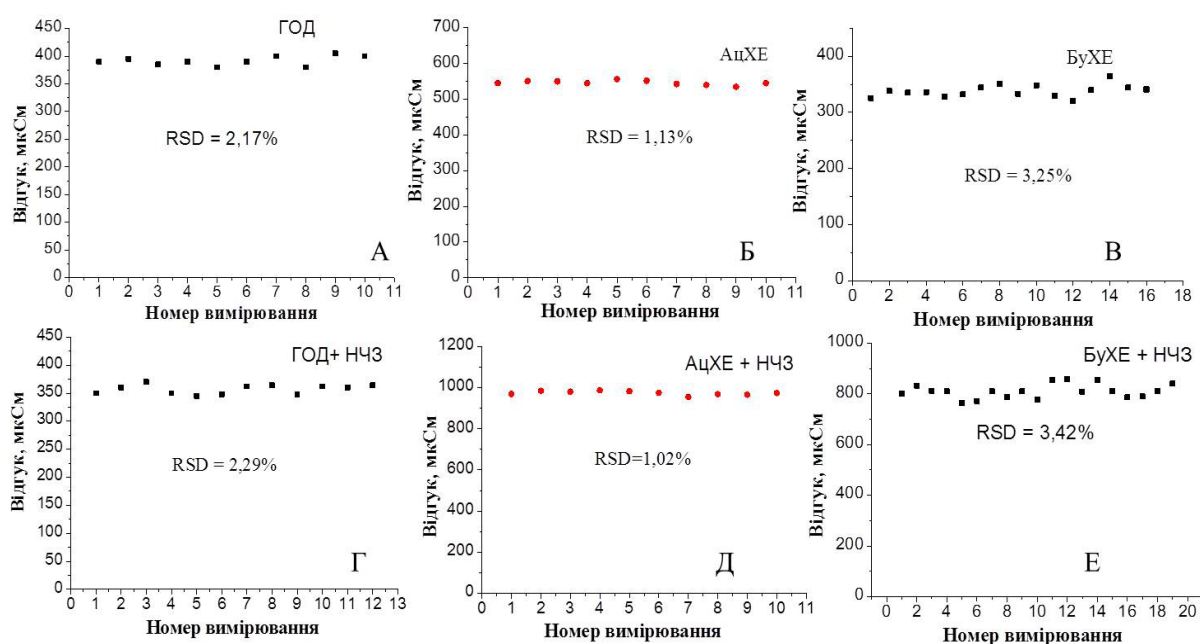


Рис. 7. Відтворюваність сигналів біосенсорів на основі різних ферментних систем: ГОД (а), АцХЕ (б), БуХЕ (в), ГОД + НЧЗ (г), АцХЕ + НЧЗ (д), БуХЕ + НЧЗ (е) протягом одного робочого дня. Концентрація субстратів – 1 мМ

Важливою характеристикою будь-якого біосенсора є відтворюваність його приготування (інтер-відтворюваність відгуків), вона відображається у середньоквадратичному відхиленні відгуків біосенсорів, отриманих при різних варіантах іммобілізації ферменту в складі біоселективного елементу на поверхню одного й того ж перетворювача. Цей параметр особливо важливий при виробництві великих партій біосенсорів у промислових умовах, а при лабораторній розробці біосенсорів ним часто нехтують. Так, при кількох іммобілізаціях ферментів у плутаровому альдегіді спостерігається значна розбіжність відгуків біосенсора, яка обумовлена як людським фактором (оскільки саме дослідник наносить шар розчину ферментів, з якого буде формуватись чутлива мембрана), так і випадковими змінами в умовах іммобілізації. Щоб довести, що додавання НЧЗ до біоселективних елементів негативно не впливає на характеристики біосенсорів, була проведена перевірка відтворюваності приготування біосенсорів на основі різних ферментів з/без НЧЗ. Пораховано середньоквадратичне від-

хилення відгуків біосенсорів при різних варіантах іммобілізації ферментів з/без НЧЗ (рис. 8). Як і очікувалось, іммобілізація ферментів за наявності НЧЗ була не гіршою, а для АцХЕ та БуХЕ навіть трошки кращою, що є ще однією перевагою даного методу іммобілізації ферментів (методу створення біоселективного елементу біосенсора).

Далі було проведено ряд дослідів по вивченню стабільності біосенсорів на основі різних варіантів іммобілізації ферментів з/без НЧЗ при зберіганні. Біосенсори зберігались в сухих умовах при температурі +4°C. Активність біоселективних елементів на основі ГОД та АцХЕ, в склад яких входили НЧЗ залишалась стабільною щонайменше 7 діб (втрата активності до 7 %). За той же час зберігання, до 9 % активності втратили біосенсори на основі лише ферментів (без використання наночастинок). Гірша ситуація склалась з біосенсорами на основі БуХЕ з та без НЧЗ, вони за 7 діб втратили більше 20 % активності.

Відповідно отримані результати, по перевірці впливу додавання НЧЗ в біоселективний

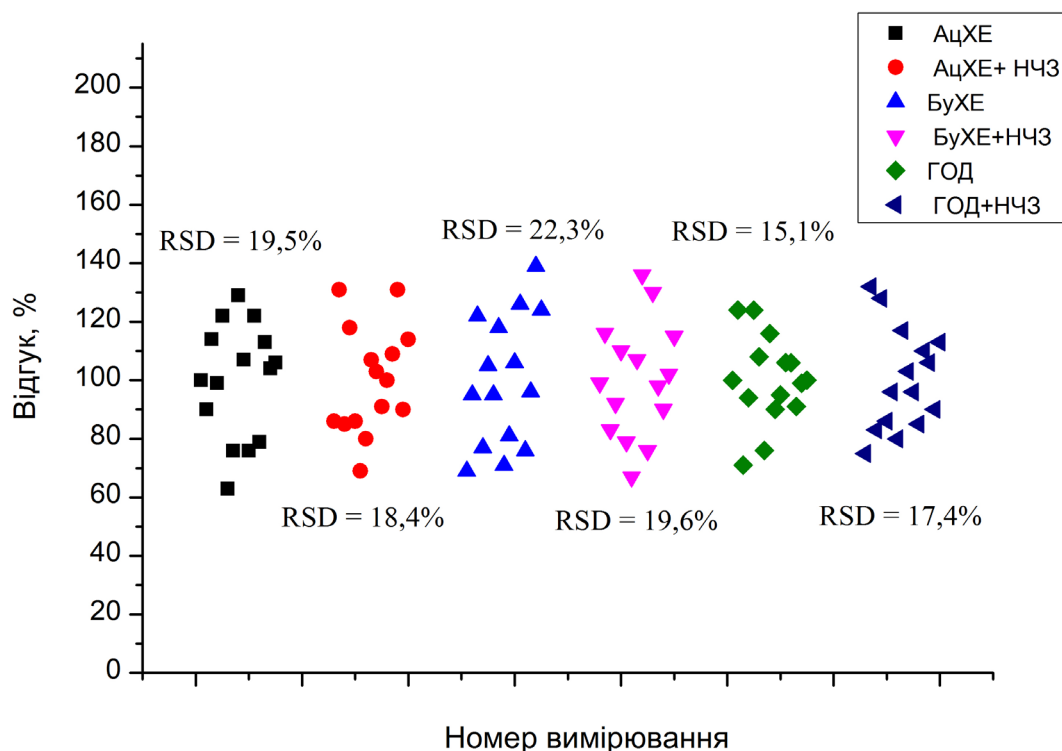


Рис. 8. Відтворюваність відгуків біосенсорів від різних іммобілізації без та з додаванням НЧЗ у біоселективну мембрану. Концентрація субстратів – 1 мМ

елемент біосенсора, свідчать про перспективність роботи в даному напрямку. Застосування запропонованої методики іммобілізації щонайменше покращило чутливість АцХЕ- та БуХЕ-біосенсорів і негативно не вплинуло на інші характеристики.

4. ВИСНОВКИ

В роботі було досліджено перспективність застосування наночастинок золота для модифікації кондуктометричних ферментних біосенсорів з метою покращення їхніх аналітичних характеристик. Проведено оптимізацію умов коіммобілізації ферменту з НЧЗ, підбрано оптимальну концентрацію глютарового альдегіду – 0,4% та тривалість іммобілізації – 25 хв (іммобілізація АцХЕ з НЧЗ). Вибрано найкраще співвідношення сумішей ферменту (5-10 %) та НЧЗ 30 нм (38,6 мкг/мл) при нанесенні мембран на перетворювач - 3:1, відповідно. Досліджено вплив концентрації НЧЗ та діаметру наночастинок на чутливість біосенсора.

Аналітичні характеристики біосенсорів на основі ферментів та НЧЗ було порівняно з характеристиками біосенсора на основі лише одних ферментів. Показано, що відтворюваність відгуків за безперервної роботи та стабільність приготування біосенсорів на основі наночастинок не гірша ніж у біосенсорів на основі лише ферментів (без НЧЗ). Також порівняно стабільність при зберіганні обох варіантів біосенсорів на основі різних ферментів. Усі біосенсори на основі коіммобілізації ферментів з НЧЗ зберегались трошки краще за біосенсори на основі тих же ферментів без НЧЗ.

Доведено, що додавання НЧЗ до біоселективних елементів може покращити чутливість біосенсорів та інші параметри, що є позитивним результатом даної роботи.

5. ПОДЯКА

Робота була проведена завдяки фінансовій підтримці від Національного фонду досліджень України в рамках конкурсу проєктів із виконання наукових досліджень і розробок “Підтримка досліджень провідних та молодих учених” (проєкт 2020.02/0097) та НАН Укра-

їни в рамках цільової програми наукових досліджень НАН України ««Розумні» сенсорні прилади нового покоління на основі сучасних матеріалів та технологій».

Список використаної літератури

- [1]. K. Kerman, M. Saito, E. Tamiya, S. Yamamura and Y. Takamura, Nanomaterial-based electrochemical biosensors for medical applications. *TrAC - Trends Anal. Chem.*, 2008, 27, 585–592.
- [2]. J. A. Hondred, J. C. Breger, N. T. Garland, E. Oh, K. Susumu, S. A. Walper, I. L. Medintz and J. C. Claussen, Enhanced enzymatic activity from phosphotriesterase trimer gold nanoparticle bioconjugates for pesticide detection. *Analyst*, 2017, 142, 3261–3271.
- [3]. X. Yang, M. Feng, J. Xia, F. Zhang, Z. Wang An electrochemical biosensor based on AuNPs/Ti3C2 MXene three-dimensional nanocomposite for microRNA-155 detection by exonuclease III-aided cascade target recycling, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2020, 878, 114669
- [4]. L. Jia, Y. Zhou, K. Wu, Q. Feng, Ch. Wang, P. He, Acetylcholinesterase modified AuNPs-MoS₂-rGO/PI flexible film biosensor: Towards efficient fabrication and application in paraoxon detection, *Bioelectrochemistry*, 2019, 131, 107392
- [5]. Y. Zhang, X. Li, D. Li, Q. Wei, A laccase based biosensor on AuNPs-MoS₂ modified glassy carbon electrode for catechol detection *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2020, 186, 110683
- [6]. F. W. P. Ribeiro, M. F. Barroso, S. Morais, S. Viswanathan, P. de Lima-Neto, A. N. Correia, M. B. P. P. Oliveira and C. Delerue-Matos, Simple laccase-based biosensor for formetanate hydrochloride quantification in fruits. *Bioelectrochemistry*, 2014, 95, 7–14.
- [7]. G. A. Valencia, L. C. de Oliveira Vercik and A. Vercik, A new conductometric biosensor based on horseradish peroxidase immobilized on chitosan and chitosan/gold nanoparticle films. *J. Polym. Eng.*, 2014, 34(7), 633–638.
- [8]. C. Vaghela, M. Kulkarni, S. Haram, R. Aiyer and M. Karve, A novel inhibition based biosensor using urease nanoconjugate entrapped

biocomposite membrane for potentiometric glyphosate detection. *Int. J. Biol. Macromol.*, 2018, 108, 32–40.

[9]. Y. Zhou, M. Wang, H. Yin and S. Ai, Amperometric determination of the activity of protein kinase a using a glassy carbon electrode modified with IgG functionalized gold nanoparticles conjugated to horseradish peroxidase. *Microchim. Acta*, 2017, 184, 3301–3308.

[10]. V. Pavlov, Y. Xiao and I. Willner, Inhibition of the Acetylcholine esterase-stimulated growth of au nanoparticles: nanotechnology-based sensing of nerve gases. *Nano Lett.*, 2005, 5, 649–653.

[11]. Frens G, Controlled nucleation for the regulation of the particle size in monodisperse gold suspensions, *Nature Physical Science*, 1973, 241, 20–22.

[12]. Turkevich, J., Hillier, J., Stevenson, P. C., A study of the nucleation and growth processes in the synthesis of colloidal gold. *Disc. Farad. Soc.*, 1951, 11, 55.

[13]. Dzyadevych S. V., *Konduktometrychni fermentni biosensory: teoriia, tekhnolohiia, zastosuvannia. Biopolimery i klityna*. 2005, 21, 91–106 (in Ukrainian).

[14]. Jaffrezic-Renault N., Dzyadevych S.V., Conductometric microbiosensors for environmental monitoring, *Sensors* 2008, 8, 2569–2588.

[15]. Soldatkin O. O., Sosovska O. F., Benilova I. V. ta in., Enzymnyi konduktometrychnyi sensor dlia vyznachennia kontsentratsii formaldehidu u modelnykh zrazkakh *Biopolimery i klityna* 2005, 21, 425–432 (in Ukrainian).

Стаття надійшла до редакції 24.02.2021 р.

UDC 543.06 + 577.15 + 543.555

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2021.1.227408>

APPLICATION OF GOLD NANOPARTICLES FOR IMPROVEMENT OF ANALYTICAL CHARACTERISTICS OF CONDUCTOMETRIC ENZYME BIOSENSORS

O. O. Soldatkin^{1,4}, O. V. Soldatkina², V. M. Arkhypova¹, I. I. Piliponskiy¹, L. S. Rieznichenko², T. G. Gruzina², S. M. Dybkova², S. V. Dzyadevych^{1,3}, A. P. Soldatkin^{1,3}

¹Institute of Molecular Biology and Genetics of NAS of Ukraine.
Zabolotnogo Str., 150, Kyiv-03143, Ukraine.

²F.D. Ovcharenko Institute of Biocolloidal Chemistry NAS of Ukraine.
Vernadskogo Ave, 42, Kyiv, 03142, Ukraine.

³Taras Shevchenko National University of Kyiv.
Volodymyrska Street, 64/13. Kyiv- 01601, Ukraine.

⁴National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,
Prosp.Peremohy, 37, Kyiv-03056, Ukraine.

Summary

Gold nanoparticles are perspective materials for using in biosensorics. It is a bio-intelligent material that can fix the metabolic links between organic substances (for example, cysteine residues of enzymes). These nanoparticles formulate a kind of microenvironment for immobilization of the enzyme during biosensor development. Also the activity of the immobilized enzyme can be saved by using of immobilization on gold nanoparticles.

The aim of the work was to study the influence of gold nanoparticles on the analytical characteristics of conductometric enzyme biosensors.

Methods: The conductometric method of analysis has been used. Two pairs of gold interdigitated electrodes deposited on a sital substrate were used as a conductometric transducer. For bioselective

elements formation, the following enzymes: acetylcholinesterase, buterylcholinesterase and glucose oxidase were used. Enzymes and gold nanoparticles are coimmobilized by crosslinking of glutaraldehyde on transducers surface.

Results: In this work, the conditions of immobilization of the enzyme with gold nanoparticles were optimized. It was selected the optimal concentration of the cross-linking agent (glutaraldehyde), duration of the immobilization, enzyme/gold nanoparticles ratio, and the concentration and size of gold nanoparticles. The work characteristics of biosensors based on enzymes and gold nanoparticles were compared to the same characteristics of biosensors based on enzymes only. It was investigated the influence of the addition of gold nanoparticles to the bioselective element of biosensors on their stability. It was checked reproducibility of uninterrupted biosensors work, the reproducibility of preparing biosensors, and the stability of the biosensors.

Conclusions: Application of gold nanoparticles in bioselective elements can improve some characteristics of biosensors, which may be promising for further study and use.

Keywords: conductometric biosensor biosensor, enzyme, gold nanoparticles, acetylcholinesterase, buterylcholinesterase, glucose oxidase, bioselective elements.

УДК: 543.06 + 577.15 + 543.555

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2021.1.227408>

ВИКОРИСТАННЯ НАНОЧАСТИНОК ЗОЛОТА ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ АНАЛІТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНДУКТОМЕТРИЧНИХ ФЕРМЕНТНИХ БІОСЕНСОРІВ

*О. О. Солдаткін^{1,4}, О. В. Солдаткіна², В. М. Архипова¹, І. І. Пилипонський¹, Л. С. Резніченко²,
Т. Г. Грузіна², С. М. Дибкова², С. В. Дзядевич^{1,3}, О. П. Солдаткін^{1,3}*

¹Інститут молекулярної біології і генетики НАН України,
вул. Заболотного 150, Київ, 03143, Україна.

²Інститут біоколоїдної хімії ім. Ф.Д. Овчаренка НАН України,
бульвар Академіка Вернадського, 42, Київ, 03142, Україна

³Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
вул. Володимирська, 64, Київ, 01003, Україна,

⁴Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського», пр-т Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна

Реферат

Наночастинки золота є перспективним матеріалом для використання в біосенсоріці. Вони є біосумісними і можуть утворювати міцні тілові зв'язки між органічними речовинами (наприклад, залишками цистеїну ферментів). Під час приготування біосенсорів, наночастинки утворюють відповідне мікросередовище для іммобілізації ферменту. Також, активність іммобілізованого ферменту може бути збережена шляхом іммобілізації на золотих наночастинках.

Метою даної роботи було дослідити вплив наночастинок золота на аналітичні характеристики кондуктометричних ферментних біосенсорів.

Методи дослідження: В роботі використовували кондуктометричний метод аналізу. Як кондуктометричні перетворювачі використовували золоті гребінчасті електроди, нанесені на підкладку з ситалу. Під час роботи кондуктометричного перетворювача застосовувався дифе-

ренційний режим вимірювання. Для створення біоселективних елементів біосенсорів використовували ферменти: ацетилхолінестераза, бутирилхолінестераза та глюкозооксидаза. Ферменти та наночастинки золота було коїмобілізовано ковалентною зшивкою глутаровим альдегідом на поверхні перетворювачів.

Результати дослідження: В роботі оптимізували умови іммобілізації ферменту з наночастинками золота. Підбрано оптимальну концентрацію зшиваючого агенту, тривалість іммобілізації, співвідношення ферменту та НЧЗ, концентрацію та розмір НЧЗ. Досліджено робочі характеристики біосенсорів на основі ферментів і НЧЗ та порівняно їхні з характеристиками біосенсорів на основі лише ферментів. Також досліджувалось, як додавання НЧЗ до біоселективного елементу біосенсорів впливає на стабільність біосенсорів. Перевірено відтворюваність безперервної роботи біосенсорів, відтворюваність приготування біосенсорів та їх стабільність при зберіганні.

Висновки: Використання НЧЗ в складі біоселективних елементів може покращити деякі характеристики біосенсорів, що є перспективним для подальшого вивчення та використання.

Ключові слова: біосенсор, фермент, наночастинки золота, ацетилхолінестераза, бутирилхолінестераза, глюкозооксидаза, кондуктометрія, біоселективні елементи.

СЕНСОРИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ

SENSORS AND INFORMATION SYSTEMS

UDC 528.021.7:681.78

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2021.1.227414>

УСТАНОВКА ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЛАЗЕРНОЇ ЛОКАЦІЇ

В. І. Сантоній, Я. І. Лепіх, В. В. Янко, Л. М. Будіянська, І. О. Іванченко, А. П. Балабан

Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр МОН і НАН України
при ОНУ імені І. І. Мечникова, вул. Дворянська, 2, 65082, Одеса,
e-mail: ndl_lepikh@onu.edu.ua

УСТАНОВКА ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЛАЗЕРНОЇ ЛОКАЦІЇ

В. І. Сантоній, Я. І. Лепіх, В. В. Янко, Л. М. Будіянська, І. О. Іванченко, А. П. Балабан

Анотація. Розроблено установку фізичного моделювання процесів лазерної локації з урахуванням аерозольних завадових явищ природного і штучного походження та активного фонового засвічення. Установка моделює процеси виявлення і розпізнавання об'єкта лазерною інформаційно-вимірною системою (ЛІВС) в умовах зовнішніх дестабілізуючих чинників та перешкод в атмосферному каналі.

Ключові слова: фізичне моделювання, лазерна інформаційно-вимірною системою, атмосферний канал, об'єкт, дестабілізуючі чинники.

INSTALLATION FOR PHYSICAL SIMULATION OF LASER LOCATION PROCESSES

V. I. Santoniy, Ya. I. Lepikh, V. V. Yanko, L. M. Budiynskaya, I. A. Ivanchenko, A. P. Balaban

Abstract. A device for physical modeling of laser ranging processes has been developed, taking into account aerosol interference phenomena of natural and artificial origin and active background illumination. The installation simulates the processes of object detection and recognition by a laser information-measuring system (LIMS) under conditions of external destabilizing factors and obstacles in the atmospheric channel.

Keywords: physical modeling, laser information-measuring system, atmospheric channel, object, destabilizing factors.

УСТАНОВКА ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ

В. И. Сантоний, Я. И. Лепих, В. В. Янко, Л. М. Будиянская, И. А. Иванченко, А. П. Балабан

Аннотация. Разработана установка физического моделирования процессов лазерной локации с учетом аэрозольных помеховых явлений природного и искусственного происхождения и активной фоновой засветки. Установка моделирует процессы обнаружения и распознавания объекта лазерной информационно-измерительной системой (ЛИВС) в условиях внешних дестабилизирующих факторов и препятствий в атмосферном канале.

Ключевые слова: физическое моделирование, лазерная информационно-измерительная система, атмосферный канал, объект, дестабилизирующие факторы

Мета - розробка та створення інформаційно-вимірювальної установки для встановлення порогової чутливості, ймовірності та граничної точності безконтактного високоточного виявлення, а також вимірювання дальності до об'єкта високоточною локаційною ЛІВС в умовах завод різного типу та дестабілізуючих чинників методами оптичної локації.

Вступ

Проведення натурних вимірювань виявлення в умовах різних завод природного та штучного походження для різних цілей являє собою дуже складне і занадто затратне та коштовне завдання. На сучасному етапі є неоднозначний опис як вхідних, так і вихідних сигналів з використанням різних фізико-математичних підходів [1]. Установка створена для дослідження можливостей і ефективності роботи ЛІВС в складі системи виявлення і розпізнавання об'єктів, з урахуванням параметрів зондуючого пучка, відбивних характеристик поверхні та впливу атмосфери з дрібнодисперсними включеннями і іншими факторами навколишнього середовища. Необхідним є визначення ефективності ЛІВС при аналізі відбитих від об'єкта сигналів, що приймає фотоприймальний пристрій. Аналізуючи адитивну суміш сигналу від об'єкту та заводових складових ЛІВС проводить високоточне вимірювання параметрів за рахунок удосконалення методів обробки сигналів оптико-електронної системи. У розробленій установці використані взаємно доповнюючі методи фізичного і математичного

модельовання відбивних властивостей об'єктів. В ЛІВС опромінення об'єкту нестационарно, тому що використовуються короткі зондуючі імпульси, що дозволяє досягати високої роздільної здатності локаційної системи, але робить невідомими форму і тривалість відбитих від об'єктів імпульсів, що виключає класичну узгоджену фільтрацію сигналів. Суть активної лазерної локації полягає в отриманні інформації про об'єкт локації (цілі) по відбитому сигналу зондуючого випромінювання. Для раціонального проектування ЛІВС і оцінки їх можливостей необхідно:

- вивчення закономірностей проходження, поглинання і розсіяння оптичного випромінювання на шляху джерело-середовище-об'єкт-середовище-фотоприймач і формування реєстрованих приймальною системою сигналів, створених відбитим від об'єктів і фонів (поверхонь, ландшафтних утворень, середовища) випромінюванням;

- отримання даних про перешкоди для заданих умов локації, виявлення і оцінки інформативності характерних ознак об'єктів і фонів (завод);

- оптимізації формування полів зондуючого і прийому (обробки) відбитого випромінювання на тлі шумів і перешкод;

- виявлення, вимірювання параметрів і розпізнавання об'єктів вимагає досить повного і адекватного реальним умовам локації опису відбитих від об'єктів і фонів сигналів.

Наявні в літературі дані по відбивним характеристикам об'єктів і фонів з урахуванням умов лазерної локації відносяться в основному

до інтегральних амплітудних характеристик на довжинах хвиль видимого та ближнього інфрачервоного діапазону [2] і однопозиційних умов локації. Однак, навіть таких відомостей по амплітудним, а також часовим, просторовим і іншим відбивним характеристикам об'єктів і фонів для всього різноманіття параметрів систем і умов локації недостатньо [3, 4]. При цьому експериментальні дані, отримані, як правило, розробниками систем в процесі їх випробувань, не завжди методично і метрологічно обґрунтовано. Відомі математичні моделі не забезпечують прийнятну точність визначення відбивних характеристик об'єктів і фонів складної конфігурації з направлено - розсіючими і бликуючими (дзеркальними) покриттями [5, 6]. Відмінні ознаки об'єктів і фонів, що містяться в реалізаціях реєстрованих сигналів і перешкод, покладаються в основу рішення локаційних завдань, визначають структуру, правила прийняття рішення та вихідні характеристики систем [7, 8].

Виявлення характерних ознак об'єктів і фонів в реєстрованих сигналах та оцінка їх інформативності необхідне для забезпечення вирішення завдань виявлення, вимірювання і розпізнавання з максимальною ефективністю в заданих умовах застосування [9, 10]. Дослідження в забезпеченні вирішення зазначених проблем, незважаючи на їх актуальність і практичну значимість, не знайшли в літературі досить повного висвітлення [11, 12].

Проведено аналіз можливих експериментальних і розрахункових методів досліджень відбивних об'єктів, визначена їх узагальнена структура і фізичні аспекти, які повинні бути враховані при моделювальних і натурних дослідженнях для отримання на їх основі сигналів, адекватних реальним умовам локації [13, 14].

Важливо застосування сучасних цифрових систем керування технологічними процесами випробувань, потужних вимірювально-обчислювальних комплексів обробки та отримання інформаційних даних, що дозволяють скоротити загальну тривалість експериментального відпрацювання ЛІВС, більш точно відтворювати реальні умови і підвищити якість створюваних систем [15].

Результати розробки і їх обговорення

Розроблена установка для досліджень ЛІВС основних характеристик – точність і завадозахист оптико-електронних систем, що функціонують в умовах рухливих світлових завод. Установка являє собою по суті автоматизоване робоче місце, яке дозволяє здійснювати функції відтворення фоноцільової та заводої обстановки, а також умов поширення оптичного випромінювання і впливу на ЛІВС наступних штучних перешкод:

- маскуючих, що знижують потужність лазерного випромінювання;
- імітуючих, що створюють помилковий об'єкт, що дезінформує;
- потужне фонове засвічення фотоприймального пристрою лазерним випромінюванням імітатора перешкоди.

Установка включає наступні елементи: первинні перетворювачі, апаратура реєстрації і аналізу; система управління; джерела живлення, об'єкт випробування, контрольно-вимірювальна апаратура; апаратура перевірки функціонування випробуваного об'єкта; допоміжні пристрої і пристосування. Установка використовується для створення нових технічних рішень і розробки алгоритмів при створенні ЛІВС.

Моделювання роботи ЛІВС демонструє їх стійкість до збурень, працездатність в різний час доби, в складних метеоумовах, а також можливість селекції імпульсів випромінювання від помилкових об'єктів, володіти ступенем адаптації до умов фоноцільової ситуації. Тому при проектуванні і дослідженні перспективних ЛІВС велику роль відіграють методи імітаційного моделювання, які дозволяють відтворити процес функціонування системи і визначити її ймовірно - часові характеристики.

При проектуванні ЛІВС особлива увага приділялася заводостійкості. Для повноцінного дослідження різних характеристик ЛІВС методом імітаційного моделювання проводилися експерименти в умовах максимально наближених до реальності.

При різних видах випробувань установка дозволяє методом напівнатурного моделювання проводити оцінку заводостійкості та точнос-

ті вимірювань ЛІВС в складних атмосферних умовах (туман, дощ, задимлення, входження в хмарність), коли необхідно боротися з завадами зворотного розсіювання при відсутності апріорної інформації про характеристики перешкод [16, 17]. Установка дозволяє перевіряти функціонування макета високоточного ЛІВС при виявленні об'єктів в лабораторних умовах за складної фоноцільової обстановки.

Проведено дослідження поведінки відбитого сигналу при одночасній наявності різних видів поверхні, а також впливу параметрів зондуючого випромінювання на точність виявлення об'єкта. Випробування макета ЛІВС показали, що він забезпечує видачу командного сигналу на фіксованій дистанції 3,5 м від поверхні об'єкта локації з точністю 0,001 м при використанні оптичного випромінювання з довжиною хвилі 905 нм. Виявлення і подальший аналіз поведінки поверхні об'єкта починається з відстані 4,5 м.

Інформаційно-вимірювальна система включає до свого складу: блоки реєстрації та обробки зворотного сигналу, блок управління для взаємодії всіх вузлів ІВС, а також блок формування параметрів зондуючого пучка лазерного випромінювання. Для ефективного функціонування ЛІВС важливе значення мають параметри зондуючого пучка, який формується лазерними випромінювачами, потужність випромінювання, діапазон довжин хвиль, діаметр пучка, частота генерації, шпаруватість імпульсів і т.д. Більшість подібних завдань вимагає поряд з даними параметрами виконання специфічних умов, як перебудови частоти випромінювання, високої стабільності енергії імпульсів випромінювання та інших. Ці умови накладають суттєві обмеження на вибір типу лазера.

Основними завадовими впливами в даному оптичному діапазоні в реальних умовах є щільні дим і туман, сильний дощ, негусті гілки з листям дерев і чагарників, тобто рознесені, не суцільні завади, штучні потужні імпульсні і постійні світлові засвічення, а також відблиски сонця, відбиті від поверхні води або інших дзеркальних об'єктів.

Виходячи з дальності порога чутливості ЛІВС установка, що моделює рознесені не су-

цільні завади, засвічення з величиною світлового потоку до 11000 Лм, виконана у вигляді ізолюваного від зовнішнього середовища відсіку (тунелю) довжиною 5 м. Тілесний кут діаграми спрямованості приймального об'єктива ЛІВС становить 10° , отже на відстані спрацьовування 4,5 м діаметр поля зору оптичної системи складає 0,45 м, що визначає поперечний перетин тунелю у вигляді прямокутної трапеції з габаритними розмірами 0,6 x 0,5 x 0,4 м. Структура установки наведена на рисунку 1.

Для зручності спостереження за становищем та дотримання єдності всіх пристроїв та засобів, що використовуються у вимірах, передня стінка тунелю виготовлена зі скла, всі інші стінки непрозорі. Випробуваний макет ЛІВС встановлюється у середині правої стінки тунелю. Імітована поверхня об'єкту локації виконана у вигляді вертикального плоского екрану, розташованого перпендикулярно осі тунелю. Екран встановлено на пересувний майданчик, який за допомогою тросового механізму пересувається уздовж осі тунелю. Поточна відстань від екрану до макета ЛІВС контролюється візуально за допомогою стрічки рулетки, яка закріплена зовні тунелю. Зовнішній вигляд установки представлено на фото рисунку 2.

Номери позицій елементів, що входять до складу установки, наведені нижче:

1 - герметичний тунель довжиною 5,0 м, 2 - основа тунелю, 3 - верхня кришка, 4 - пересувний екран, 5 - повітропровід системи вентиляції круглого перетину, 6 - повітропровід системи вентиляції прямокутного перетину, 7 - осьовий вентилятор, що відкачує повітря з установки, 8 - впускне вікно витяжної вентиляційної системи, 9 - комп'ютер, 10 - цифровий USB-осцилограф DSQ-5200A фірми Hantek, 11 - набір знімних панелей для пересувного екрану з відомими коефіцієнтами відбиття, 12 - цифровий вимірювач прозорості (ВП) аерозольних утворень, 13 - лабораторний блок живлення (БЖ) макета ЛІВС, 14 - повітряний компресор, 15 - лабораторний блок живлення повітряного компресора, 16 - ІЧ-відеокамера, що призначена для візуалізації проходження випромінювання макета ЛІВС в середовищі, що моделюється, і визначення положення поля зору В на пересувному екрані, 17 - стрічка

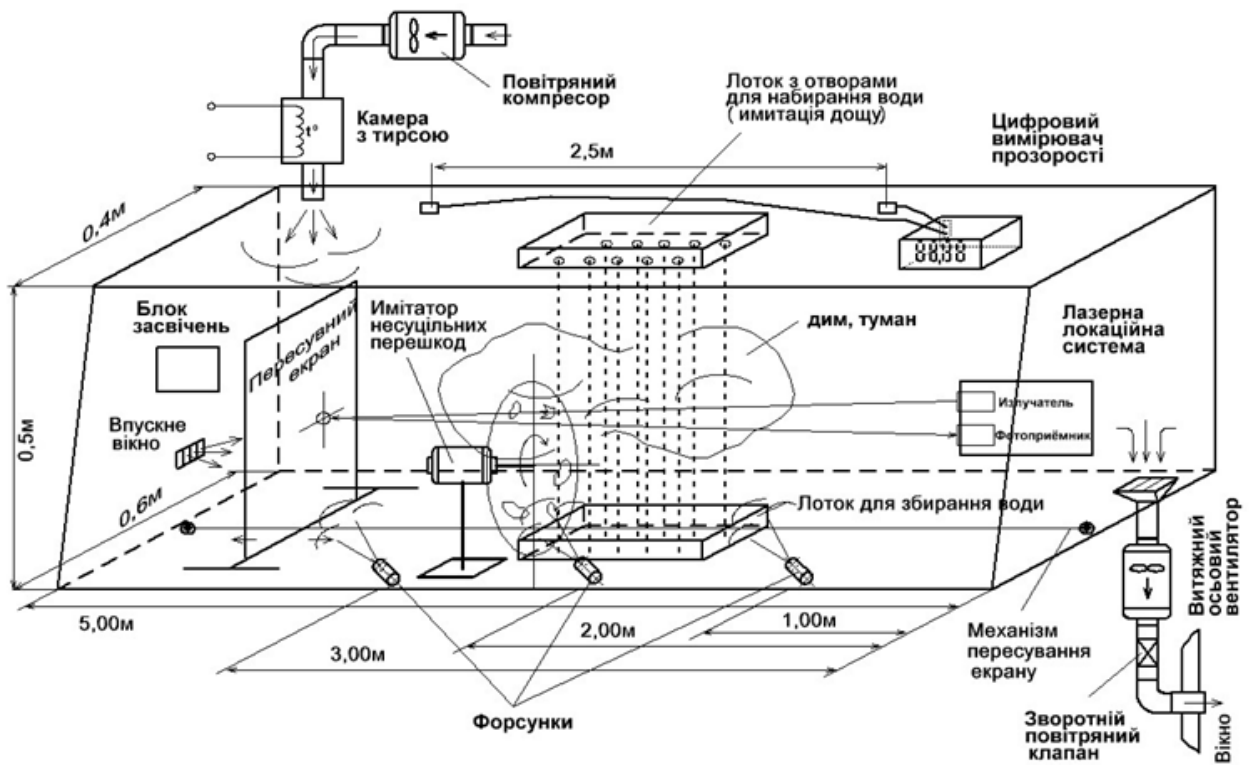


Рис. 1. Структура вимірювальної установки



Рис. 2. Зовнішній вигляд установки

рулетки (відстань від макета до пересувного екрану), 18 - зображення внутрішнього простору тунелю виміральної установки, що надходить з відеокамери на монітор вимірального комп'ютера в ІЧ-діапазоні.

Наявність аерозольних утворень (дим, туман, дощ) в атмосферному каналі призводить до поглинання або розсіювання випромінювання, що зондує ЛІВС. Для заповнення білим або чорним димом тунелю установки, що моделює, розроблено генератор диму, який представлено на фото рисунку 3.

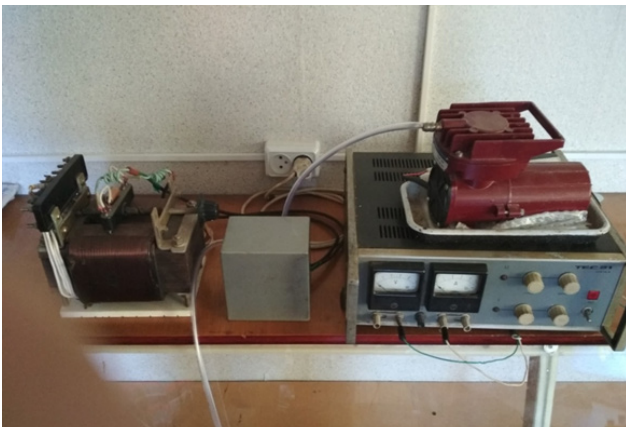


Рис.3. Генератор диму

Методика моделювання і випробувань ЛІВС

Задимлення внутрішнього простору моделюючої установки проводиться таким чином. Одночасно включаються повітряний компресор і витяжний вентилятор. Повітряний компресор нагнітає повітря з приміщення лабораторії в камеру з тирсою. Для утворення білого диму використовується суміш зволоженої березової тирси і соломи у співвідношенні 1:1. Для утворення чорного диму зволоженою соснову тирсу перемішують з машинним маслом. подача напруги на встановлену в камері спіраль, що нагрівається, призводить до утворення диму в масі зволоженої тирси. Разом з потоком повітря від компресора дим переноситься всередину установки, заповнює внутрішній обсяг і з іншого боку тунелю видаляється з установки за допомогою витяжного вентилятора. Продуктивність витяжного вентилятора регулюється і підбирається таким чином, щоб

усередині установки створювалося невелике розрідження, що перешкоджає виходу диму в приміщення лабораторії. Для видалення задимлення після проведення вимірювань установка обладнана витяжною вентиляційною системою.

Створення туману всередині моделюючої установки проводиться за допомогою трьох форсунок, розташованих на відстанях 1,0 м, 2,0 м і 3,0 м від макета ЛІВС. До трьох форсунок по силіконових трубках самопливом підводиться попередньо підігріта до 60° вода з одного накопичувального бачка. Одночасно до всіх трьох форсунок під тиском компресора надходить повітря. Конструкція застосованих форсунок дозволяє отримати дрібнодисперсну суспензію водних крапель у повітрі, аналогічну щільному туману. При проведенні вимірювань характеристик макета в тумані непрозорі стінки тунелю установки закриваються поліетиленовою плівкою, а на дно вкладається кілька шарів гігроскопічного матеріалу.

Імітація короткочасного сильного дощу в установці реалізується за допомогою двох лотків довжиною 1,0 м, шириною 0,4 м і глибиною 0,08 м, з'єднаних між собою металевими стійками. У верхньому лотку просвердлено 160 отворів діаметром 4 мм. При проведенні випробувань вода подається у верхній лоток по шлангу з крана в обсязі 25 л і через отвори самопливом стікає в нижній лоток, утворюючи в полі зору макета ЛІВС потік хаотично мигтливих крапель. Нижній лоток призначений для збору з верхнього лотка води, що стікає. Залежно від мети випробувань система лотків може встановлюватися, зніматися і переміщатися уздовж усього тунелю випробувальної установки.

Природними не суцільними (рознесеними) завадами, що впливають на точність визначення заданої дистанції спрацьовування ЛІВС до поверхні цілі, є чагарники і невисокі дерева з рідкою кроною, які присутні на місцевості. Для моделювання такої завади розроблено імітатор, наведений на рисунку 4.

Випробувальна установка укомплектована двома такими імітаторами, які встановлюються в поле зору макета ЛІВС на різних дистанціях. Імітатор являє собою диск з органічного



Рис. 4. Імітатор моделювання несуцільних завад

скла, встановлений на вісь електродвигуна. На поверхню диска наклеєні в довільному хаотичному порядку непрозорі шматки паперу різного кольору і форми, що імітують листяний покрив. Двигун закріплений на пересувній підставці, яка дозволяє переміщати його на певну відстань відносно макета ЛПВС і виставляти необхідну висоту над поверхнею підстави моделюючої установки. При подачі напруги живлення на електродвигун прозорий диск обертається із заданою швидкістю, що дозволяє перекривати поле зору макета ЛПВС на різний час, імітуючи тим самим листя і гілки, що миготять. Встановлені на різних відстанях два імітатори одночасно моделюють протяжні не суцільні завади. Площина диска імітатора встановлюється під деяким кутом до осі поля зору макета, що виключає дзеркальне відбиття лазерного випромінювання ЛПВС в поле зору

об'єктива ФП. На рисунку 4 демонструється взаємне розташування імітатора моделювання несуцільних завад та макета ЛПВС в тунелі установки. Обертання диска з різною швидкістю дозволяє імітувати рух макета ЛПВС відносно несуцільних завад з лінійною швидкістю до 100 м/с.

Для аналізу роботи ЛПВС в умовах аерозольних утворень різного походження, як природних, так і штучних необхідно проводити безперервний контроль та вимірювання оптичної щільності або прозорості середовища.

Оцінка щільності аерозольних утворень проводиться різними методами. Найбільш придатними для швидких вимірювань у складі імітаційної установки є методи визначення оптичної щільності (прозорості) середовища та масової концентрації частинок. Прилади, призначені для визначення оптичної щільності середовища, ґрунтуються на законі Бугера-Ламберта-Бера про ослаблення монохроматичного променя світла при проходженні крізь середовище, яке поглинає. Для визначеності необхідно привести формули перерахунку величини загасання в відсотках у величину загасання M в децибелах (дБ) і назад:

$$M [\text{дБ}] = 10 \lg [100 / (100 - \Delta)],$$

$$\Delta [\%] = 100 - 100 / 10^{M/10}.$$

Для загального уявлення деякі значення загасання M у відсотках та децибелах, а також величина коефіцієнта передачі $K_{\text{п}}$ в «разах», наведені в таблиці 1, де

$$K_{\text{п}} = 1 - \Delta / 100,$$

$$\Delta = 100 (1 - K_{\text{п}}).$$

Для визначення питомої оптичної щільності оптичного середовища m в [дБ/м] і d в %/м, необхідно величину затухання M [дБ] розділити на величину довжини оптичного променя в метрах. Результати розрахунків оптичної щільності середовища надано в таблиці 2 і на рис. 6.

Таблиця 1

Величини загасання сигналу у відсотках та децибелах

$\Delta, \%$	10	15	20	25	30	40	50	60	70	90	95	99
$K_{\text{п}}$	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,1	0,05	0,01
$M, \text{дБ}$	0,46	0,71	0,97	1,25	1,55	2,22	3,01	3,98	5,23	10	13,01	20

Таблиця 2

Величини питомої оптичної щільності в %/м і дБ/м

d, %/м	0,5	1	2	3	4	5	7	10	15	20
m, дБ/м	0,022	0,044	0,088	0,132	0,177	0,223	0,315	0,458	0,706	0,969

Для контролю оптичної щільності середовища установка оснащена розробленим та виготовленим цифровим вимірником прозорості (ВП), принцип дії якого засновано на вимірі відношень напруги, пропорційних потокам випромінювання, що попадають на блок ФП при відсутності диму і в задимленому середовищі. Структурна схема ВП, що дозволяє описати алгоритм вимірювання поточного значення оптичної щільності середовища, представлена на рисунку 5.

Алгоритм роботи наступний. При включенні блоку живлення електричний сигнал типу «меандр» задаючого генератора ЗГ, надходить на калібратор К. Калібратор складається із змінного багатооборотного прецизійного резистора і двох узгоджувальних каскадів. З калібратора через вихідний каскад ВК посилений по струму сигнал подається на лазерний випромінювач. Сфокусований за допомогою передавального об'єктива промінь світла, пройшовши через середовище, що моделюється, надходить у приймальний об'єктив і потім на фотоприймач (ФП). З ФП сигнал надходить на резонансний підсилювач (РП). Посилена по амплітуді і виділена з сигналів завад перша гармоніка вимірювального сигналу надходить на точний випрямляч (ТВ). Випрямлений сигнал, що оцифровано за допомогою аналогово-цифрового перетворювача (АЦП), потім відображається на індикаторі (ІНД). Необхідна точність і стабільність вимірювання поточного значення амплітуди сигналу, що пройшов через середовище, досягається застосуванням температурно-стабільного резонансного підсилювача та ТВ змінного струму. ТВ забезпечують вихідний сигнал, рівний абсолютній величині вхідного, але без втрати напруги, що виникає при зміщенні випрямляючого діода в прямому напрямку, дозволяючи використовувати їх у діапазоні мілівольт.

В зоні вимірювання ВП визначає значення оптичної щільності середовища. Розрахунок

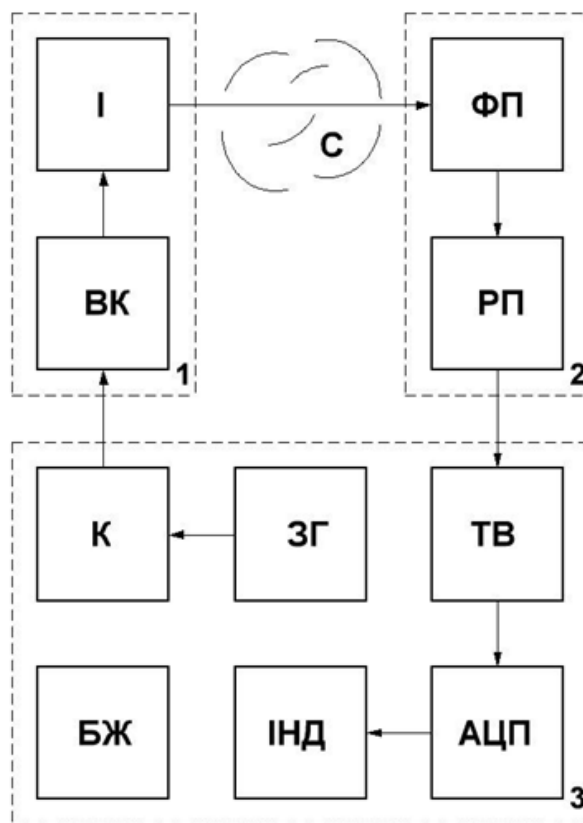


Рис. 5. Структурна схема вимірювача прозорості.

- 1 - передавальний блок; 2 - приймальний блок; 3 - блок вимірювання та індикації;
- Л - лазерний випромінювач (довжина хвилі 905 нм); ВК - струмовий вихідний каскад; К - калібратор (вузол прецизійного регулювання рівня сигналу, що зондує);
- ЗГ - генератор, що задає 100 кГц;
- ФП - фотоприймач; РП - резонансний підсилювач; ТВ - точний випрямляч;
- АЦП - аналогово-цифровий перетворювач; ІНД – індикатор

оптичної щільності диму D проведено за формулою:

$$D = 10 \log \frac{U_0}{U_i}, \text{ дБ},$$

де: U_0 – напруга, пропорційна потоку випромінювання при відсутності диму, В; U_1 – напруга, пропорційна потоку випромінювання в задимлене середовище, В.

Для збільшення завадостійкості і зменшення дрейфу величини шуканого параметра від впливу температури, а також природних і штучних, постійних та імпульсних засвічень, використана модуляція опорного світлового потоку сигналом типу «меандр» з частотою 100 кГц. Показання в мілівольтах ВП можна прирівняти до величини пропускання середовища в відсотках. Проведено калібрування ВП шляхом установки перед приймальним об'єктивом нейтральних світлофільтрів з набору зразків кольорових оптичних стекел з відомими коефіцієнтами передачі на робочій довжині хвилі світла випромінювача. Калібрування значення загасання, рівного 1,0, за відсутності середовища, що моделюється, і відповідних значень при внесенні світлофільтрів проводиться через 2 години після вологого прибирання приміщення лабораторії. Зовнішній вигляд ВП представлено на фото рисунку 6.



Рис. 6. Зовнішній вигляд вимірювача прозорості

Вимірник є стаціонарним приладом постійної дії, працездатний при фоновій освітленості до 500 л, яку створюють природні або штучні джерела освітлення. Конструктивно він знаходиться в блоці управління та забезпечує вимірювання в діапазоні хвиль 850-950 нм.

До складу ВП входять: блок вимірювання та індикації, встановлений на верхній кришці установки, а також приймальний (рисунок 7) і передавальний (рисунок 8) блоки, встановлені всередині тунелю уздовж задньої стінки установки.



Рис. 7. Розміщення приймального блоку



Рис. 8. Розміщення передавального блоку

Юстирування передавального та приймального блоків, поєднання полів зору їх об'єктивів, розташованих уздовж однієї оптичної осі проводяться за допомогою рухомого кріплення передавального блоку. Відстань між передавальним і приймальним блоками всередині установки становить 3,5 м. До складу принципової схеми ВП не введено обчислювальні вузли. На індикаторі пристрою в безперервному режимі виводиться поточне значення амплітуди сигналу, що пройшов через середовище з аерозолем, в мілівольтах. Розрахунок поточного значення оптичної щільності середовища і подальше внесення отриманих величин в таблиці результатів проводиться вручну. Обчислювальний та індикаторний блоки ВП встановлені поза відсіком установки на її верхній кришці. Блоки В і ФП цифрового ВП з'єднані з блоком індикації за допомогою дротів. Поля зору блоків В і ФП цифрового ВП зорієнтовані уздовж однієї оптичної осі назустріч один одному.

На створеній установці проведено експериментальні дослідження роботи макета ЛІВС на засаді лабораторних випробувань, метою яких є оцінка точності спрацьовування (визначення дальності до поверхні цілі) в умовах впливу рознесених (не суцільних) завад, інтенсивного дощу, густого туману, диму, інтенсивних постійних та імпульсних світлових завад (засвічень) і сонячних відблисків, тобто перевірка завадо захисту макету ЛІВС.

Для спостереження за поширенням зондуючого випромінювання в середовищі, яке моделюється, а також фіксації положення поля зору оптичної системи макета ЛІВС на пересувному екрані, використовується ІЧ-відеокамера 16. Чутливість відеокамери в ІЧ-діапазоні отримана за рахунок видалення з її оптичної системи світлофільтру жовтого кольору. Спостереження за формою сигналів в схемі приймально-передавальних каналів макету ЛІВС проведено за допомогою цифрового USB-осцилографа DSQ-5200A фірми Nantek. Застосовані в оснащенні установки осцилограф та ІЧ-відеокамера представляють отримані дані через USB-порт. Для візуалізації переданих відеокамерою зображень і використання програмного забезпечення осцилографа

використаний комп'ютер HP Compaq DC7200, позиція 9.

Джерелом постійної завади (засвічення) є світлодіодна матриця Epistar ARPL-100W-3500K з однолінзовим об'єктивом, яка випромінює світловий потік величиною до 11000 Лм в зону приймального об'єктива ЛІВС. Для отримання інтенсивної імпульсної завади струм, що проходить через світлодіодну матрицю, промодульовано сигналом типу «меандр» з частотою 1,0 кГц. Оцінка точності вимірювання дальності макетом ЛІВС до поверхні цілі, проведена в умовах потужних імпульсних і постійних світлових завад (засвічень), джерело яких встановлено всередині тунелю вимірювальної установки (рисунок 1) на оптичній осі ФП за межами зони чутливості макета ЛІВС (4,0 м).

Перед проведенням серії вимірювань проводиться калібрування середовища ВП. Працездатність макета ЛІВС визначається за допомогою відеокамери за наявністю зображення В на поверхні пересувного екрану і появи сигналу спрацьовування при пересуванні екрану в межах робочої зони.

Пересувний екран за допомогою тросового механізму встановлюється в початкове положення на відстані 4,0 м поза зоною чутливості макета ЛІВС. Подається напруга на ВП та генератор диму. Залежно від необхідного кольору диму в камеру генератора диму завантажуються та чи інша суміш вологої деревної тирси. При досягненні необхідної оптичної щільності диму, значення якої контролюється за допомогою ВП, генератор диму відключається. Через деякий час, необхідний для рівномірного розподілу диму по всьому об'єму установки проводяться вимірювання дистанції спрацьовування макета ЛІВС в зазначених умовах.

Після проведення вимірювань вентиляційна система відкачує з об'єму вимірювальної установки дим попереднього експерименту. Повне очищення контролюється за допомогою ВП. Відстань від макета ЛІВС до поверхні пересувного екрану контролюється за допомогою стрічки рулетки. Положення зображення поля зору на поверхні пересувного екрану протягом

всіх вимірювань контролюється на моніторі комп'ютера за допомогою інфрачервоної відеокамери.

Перевірка точності спрацьовування і завадозахисту макета ЛІВС проводиться для трьох значень оптичної щільності диму (білого і чорного).

Вимірювання проводяться в наступній послідовності:

- тунель вимірювальної установки заповнюється димом до заданого певного значення рівня оптичної щільності (контролюється по індикатору ВП);

- пересувний екран, що імітує поверхню цілі, розташовується за межами зони чутливості макета ЛІВС і протягом 10 хвилин проводиться реєстрація можливого помилкового спрацьовування макета ЛІВС (контролюється по включенню світлодіода, підключеного замість спіралі електрозапальника);

- пересувний екран за допомогою тросового механізму з дистанції більше 4,0 м повільно наближається до макета ЛІВС до моменту спрацьовування датчика;

- отримане значення дистанції виявлення поверхні цілі макетом ЛІВС для поточних умов заноситься в таблицю результатів вимірювань;

- дана послідовність дій проведена для макета ЛІВС і трьох екранів з різними відомими значеннями коефіцієнта відбиття поверхні.

Аналогічно перевірено точність спрацьовування і завадозахист макета ЛІВС від впливу дощу і туману різної оптичної щільності.

Оцінка точності вимірювання дальності ЛІВС в умовах наявності інтенсивних постійних і імпульсних світлових завад (засвічень) проведено таким чином: випромінювання джерела інтенсивного сигналу засвічення, що встановлено всередині тунелю вимірювальної установки, за допомогою однолінзового об'єктива проектувалося в зону приймального об'єктива макета ЛІВС. Випробування проведено при температурі +23°C і штучному освітленні світлодіодними лампами сумарної освітленістю 400 люмен.

У ЛІВС використано лазерний діод SPLPL 90-3 виробництва OSRAM Opto Semiconductors. Випромінювання діода моно-

хроматичне на довжині хвилі 905 нм. Тіло світіння діода являє собою три смуги розмірами 2x200 мкм, розташованими одна над одною з зазором 3 мкм. На поверхні цілі на відстані спрацьовування макета ЛІВС, двоопукла лінза, яка використовується в передавальному об'єктиві, формує зображення з розмірами 85x5 мм. На пересувному екрані вимірювальної установки спостерігається зображення тіла світіння лазерного діода, отримане з ІЧ-відеокамери, яке через велику яскравість має розширену еліпсоподібну форму. Для демонстрації форми сигналів, що протікають в макеті ЛІВС в залежності від оптичної щільності модельованих аерозольних середовищ, в макеті передбачено вивід з виходу фотоприймального каналу.

На рисунку 9 наведено фото фрагментів випробувань макету ЛІВС на моделюючій вимірювальній установці в умовах димових завад, отримані за допомогою ІЧ-відеокамери всередині тунелю.



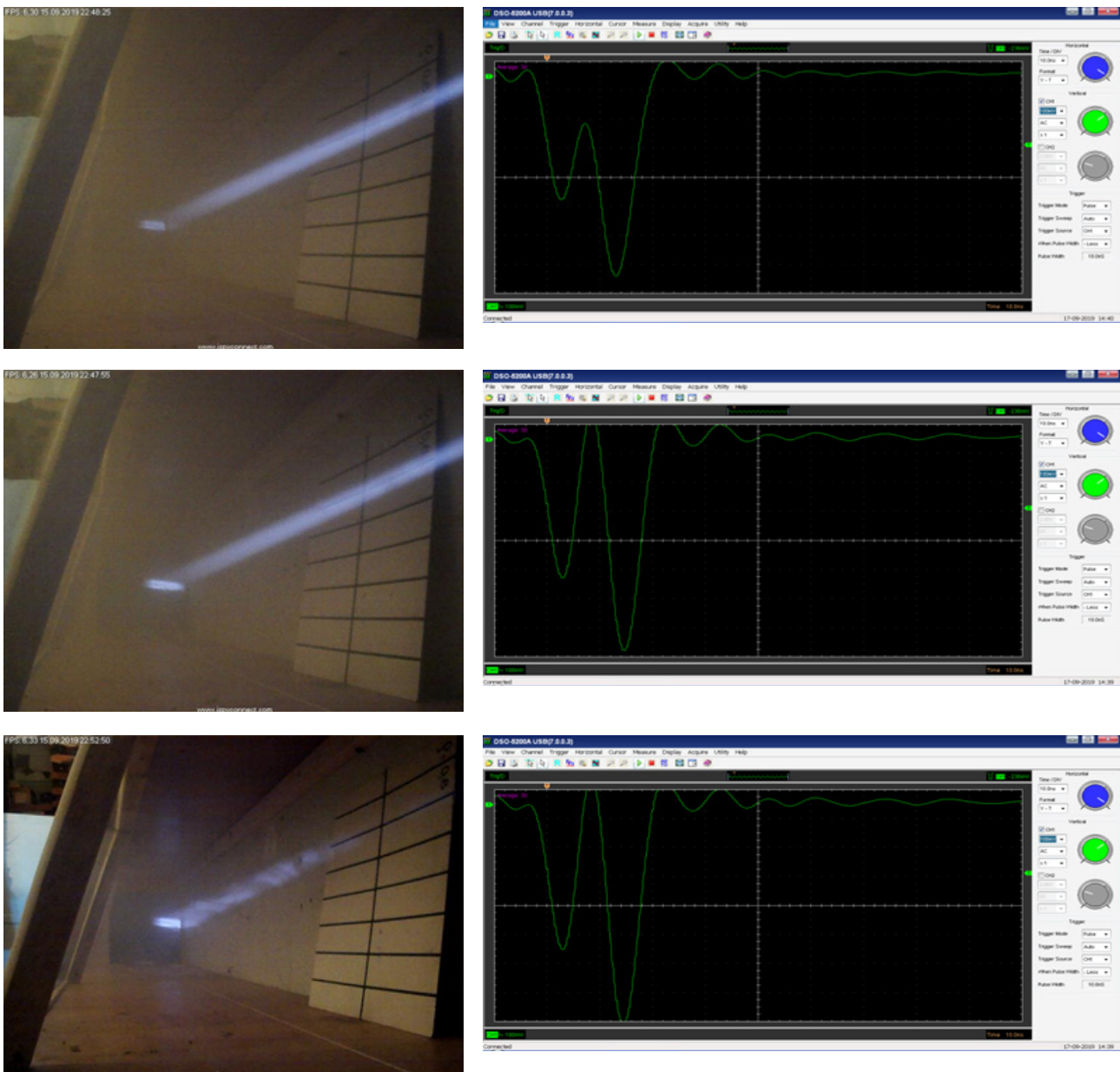
Рис. 9. Фрагменти ЛІВС в умовах димових завад

Коефіцієнт передачі повітряно-димової суміші збільшується зверху вниз і становить наступні вимірні величини: $K_{\text{п}1} = 0,3$; $K_{\text{п}2} = 0,6$; $K_{\text{п}3} = 0,9$.

Для контролю форми напруги на виході фото приймального каналу використано цифровий USB-осцилограф DSQ-5200A фірми Hantek, який дозволяє вимірювати мінімальне значення тривалості електричних сигналів, що протікають в схемах макета ЛПВС, величиною до 2,0 нс при роботі одного з вхідних каналів. Фронти імпульсів електричних процесів, що

протікають в макеті ЛПВС, досягають величини декількох сотень наносекунд, тому на екрані осцилографа прямокутні імпульси спотворюються і мають дзвоноподібну форму.

На рисунку 10 наведено зображення поверхні об'єкта (дистанції спрацьовування) макета ЛПВС, отримані всередині тунелю вимірювальної установки за допомогою ІЧ-відеокамери, і відповідні епюри напруг на екрані осцилографа, зняті з блоку ФП для різної оптичної щільності диму .



Рис, 10 Дистанції виявлення поверхні завади ЛПВС і відповідні епюри напруг на екрані осцилографа для різної оптичної щільності диму

На епюрах напружень наочно видно зміни амплітуди і часових співвідношень сигналів в залежності від оптичної щільності аерозольного утворення, що моделюється. Для кожного із значень оптичної щільності аерозольного середовища, наведених на рисунках, представлено зображення форми сигналу на виході фотоприймального каналу. Точність візуального визначення часу між фронтами випромінюваного і прийнятого імпульсів, рівного часу поширення світла до поверхні цілі і назад, визначається на екрані осцилографа на рівні 0,5 амплітуди сигналу.

Для оцінки максимуму викривальної здатності макета ЛІВС коефіцієнт відбиття поверхні екрану (цілі) обраний мінімальним ($\rho=0,13$, чорна тканина).

Результати вимірювань дистанції спрацювання ЛІВС в диму від екранів з різним коефіцієнтом відбиття наведені в таблиці 3.

На рисунках 11 і 12 наведені зображення випробувань макету ЛІВС в умовах щільного туману, отримані за допомогою ІЧ-відеокамери всередині тунелю установки і збоку зовні, а також відповідні епюри напруг з виходу фотоприймального каналу на екрані осцилографа.

Оптична щільність всіх аерозольних утворень (диму, туману, дощу), для наочності порівняння величин дистанції спрацювання ЛІВС, має однакові значення. Результати вимірювань в тумані та у дощу від екранів з різною відбивною здатністю наведені в таблиці 4.

Таблиця 3

Характеристики ЛІВС в диму

Характеристики середовища	Дистанція спрацювання, м					
	Білий дим			Чорний дим		
$M, \text{ дБ}$	0,46	2,22	5,23	0,46	2,22	3,98
$\Delta, \%$	10	40	70	10	40	60
$K_{\text{п}}$	0,9	0,6	0,3	0,9	0,6	0,4
$\rho = 0,8$	2,60	2,60	2,58	2,60	2,58	2,56
$\rho = 0,56$	2,57	2,56	2,55	2,54	2,53	2,52
$\rho = 0,13$	2,55	2,54	2,53	2,52	2,51	2,50

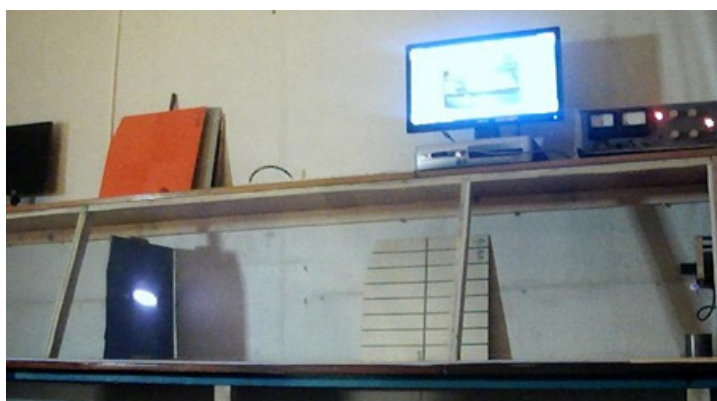


Рис. 11. Перевірка характеристик ЛІВС в тумані

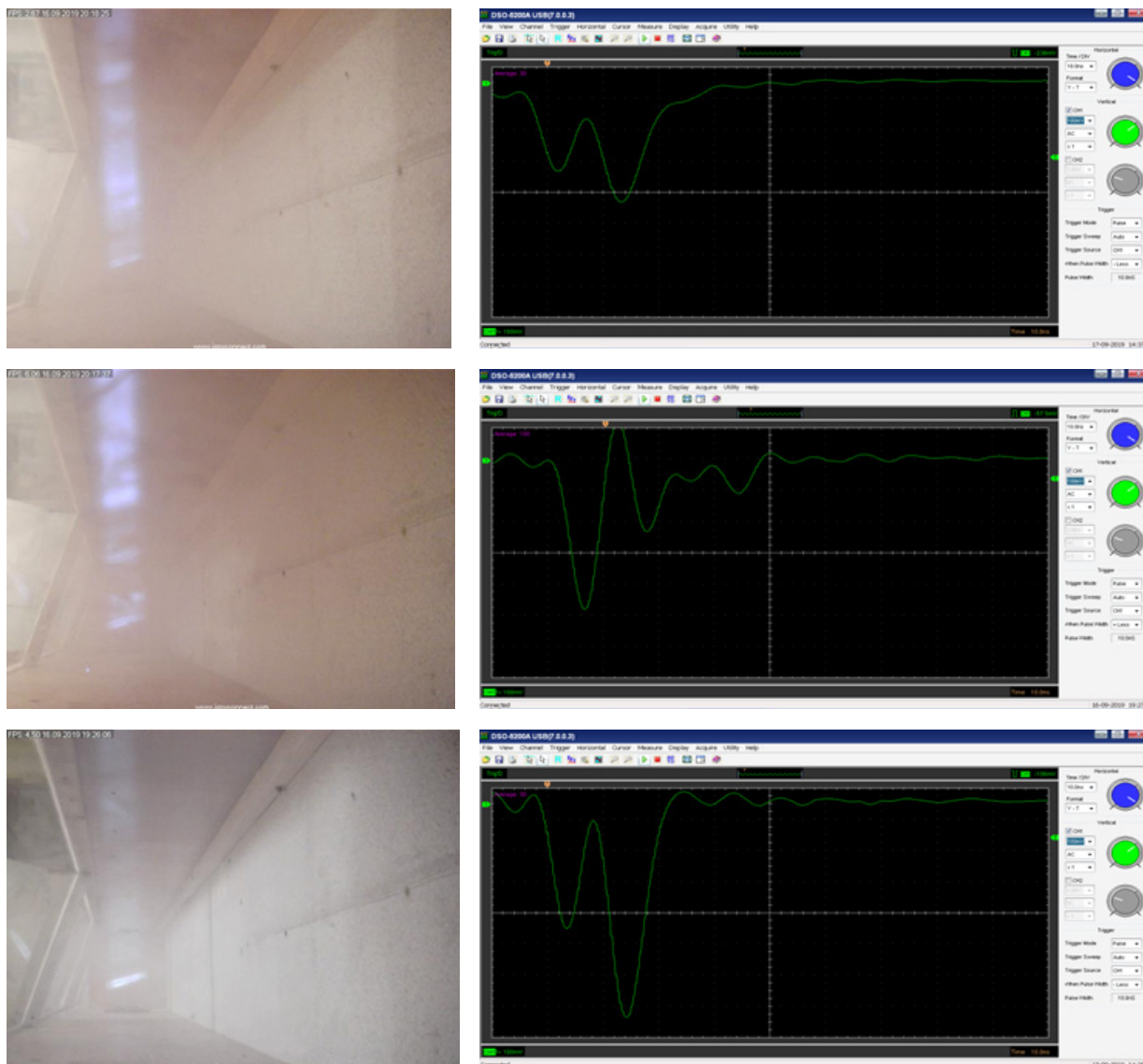


Рис. 12. Сигнал з блоку фотоприймача для різної оптичної щільності туману

Таблиця 4

Характеристики ЛІВС в тумані та у дощу

Характеристики середовища	Дистанція спрацювання ЛІВС, м			
	в тумані			
$M, \text{дБ}$	0,46	2,22	5,23	$\Delta = 40\%$.
$\Delta, \%$	10	40	70	$\Delta = 40\%$.
$K, \text{п}$	0,9	0,6	0,3	$\Delta = 40\%$.
$\rho = 0,8$	2,60	2,58	2,56	2,60
$\rho = 0,56$	2,58	2,57	2,55	2,58
$\rho = 0,13$	2,56	2,55	2,54	2,56

Результати вимірювань дистанції спрацювання ЛІВС при імітації дощу проведено для одного отриманого середнього значення $\Delta = 40\%$.

Проведено випробування макета ЛІВС на відсутність помилкових спрацювань від завад типу листя і гілки за допомогою розробленого та виготовленого імітатора моделювання не суцільних (рознесених) завад в складі вимірювальної установки. Для цього прозорий диск пристрою з наклеєним «листям» встановлюється в поле зору макета ЛІВС на відстані, меншій дистанції спрацювання. Швидкість обертання диска підбирається так, щоб зазори між «листям» перебували в полі зору оптичної системи ЛІВС протягом часу > 200 мкс.

Ідентифікація не суцільних (рознесених) завад розробленим макетом ЛІВС заснована на часовому аналізі знаходження поверхні цілі в поле зору оптичної системи. Якщо за часовий проміжок 2 мс, пропорційний прольоту дистанції 0,4 м на швидкості 200 м / с, ЛІВС реєструє наявність поверхні завади без розривів, видається команда на спрацювання. Коли в цей часовий проміжок поверхня об'єкту локації зникає на час, більший 200 мкс, процес аналізу скидається і підрахунок часу перебування поверхні об'єкту в полі зору ЛІВС починається спочатку.

Розмір поля зору макету ЛІВС на дистанції спрацювання 2,5 м становить 8,5x0,5 см, тобто це смуга з поперечними розмірами 0,5 см. Середній розмір листя чагарників і невеликих дерев становить 5 ... 10 см. При мінімальному зазорі між листям 1,0 см, їх зникнення з поля зору ЛІВС на штатній швидкості буде призводити до блокування видачі сигналу на спрацювання. Результати вимірювань показали, що перебування несучільної завади, що миготіє, в полі зору ЛІВС, що випробовується, з заданими часовими параметрами не призводить до помилкового спрацювання. При впливі постійної і імпульсної оптичних завад на протязі 10 хвилин на досліджуваний ЛІВС не зареєстровані зміни світлодіодного індикатора спрацювання.

Результати випробування ЛІВС засвідчили, що в робочому діапазоні дистанцій 2,5 м \pm 0,5 м зареєстрована надійна реєстрація

поверхні об'єкта при кутах підходу, близьких до 90 °. З наведених епюр напруги на виході фотоприймального каналу видно, що при мінімальній відбивній здатності поверхні пересувного екрану і мінімальному коефіцієнті передачі аерозольних утворень макет ЛІВС надійно реєструє відбитий сигнал, і його положення в часі візуально не змінюється, що забезпечує необхідну точність спрацювання.

Імітовані аерозольні утворення будь-якого виду з величиною загасання до 70 % не викликають пропуску поверхні об'єкта і не впливають на точність визначення дистанції спрацювання ЛІВС. Випробування макету ЛІВС на вплив несучільних завад підтвердили відсутність помилкових спрацювань. Вимірювання поточного становища поверхні об'єкта в робочому діапазоні дистанцій ЛІВС, при впливі джерел потужної постійної і імпульсної засвічень, не призвело до втрати відбитого сигналу або неточних показань величини відстані до поверхні екрану.

Випробування, проведені на створеній установці показали, що ЛІВС дозволяє надійно виявляти та з високою точністю вимірювати відстань до поверхні об'єкта при кутах підходу близьких до 90 ° незалежно від стану і характеру поверхні перепони. Застосування сумісного впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів навколишнього середовища в атмосферному каналі, такі як перешкоди та завади з дрібно-дисперсними включеннями (дим, туман, дощ), наявність несучільних завад, а також потужні імпульсні і постійні засвічення з величиною світлового потоку становить порядку 11000 Лм в фотоприймальному каналі не призводять до втрати і пропуску поверхні об'єкту ЛІВС.

Висновки

Створена вимірювально-випробувальна установка фізичного моделювання завад в оптичному каналі для перевірки працездатності ЛІВС в процесі їх розробки в умовах складної фоноцільової обстановки та дестабілізуючих чинників, показала високу ефективність. За результатами досліджень ЛІВС встановлено, що імітовані аерозольні утворення будь-якого виду (інтенсивний дощ, туман,

чорний і білий дими), несущі (рознесені) перешкоди, а також потужні постійні та імпульсні засвічення як природні, так і активні організовані штучні, не викликають пропуску поверхні цілі і не впливають на точність визначення дистанції спрацювання ЛІВС.

Встановлено, що в робочому діапазоні дистанцій $3,5 \pm 0,5$ м незалежно від значень кутів підходу до об'єкта локації, стану і характеру поверхні, зареєстрована надійна реєстрація об'єкту на всій траєкторії підходу до об'єкту, тобто повна відсутність помилкових спрацювань та відсутність втрати і пропуску поверхні об'єкту, що гарантує високоточне його виявлення в заданій просторовій робочій зоні.

Установка дозволяє моделювати і проводити імітаційні експерименти з урахуванням параметрів пучка ЛІВС, який зондує, що дозволяє виявляти об'єкти в ситуаціях з різними параметрами навколишнього середовища, і може проводити їх ідентифікацію. Установка дозволяє розробляти нові, високоточні ЛІВС, принцип дії яких буде засновано на нових способах і методах локації та сучасній елементній базі оптоелектроніки.

Список використаної літератури

[1]. Labunec, L. V. Matematicheskoe i fizicheskoe modelirovanie perekhodnyh karakteristik 3D-ob"ektov v odnopolozicionnoj sisteme opticheskoy lokacii / L. V. Labunec // Radiotekhnika i elektronika. – Т. 47. – 2002. – №3. – С. 308-321 (*in Russian*).

[2]. Suzuki, T. Phase-shifting laser diode interferometer using pulse modulation. T. Suzuki, T. Adachi, O. Sasaki and S. Choi. // Applied Optics, 2012, Vol. 51, Issue 18, p. 4109-4112.

[3]. Patent 94697 RF, МПК G01J1/00, G06F17/00. Ustanovka dlya izmereniya otrazhatel'nyh karakteristik materialov / I. M. Hmarov. – №2010105346/22; zayavl. 17.02.2010; opubl. 27.05.2010. Byul. №15 (*in Russian*).

[4]. Georgiev, Georgi T. Comparison between laboratory and airborne BRDF measurements for remote sensing / Georgi T. Georgiev, Charles K. Gatebe, James J. Butler, Michael D. King // Proc. of SPIE, 2006, Vol. 6296, 629603 34.

[5]. Nepogodin, I. A. Kriterii i metod ocenki informativnosti priznakov ob"ektov v zadachah lazernoj lokacii / I. A. Nepogodin // Opticheskij zhurnal: nauchno-tehnicheskij zhurnal. – S. -P. : Gosudarstvennyj opticheskij institut im. S. I. Vavilova; Opticheskoe obshchestvo. – Т. – 2007. – №1. – С. 55-64 (*in Russian*).

[6]. Korovin R. A., Levshin E. A. Eksperimental'naya ocenka effektivnosti skhem pomekhozashchity lazernyh sledyashchih sistem // PERSPEKTIVA-2013: sb. statej po mat-lam dokladov XXIII mezhvuzovskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Voronezh: VVA, 2013. S. 101–104 (*in Russian*).

[7]. Pavlov P. V., Goryunov A. E. Apparatno-programmnyj kompleks nerazrushayushchego kontrolya. Trudy MAI. 2015. Vypusk 80 (*in Russian*).

[8]. Pavlov P. V., Malov A. N., Kolesov S. S., Vol'f I. E. Programmnyj kompleks nerazrushayushchego kontrolya na osnove ispol'zovaniya metoda spekl-struktur opticheskogo izlucheniya. Svid. o gos. Regis. No2014617227. Zareg. 15.07.2014 g. (*in Russian*).

[9]. Gorjunov A. E., Pavlov P. V., Petrov N. V. Evaluating the effectiveness of correlation digital speckle photography method for non-destructive testing of rough surfaces. Journal of Physics: Conference Series. 2014. т. 536.

[10]. Pavlov P. V., Goryunov A. E. Apparatno-programmnyj kompleks nerazrushayushchego kontrolya. – Trudy MAI. 2015. Vypusk 80 (*in Russian*).

[11]. Pavlov P. V., Popov F. N. Informacionno-diagnosticskij kompleks defektoskopicheskogo kontrolya. Sbornik nauchnyh statej konferencii, «Problemy ekspluatacii aviacionnoj tekhniki v sovremennyh usloviyah» CNII VVS Minoborony Rossii. 2016. S. 257–262 (*in Russian*).

[12]. Krishna Myneni, Thomas A. Barr, and Billy R. Reed. High-precision ranging using a chaotic laser pulse train // J. Appl. Phys. Lett. – 2001. – Vol. 78, No 11. – P. 1496–1498.

[13]. K. Nakamura; T. Hara; M. Yoshida; T. Miyahara; H. Ito. Optical frequency domain ranging by a frequency-shifted feedback laser // IEEE J. Quantum Electron. – 2000. – Vol. 36. No 3. – P. 305–316.

[14]. Lepikh Ya., Santoniy V., Yanko V., Budi-yanska L., Ivanchenko I. Computer and mathematic modeling of the development and creation of high-precision location optoelectronic measuring systems // Kioto, Yaponiya. Pp-94-102. :URL <https://sci-conf.com.ua/ii-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-science-and-education-problems-prospects-and-innovations-4-6-noyabrya-2020-goda-kioto-yaponiya-arhiv/>.

[15]. Vaksman Yu. F., Santonii V. I., Budi-ianska L. M., Ivanchenko I. O. Vlastyvosti vidkrytoi ICh-optopary lazernyi diod–pin–fotodiod u fazometrychnykh systemakh blyznoho dalnometruvannia dynamichnoho pryznachennia // Fotoelektronika. – 2003. – N0 12. – S. 102–106 (in Ukrainian).

[16]. Lepikh Ya., Budi-yanska L. Ivanchenko I. Method for detecting aerosol formations with optical location sensor // The world of science and innovation. Abstracts of the 3rd Internation-

al scientific and practical conference. Cognum Publishing House. London, United Kingdom. 2020. Pp. 21-27. URL: <https://sci-conf.com.ua/iii-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-the-world-of-science-and-innovation-14-16-oktyabrya-2020-goda-london-velikobritaniya-arhiv/>

[17]. Lepikh Ya., Santoniy V., Yanko V. Modeling Method of Optoelectronic Sensors Functioning in Dynamic Mode // The world of science and innovation. Abstracts of the 3rd International scientific and practical conference. Cognum Publishing House. London, United Kingdom. 2020. Pp. 134-139. URL: <https://sci-conf.com.ua/iii-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-the-world-of-science-and-innovation-14-16-oktyabrya-2020-goda-london-velikobritaniya-arhiv/>

Стаття надійшла до редакції 24.02.2021 р.

UDC 528.021.7:681.78

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2021.1.227414>

INSTALLATION FOR PHYSICAL SIMULATION OF THE LASER LOCATION PROCESSES

V. I. Santoniy, Ya. I. Lepikh, V. V. Yanko, L. M. Budi-yanskaya, I. A. Ivanchenko, A. P. Balaban

Interdepartmental scientific-educational physics and technical center of MES and NAS of Ukraine at Odesa I. I. Mechnikov National University,
e-mail: ndl_lepikh@onu.edu.ua

Summary

A device for physical modeling of laser ranging processes has been developed, taking into account aerosol interference phenomena of natural and artificial origin and active background illumination. The installation simulates the processes of object detection and recognition by a laser information-measuring system (LIMS) under conditions of external destabilizing factors, obstacles in the atmospheric channel.

The description of the structure, operation principle and technical characteristics of the installation what was created for LIMS research is given. The results of the amplitude, space-time optical characteristics of a number of typical equipment objects with various coatings at a wavelength of 905 nm are presented. Experimental measurements of the LIMS accuracy characteristics for remote object sondage by pulsed laser radiation have been carried out, and the LIMS operation efficiency has been estimated. In the installation, the scattering indicatrix is determined taking into account interference phenomena during remote sondage and the statistical amplitude distribution of the signal reflected from the object is estimated. The installation makes it possible to create a database on the object reflective

characteristics, spatially distributed obstacles, atmosphere transparency and turbulence, as well as on the LIMS elements and their operation mode parameters, including the type of signal modulation.

Keywords: physical modeling, laser information-measuring system, atmospheric channel, object, destabilizing factors.

UDC 528.021.7:681.78

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2021.1.227414>

УСТАНОВКА ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЛАЗЕРНОЇ ЛОКАЦІЇ

В. І. Сантоній, Я. І. Лепіх, В. В. Янко, Л. М. Будіянська, І. О. Іванченко, А. П. Балабан

Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр МОН і НАН України
при ОНУ імені І. І. Мечникова, вул. Дворянська, 2, 65082, Одеса,
e-mail: ndl_lepikh@onu.edu.ua

Реферат

Розроблено установку фізичного моделювання процесів лазерної локації з урахуванням аерозольних завадових явищ природного і штучного походження та активного фонового засвічення. Установка моделює процеси виявлення і розпізнавання об'єкта лазерною інформаційно-вимірною системою (ЛІВС) в умовах зовнішніх дестабілізуючих чинників, перешкод в атмосферному каналі.

Наведено опис структури, принципу дії та технічні характеристики установки, що створена для досліджень ЛІВС. Представлено результати амплітудних, просторово-часових оптичних характеристик ряду типових об'єктів техніки з різними покриттями на довжині хвилі 905 нм. Проведено експериментальні вимірювання точностних характеристик ЛІВС дистанційного зондування об'єктів імпульсним лазерним випромінюванням та дано оцінку ефективності роботи ЛІВС. В установці проводиться визначення індикатриси розсіяння з урахуванням завадових явищ при дистанційному зондуванні та оцінка статистичного розподілу амплітуди сигналу, відбитого від об'єкту. Установка дозволяє створити базу даних по відбивним характеристикам об'єктів, просторово-розподілених перешкодам, прозорості і турбулентності атмосфери, а також по елементам ЛІВС і параметрам режимів їх роботи, включаючи тип модуляції сигналів.

Ключові слова: фізичне моделювання, лазерна інформаційно-вимірною системою, атмосферний канал, об'єкт, дестабілізуючі чинники.

**ПРОФЕСОР ВІТАЛІЙ СТІХА:
штрихи до портрету фізика
(до 90-річчя від дня народження)**

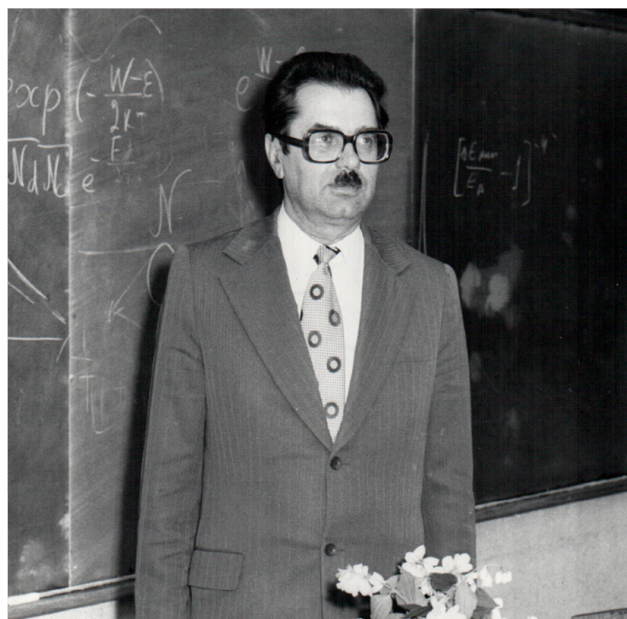
«Найважливішою» наукою ХХ століття була, безумовно, фізика (це вже ХХІ століття дедалі більше робиться добою наук про живе). А тим розділом фізики, який найбільше змінив щоденне життя, давши людям комп'ютери й побутову електроніку, була фізика напівпровідників — маловивчених ще кілька десятиліть тому матеріалів, які сильно змінюють свої властивості під дією зовнішніх впливів. Серед тих, хто творив цей новий розділ науки в Україні, помітне місце належить професорові Віталію Стрісі — науковцеві, педагогу, громадському діячеві й батькові автора цих рядків.

Батьків рід походив із села, де ніколи не було кріпаків

30 травня 1931 року в родині студентки-геологині Наталі Бурчик та молодого інженера Іларіона Стріхи народився син Віталій. Це сталося в Києві, хоч батько й мати майбутнього вченого народилися в старовинному, позначеному ще на карті Боплана селі Хоцьки за 25 верст від Переяслава в бік Золотоноші (тоді це була ще Полтавська губернія). Хоцьки славилися тим, що тут ніколи не було панщини й кріпаків (у родинному архіві збереглися датовані 1898 роком документи «козака Опанаса Стріхи», Іларіонового батька).

Найбільший вплив на формування маленького Віталія мала, очевидно, його бабуся по мамі — Ганна Терентіївна Бузницька-Бурчик. Ще 1908 року вона 16-літньою склала екстерном у переяславській жіночій гімназії іспити, які давали право на посаду «народної вчительки» (збереглася її тодішня світлина, засвідчена печаткою гімназії на червоному сургучі), й відтоді упродовж понад півстоліття вчителювала — спочатку в церковнопарафіяльних і земських школах Переяславщини, потім — у Києві.

Тут у її біографії значилася й робота вчителькою молодших класів у «Першій трудшкoлі імені Тараса Шевченка» — саме тій, де директорував визначний український педагог



**Проф. Стріха Віталій Іларіонович
(під час лекції)**

Володимир Дурдуківський, і з якої «органами» було зроблено один з головних осередків «Спілки визволення України». 1929 року було заарештовано й Ганну Терентіївну. На щастя, у схему ГПУ тоді вона, очевидно, «не вписалася»: на сумнозвісний процес 1930 року в Харківській опері «випускали» дітей дворян і священників. Ганна Бурчик була із заможного, але козацького роду. Тож по кількох тижнях у Лук'янівській тюрмі її випустили. Дивом пережила вона й репресії 1930-х.

Цікавою й талановитою людиною був і її чоловік, дід майбутнього вченого, Андрій Овратимович Бурчик. Походив він із села Андруші (пів століття тому воно зникло під хвилями Канівського моря) і пам'ятав розповіді свого діда Дениса про зустрічі з Тарасом Шевченком, який відвідував Андруші 1845-го. (Цікаво, що про зустрічі Шевченка з селянином Денисом Бурчиком, який знав безліч народних пісень та переказів, оповідає і невтомний дослідник української старовини Михайло Сікорський у своїй книжці «На землі Переяславській»; я збирався, але, на жаль, так і не встиг запитати

в Михайла Івановича: звідки про цей сюжет довідався він?).

Андрій Бурчик самотужки вивчився на бухгалтера і був причетний до перших років роботи знаменитого Московського художнього театру (в родині довго зберігався подарований йому славетним режисером Немировичем-Данченком срібний портсигар). Мама Ганни Терентіївни не давала благословення на шлюб 18-річної дочки-вчительки (судячи зі світлини – красуні з одухотвореним тонким обличчям) зі старшим на 12 років парубком із досвідом столичного життя — але той повіз наречену вінчатися в Андруші всупереч материній волі, приїхавши в Хоцьки мотоциклетом (1910 року то була, можливо, перша поява мотоциклета на сільських вулицях).

Пишу про це, щоб наголосити: майбутній фізик зростав у родині, де імена Шевченка, Дурдуківського, Єфремова і Немировича-Данченка були частиною родинної історії, а пам'ять про часи УНР (установи якої розбудувала на Переяславщині й Ганна Бузницька-Бурчик) була ще надто свіжа.

Початок шляху

Звичайно, школяреві Віталієві пощастило: таку родину легко могли б поглинути репресії 1930-х, але завдяки якомусь незбагеному сприятливому випадкові цього не сталося. В усьому ж іншому йому жилося, як і всім одноліткам із незаможної Лук'янівки, що була тоді міською околицею.

До війни Віталій устиг закінчити три класи. У вересні 1941-го він разом із мамою-геологинею, бабусею-вчителькою та дідусем-бухгалтером опиняється на окупованій території. Десятирічний хлопчик стає свідком вибухів на Хрещатику (за наказом комендатури саме ніс туди з дідусем здавати радіоприймач, але, на щастя, не встиг дійти). Неподалік по вулиці Артема йшли колони приречених до Бабиного Яру...

Переживши окупацію, в 19 років Віталій закінчує школу із золотою медаллю, яка дала право вступити на фізичний факультет Київського університету. 1953 року його було переведено на новостворений радіофізичний

факультет — зорієнтований на обслуговування новітніх напрямків науки й техніки, а тому настільки секретний, що навіть кафедри на ньому певний час позначалися цифрами. Кафедру, що пізніше отримала назву «фізики напівпровідників», очолив засновник напівпровідникової науки в Україні Вадим Євгенович Лашкар'юв.

Саме він залишає Віталія Стріху разом із його однокурсником Володимиром Литовченком для наукової роботи в університеті. 1957 року з'являються друком перші серйозні статті вчорашнього студента. Паралельно формується ще одне захоплення, яке згодом учений пронесе крізь усе життя. Це — далекі мандри. У серпні 1957-го молодий інженер-дослідник вирушає в першу велику туристичну подорож через Кавказький хребет.

На 1958 рік припадає ще одна подія «на все життя» — знайомство з 22-річною студенткою медінституту Надією Гулою. У липні Віталій і Надія разом подорожують човнами річкою Білою на Уралі, а 20 вересня беруть шлюб, який протривав понад 40 років. У їхній «науковій» родині (разом з ними проживали аж до початку 1970-х ще й Надіїні батьки-біохіміки: академік Максим Гулий і професор Марія Коломійченко) 60 років тому народився автор цих рядків. А тому самою атмосферою, що панувала навколо від дитинства, я теж був «приречений» піти в науку...

Уже в захищеній 1962 року кандидатській дисертації повною мірою проявилися риси Віталія Стріхи як науковця. Насамперед — це надзвичайна скрупульозність у проведенні експерименту, бажання й уміння дослідити всі можливі ситуації. По-друге, це добре володіння математичним апаратом. І нарешті, це зорієнтованість на практичні завдання, які ставив швидкий розвиток напівпровідникової техніки.

Варта наслідування й методичність, з якою учений працював з літературою. У його великій науковій бібліотеці практично до кожної монографії було вкладено кілька аркушків, де ретельно занотовано основні думки (або ж вказано на можливі помилки) автора чи авторів. А з кожної конференції неодмінно привозився зошит з акуратно законспектованими доповідями.

Окремо слід відзначити і наукову самостій-

ність Віталія Стріхи. Отримавши від Вадима Лашкарьова тему кандидатської, все подальше він зробив сам, і академік Лашкарьов, дуже скрупульозний у таких питаннях, вирішив, що його внесок у роботу недостатній, щоб назвати себе її науковим керівником. А наукового консультанта своєї докторської Віталій Стріха взагалі не мав від початку.

Професор Стріха і його школа

1963 року подала до захисту кандидатську дисертацію Юй Лі-шень, перша аспірантка 32-річного тоді кандидата наук (пізніше вона стала професором Пекінського університету). Розпочалося формування наукової школи Віталія Стріхи (згодом вона об'єднуватиме понад 30 кандидатів і близько 10 докторів наук, чії дисертації буде виконано під його формальним чи неформальним керівництвом).

1968 року у видавництві «Наукова думка» виходить друком піонерська за змістом колективна монографія за редакцією професора Василя Ляшенка «Електронні явища на поверхні напівпровідників». Віталій Стріха написав для неї великий розділ «Вплив поверхневих станів на електричні властивості контакту метал-напівпровідник». 1970 року йому разом з чотирма іншими авторами монографії було присуджено Державну премію Української РСР у галузі науки і техніки. Цю премію було встановлено лише за рік перед тим, і авторитет її був тоді надзвичайно високий.

А 1969 року на засіданні вченої ради КДУ Віталій Стріха блискуче захищає докторську дисертацію «Дослідження фізичних процесів у контакті метал-напівпровідник». У збереженій стенограмі захисту звертає на себе увагу виступ директора Всесоюзного НДІ криогенної техніки професора В. Алфєєва. Із нього зрозуміло, наскільки важливою була ця робота для оборонного комплексу колишнього СРСР. Адже ще в 1950-ті доводилося міняти кристалічні детектори на радіолокаційних станціях по кілька разів на добу. Після реалізації пропозицій Віталія Стріхи, що враховували фізику реального контакту з зазором та поверхневими станами (значення зазору першим, здається, зрозумів Соломон Пекар, але послідовної тео-

рії для струмів через нього так і не побудував) надвисокочастотні детектори стали на порядки надійнішими...

У 1975 р. професор Стріха очолює створену Вадимом Лашкарьовим кафедру фізики напівпровідників столичного університету, якою керує понад два десятиліття. Тут на початку 1980-х років він розгортає інтенсивні роботи зі створення ефективних напівпровідникових перетворювачів сонячної енергії на електричну. Вже за кілька років до катастрофи на ЧАЕС учений наважився публічно опонувати офіційно прийнятій тезі про «безальтернативність» атомної енергетики, ставши фактично першим активним пропагандистом фотовольтаїки в Україні.

1987 року приходить і зацікавлення абсолютно новою тематикою — біосенсорами. Ці пристрої, що поєднують переваги напівпровідникових структур із чутливістю біологічних молекул, сьогодні незамінні при визначенні стану довкілля, аналізі харчів, діагностиці хвороб тощо. А тоді технології біосенсорів робили лише перші кроки. Ініціатива появи першого огляду з фізики біосенсорів українською мовою, надрукованого у «Віснику АН УРСР» (№2 за 1988 р.) належить саме професору Стрісі. На 1991 рік припадає початок його активних наукових контактів з «Еколь централь» (Ліон, Франція) в межах спільних робіт із сенсорної тематики. Своєрідний науковий «міст» Ліон — Київ допомагає його кафедрі пережити колапс початку 1990-х.

Зірки і терни професора Стріхи

Майже 40 років у статусі «вождя туристського народу» водив Віталій Стріха туристичну групу зі сталим «кістяком» складу й власними усталеними традиціями найскладнішими байдарковими маршрутами колишнього СРСР. У його «доробку» – порожисті річки Карелії, легендарний серед туристів Саянський коридор Єнісею (сьогодні він опинився вже на дні водосховища Саяно-Шушенської ГЕС, яка тоді лише будувалася), верхів'я Лени й пониззя Обі. Завдяки хистові й передбачливості керівника групи всі ці походи було пройдено без жодної позаштатної ситуації.

Але основною справою життя для професора Стріхи були наука й підготовка наукової молоді. З 1984 р. по 1990 р. він працює на посаді проректора «шевченківського» університету – спершу з навчальної, а потім з наукової роботи. Цікавий штрих – ще у 1987 р. від дав «явочним порядком» дозвіл приймати до захисту дисертації з гуманітаристики, написані українською мовою. Документи союзного ВАК цього не припускали, але вже починалися нові часи.

Упродовж 1970-80-х професор Стріха намагався ретельно дотримуватися неписаних, але чітких правил наукової ієрархії, що для вченого такого рівня передбачали змагання за статус члена-кореспондента АН УРСР. Для цього він мав три сформовані наукові напрямки з результатами світового рівня. Але незалежний за вдачею університетський професор без впливових «покровителів» виявився зайвим в «іграх» академічних угруповань: щоразу обирали нехай слабших, але «своїх». (Вже через багато років, коли батька давно не було серед живих, визначний фізик ХХ століття Віктор Бар'яхтар, коли ми говорили про щось зовсім інше, раптом зізнався мені, що йому досі незручно через те, що професора Стріху так і не було обрано до складу відділення фізики АН).

Відчувши на собі несправедливість усталеної системи, відверто дискримінаційної щодо учених з університетів, у 1990-х Віталій Стріха бере активну участь у процесах демократизації української науки. Разом із професорами Київського університету, геологом Миколою Дробноходом та фізиком Юрієм Чутовим, він формує ініціативну групу зі створення АН вищої школи України — наукової організації нового типу, заснованої провідними університетськими вченими «знизу», на демократичних засадах.

27 грудня 1992 року на Установчих зборах Віталій Стріху одноголосно обрано першим президентом АН ВШ України (у 1995 і 1998 роках його переобирають на цю посаду ще двічі). До кінця життя розбудова Академії забирає левову частку його часу і зусиль: він неодноразово звертається до органів влади і посадових осіб у справі підтримки й реформування української науки та вищої освіти,

виступає в ЗМІ, їздить по регіонах, гуртуючи там університетських учених. За його життя АН ВШ України була не просто престижним науковим клубом: у роботі її наукових відділень брали активну участь кілька тисяч докторів і кандидатів наук, і вона реально впливала на процес загальної координації досліджень в університетах.

Проте сил і здоров'я меншає. А демократичний імпульс перших років незалежності поволі вигасає. Дедалі авторитарнішою робиться й атмосфера в рідному університеті, де ректорові відверто не подобається колишній проректор із його інтелігентністю й загостреним почуттям власної гідності.

У вересні 1998-го вчений встигає відсвяткувати разом із помітно постарілими друзями-туристами 40-річчя весілля. 19 грудня загальні збори АН ВШ України обирають Віталія Іларіоновича президентом на третій трирічний термін. 25 грудня він вирушає до санаторію «Конча-Заспа» під Києвом, де зустрічає Новий рік разом з дружиною і найближчим другом по туристичних подорожах, гідромеханіком Віктором Грінченком, із яким веде нескінченні дискусії щодо шляхів розвитку науки, України й світу.

Тут, у санаторії, 8 січня 1999 року він пише на позір жартівливу «Конча-Заспівську відповідь дружині на зауваження про те, що нічого в житті не зроблено»:

«Що ж зроблено:

1. Згуртована туристська група, з якою пройдено понад 40 походів (близько 10 тисяч кілометрів).

2. Створена унікальна кафедра (11 докторів наук, 4 державні премії, звання «зразкової» та інші відзнаки).

3. Створена наукова школа з контактних явищ (5 докторів, 30 кандидатів, 12 монографій, 5 всесоюзних конференцій тощо).

4. Прочитані курси лекцій для більш як 10 000 студентів (понад 20 000 лекцій).

5. Задумана й організована Академія наук вищої школи України (418 академіків, 2800 докторів, 13 000 кандидатів).

6. Організована лінія Україна — Франція (наукова робота, підготовка спеціалістів тощо).

7. *Організовані нові наукові напрямки (біо-сенсори, пористий кремній як матеріал для сенсорики).*

8. *Народив сина, здатного примножити цей список».*

Відпустка закінчилася, почався новий семестр. 1 лютого 1999 року на засіданні Вченої ради КНУ ім. Т. Шевченка мало розглядатися питання про присудження Віталію Стрісі звання «Почесний професор Київського університету» (за всіма формальними показниками, як засвідчила своїм висновком Рада старійшин університету, учений набагато перевищував встановлені для цього звання критерії). Однак без пояснення причин ректор Віктор Скопенко відклав розгляд питання. Паралельно він зажадав від АН вищої школи України звільнити надану їй раніше кімнату на четвертому поверсі «червоного корпусу» КНУ.

Це все не минуло дарма. У ніч із 6 на 7 лютого у вченого стався інфаркт, його було госпіталізовано з песимістичним прогнозом. Вранці 8 лютого внаслідок інтенсивної терапії його стан трохи покращав. Він працював над рукописом чергової наукової статті, на звороті останньої сторінки рукопису залишив записку для дружини: *«Надю, у мене все гаразд. Навіть вдалося трохи розсмоктати інфаркт».* Далі йшло прохання до сина регулярно забирати передплачену через книгарню «Академкнига» газету «День», а до учня Василя Ільченка — провести завтрашній семінар. На жаль, ця записка виявилася останньою — ввечері вченого не стало.

Яким він був

..Професор Віталій Стріха був живою людиною, здатною і захоплюватися, і помилятися. Фанатично любив риболовлю і був вправним водієм. Так само гаряче любив нову техніку. Сівши за комп'ютер уже в 60 років, устиг стати справжнім хакером і залюбки гуляв Інтернетом (коли цей Інтернет в Україні тільки-но починався). Був ніжним і чуйним дідусем для онуки Ярослави. Цікавився політикою.

Як керівник був не жорстким, але ефективним, умів тримати дисципліну не примусом, а цікавістю до спільної справи. Про це свідчить



Проф. Стріха Віталій Іларіонович разом із сином Максимом Стріхою

не лише досвід керівництва кафедрою та лабораторією, а й пройдені, як я вже згадував, без жодної критичної ситуації часом дуже складні, а то й просто небезпечні байдаркові маршрути. Досі пригадую Великий порог на Єнісеї з ревищем хвиль, над якими на скелях видніли написи в пам'ять про тих, хто там загинув. Те, що він узяв у цей похід 14-річного тоді сина, говорить не про безросудну відвагу, а про спокійну і розважливу впевненість.

У публічних ситуаціях він був стриманим, хоч насправді болісно переживав хамство і несправедливість. Не належав до трибунних борців, але свої переконання обстоював послідовно і доволі ефективно (свідчення — авторитет і вплив, який мала за його життя очолювана ним Академія).

З погляду «офіційної» ієрархізованої науки професор Віталій Стріха не належав до першого ешелону: не був обраний до НАН, очолював громадську структуру з назвою

«АН вищої школи», до якої «справжні безсмертні» ставилися здебільшого напівіронічно (хоч були й винятки – активну участь у роботі й заходах АН ВШ довгі роки брали Костянтин Ситник, Михайло Гасик, Богдан Пташник, беруть ще й нині Ярослав Яцків, Віктор Грінченко, Віль Бакіров, Анатолій Загнітко та ще кілька помітних академіків і член-корів НАН, що представляють зовсім різні сфери знань).

Але за Віталієм Стріхою — 12 монографій та підручників і близько 300 статей, значна частина з яких досі є «класичними». За ним — розвинута теорія реального контакту метал-напівпровідник, яка мала велике значення для розвитку НВЧ електроніки, піонерські роботи з фотоперетворювачів на аморфному кремнії, започаткований в Україні напрямок біосенсоріки. (А ще ж існували перспективні напрямки, де Віталій Стріха зробив кілька перших кроків, віддавши потім їх учням; як-от спін-залежна рекомбінація чи контакт напівпровідник — високотемпературний надпровідник).

...2008 року роботу Віталія Стріхи «Випрямляючі властивості контакту метал-напівпровідник», уперше надруковану у «Віснику КДУ ім. Т. Шевченка» за 1967 рік, було вміщено в спецвипуску «Українського фізичного журналу», виданого до 90-річчя НАН України, серед 35 найвидатніших праць українських фізиків за всі роки. За започаткований ним цикл робіт

з біосенсоріки в 2016 році було присуджено Золоту медаль імені Володимира Вернадського НАН України. (Щоправда, звісно, що не йому; а при урочистому врученні цієї найвищої академічної відзнаки на сесії НАН університетського професора, за чією ініціативою і з чийого огляду в академічному «Віснику» на початку 1988-го вся ця діяльність почалася, і за чієї найактивнішої участі тривала й розгорталася впродовж першого десятиліття, ніхто й не згадав. Чесно кажучи, сидячи тоді в президії сесії в іпостасі заступника міністра освіти і науки, я не дуже цьому й здивувався).

Зате через рік на рідному радіофізичному факультеті за присутності тоді ще живого патріарха нашої фізики 92-річного Миколи Находкіна було відкрито скромну меморіальну дошку професорові Стрісі — одному з піонерів напівпровідникової науки в Україні. А заснована ним АН вищої школи щороку проводить Академічні читання пам'яті Віталія Стріхи з участю провідних учених України. У лютому цього року вони відбулися вже у *вісімнадцяте*. Якихось аналогів проведення такого рівня наукової зустрічі громадською структурою без жодної копійки державної підтримки упродовж майже двох десятиліть просто немає. А це означає, що професор Стріха недаремно вірив у те, що заснована ним Академія є важливою і доброю справою.

*Максим СТРІХА,
доктор фізико-математичних наук,
професор, дійсний член АН вищої школи
України*

ІНФОРМАЦІЯ ДЛЯ АВТОРІВ. ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ У ЖУРНАЛ

Журнал «Сенсорна електроніка і мікросистемні технології» публікує статті, короткі повідомлення, листи до Редакції, а також коментарі, що містять результати фундаментальних і прикладних досліджень, за наступними напрямками:

1. Фізичні, хімічні та інші явища, на основі яких можуть бути створені сенсори
2. Проектування і математичне моделювання сенсорів
3. Сенсори фізичних величин
4. Оптичні, оптоелектронні і радіаційні сенсори
5. Акустoeлектронні сенсори
6. Хімічні сенсори
7. Біосенсори
8. Наносенсори (фізика, матеріали, технологія)
9. Матеріали для сенсорів
10. Технологія виробництва сенсорів
11. Сенсори та інформаційні системи
12. Мікросистемні та нанотехнології (MST, LIGA-технологія та ін.)
13. Деградація, метрологія і сертифікація сенсорів

Журнал публікує також замовлені огляди з актуальних питань, що відповідають його тематиці, поточну інформацію – хроніку, персоналії, платні рекламні повідомлення, оголошення щодо конференцій.

Основний текст статті повинен відповідати вимогам Постанови Президії ВАК України від 15.01.2003 р. №7-05/1 (Бюлетень ВАК України 1, 2003 р.) і бути структурованим. Матеріали, що надсилаються до Редакції, повинні бути написані з максимальною ясністю і чіткістю викладу тексту. У поданому рукописі повинна бути обґрунтована актуальність розв'язуваної задачі, сформульована мета дослідження, міститися оригінальна частина і висновки, що забезпечують розуміння суті отриманих результатів і їх новизну. Автори повинні уникати необґрунтованого введення нових термінів і вузькопрофільних жаргонних висловів.

Редакція журналу просить авторів при направленні статей до друку керуватися наступними правилами:

1. Рукописи повинні надсилатися у двох примірниках українською, або російською, або англійською мовою і супроводжуватися файлами тексту і малюнків на CD. Рукописи, які пропонуються авторами з України або країн СНД до видання англійською мовою обов'язково доповнюються україномовною або російськомовною версією. Електронна копія може бути надіслана електронною поштою.

2. Прийнятні формати тексту: MS Word (rtf, doc).

3. Прийнятні графічні формати для рисунків: EPS, TIFF, BMP, PCX, WMF, MS Word і MS Graf, JPEG. Рисунки створені за допомогою програмного забезпечення для математичних і статистичних обчислень, повинні бути перетворені до одного з цих форматів.

4. На статті авторів з України мають бути експертні висновки про можливість відкритого друку.

Рукописи надсилати за адресою:

Лепіх Ярослав Ілліч, Заст. гол. редактора, Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, МННФТЦ (НДЛ-3), вул. Дворянська, 2, Одеса, 65082, Україна.

Телефон / факс +38(048) 723-34-61,

E-mail: semst-journal@onu.edu.ua,

http://semst.onu.edu.ua

Здійснюється анонімне рецензування рукописів статей.

Правила підготовки рукопису:

Рукописи повинні супроводжуватися офіційним листом, підписаним керівником установи, де була виконана робота. Це правило не стосується робіт представлених авторами із закордону чи міжнародними групами авторів.

Авторське право переходить Видавцю.

Титульний аркуш:

1. PACS і Універсальний Десятковий Код Класифікації (УДК) (для авторів із країн СНД) — у верхньому лівому куті. Допускається декілька відділених комами кодів. Якщо ніякі коди класифікації не позначені, код(и) буде(-уть) визначено Редакційною Колегією.

2. Назва роботи (по центру, прописними літерами, шрифт 14pt, жирно).

3. Прізвище (-а) автора(-ів) (по центру, шрифт 12pt).

4. Назва установи, повна адреса, телефони і факси, e-mail для кожного автора, нижче, через один інтервал, окремим рядком (по центру, шрифт 12pt).

5. Анотація: до 1000 символів.

6. Ключові слова: їхня кількість не повинна перевищувати восьми слів. В особливих випадках можна використовувати терміни з двома — чи трьома словами. Ці слова повинні бути розміщені під анотацією і написані тією самою мовою.

П.п. 2,3,4,5,6 послідовно викласти українською, англійською і російською мовами.

Для авторів з закордону, які не володіють українською або російською мовами, пп. 2-5 викладаються англійською мовою.

7. До кожного примірника статті додаються реферати українською та англійською мовами (кожен реферат на окремому аркуші). Особливу увагу слід приділяти написанню резюме статті англійською мовою. Для цього доцільно користуватися послугами кваліфікованих спеціалістів-лінгвістів з подальшим науковим редагуванням тексту автором(-ами). Перед словом «реферат» необхідно написати повну назву статті відповідною мовою, УДК, прізвища та ініціали авторів, назви установ. Реферат обсягом 200-250 слів має бути структурованим: мета (чітко сформульована), методи дослідження, результати дослідження (стисло), узагальнення або висновки.

Після тексту реферату з абзацу розміщуються ключові слова.

8. Текст статті повинен бути надрукований через 1,5 інтервали, на білому папері формату А4. Поля: зліва - 3см, справа - 1,5см, вверху і знизу - 2,5см. Шрифт 12pt. Підзаголовки, якщо вони є, повинні бути надруковані прописними літерами, жирно.

Рівняння повинні бути введені, використовуючи MS Equation Editor або MathType. Роботи з рукописними вставками не приймаються. Таблиці повинні бути представлені на окремих аркушах у форматі відповідних текстових форматів (див. вище), чи у форматі тексту (з колонками, відділеними інтервалами, комами, крапкам з комою, чи знаками табулювання).

9. У кінці тексту статті указати прізвища, імена та по батькові усіх авторів, поштову адресу, телефон, факс, e-mail (для кореспонденції).

10. Список літератури повинен бути надрукований через 1,5 інтервали, з літературою, пронумерованою в порядку її появи в тексті. Бібліографія друкується лише латиницею (кирилиця подається в транслітерації). Порядок оформлення літератури повинен відповідати вимогам ВАК України, наприклад:

[1]. I.M. Cidilkov skii. *Elektrony i dyrki v poluprovodnikah*. Nauka, M. 450 s. (1972).

[2]. J.A. Hall. *Imaging tubes*. Chap. 14 in *The Infrared Handbook*, Eds. W.W. Wolfe, G.J. Zissis, pp. 132-176, ERIM, Ann Arbor, MI (1978).

[3]. N. Blutzer, A.S. Jensen. *Current readout of infrared detectors* // *Opt. Eng.*, 26(3), pp. 241-248 (1987).

11. Підписи до рисунків і таблиць повинні бути надруковані в рукописі з двома пробілами після списку літератури. Виносок, якщо можливо, бажано уникати.

Приймаються тільки високоякісні рисунки. Написи і символи повинні бути надруковані усередині рисунку. Негативи, слайди, і діапозитиви не приймаються.

Кожен рисунок повинен бути надрукований на окремому аркуші і мати розмір, що не перевищує 160x200 мм. Для тексту на рисунках використовуйте шрифт 10pt. Одиниці виміру повинні бути позначені після коми

(не в круглих дужках). Усі рисунки повинні бути пронумеровані в порядку їх появи в тексті, з частинами позначеними як (а), (б), і т.д. Розміщення номерів рисунків і напису усередині малюнків не дозволяються. Зі зворотної сторони, напишіть олівцем назву, прізвище(а) автора(-ів), номер малюнка і позначте верх стрілкою.

Фотографії повинні бути оригінальними. Кольоровий друк можливий, якщо його вартість сплачується авторами чи їх спонсорами.

12. Стаття має бути підписана автором (усіма авторами) з зазначенням дати на останній сторінці.

Автори несуть повну відповідальність за бездоганне мовне оформлення тексту, особливо за правильну наукову термінологію (її слід звіряти за фаховими термінологічними словниками).

13. Датою надходження статті вважається день, коли до редколегії надійшов остаточний варіант статті після рецензування.

Після одержання коректури статті автор повинен виправити лише помилки (чітко, синьою або чорною ручкою неправильно закреслити, а поряд з цим на полі написати правильний варіант) і терміново відіслати статтю на адресу редколегії електронною поштою.

Підпис автора у кінці статті означає, що автор передає права на видання своєї статті редакції. Автор гарантує, що стаття оригінальна; ні стаття, ні рисунки до неї не були опубліковані в інших виданнях.

Відхилені статті не повертаються.

До уваги авторів

Міжнародна агенція ISSN встановила скорочену назву нашого журналу «**Sens. elektron. mikrosist. tehnol.**» Просимо Вас у своїх посиланнях і бібліографічних даних статей використовувати саме таку назву оскільки по ній буде здійснюватися посилання на Вашу статтю.

INFORMATION FOR AUTHORS

THE REQUIREMENTS ON PAPERS PREPARATION

Journal «Sensor Electronics and Microsystem Technologies» publishes articles, brief messages, letters to Editors, and comments containing results of fundamental and applied researches, on the following directions:

1. Physical, chemical and other phenomena, as the bases of sensors
2. Sensors design and mathematical modeling
3. Physical sensors
4. Optical, optoelectronic and radiation sensors
5. Acoustoelectronic sensors
6. Chemical sensors
7. Biosensors
8. Nanosensors (physics, materials, technology)
9. Sensor materials
10. Sensors production technologies
11. Sensors and information systems
12. Microsystems and nano- technologies (MST, LIGA-technologies et al.)
13. Sensor's degradation, metrology and certification

The journal publishes the custom-made reviews on actual questions appropriate to the mentioned subjects, current information – chronicle, special papers devoted to known scientists, paid advertising messages, conferences announcements.

The basic article text should meet the SAC Ukraine Presidium Decree requirements from 15.01.2003 № 7-05/1 (SAC Bulletin № 1, 2003) and be structured. The materials sent to Editors, should be written with the maximal text presentation clearness and accuracy. In the submitted manuscript the actuality of problem should be reflected, the purpose of the work should be formulated. It must contain an original part and conclu-

sions providing the received results essence and their novelty understanding. The authors should avoid the new terms and narrow profile jargon phrase unreasonable introduction.

Journal Edition asks authors at a direction of articles in a print to be guided by the following rules:

1. Manuscripts should be submitted in duplicate in Ukrainian, English, or Russian, a hard copy and supplemented with a text file and figures on a CD. Manuscripts which are offered by authors from Ukraine or CIS countries to the edition in English are necessarily supplemented by Ukrainian or Russian version. An electronic copy may be submitted by e-mail.
2. Acceptable text formats: MS Word (rtf, doc).
3. Acceptable graphic formats for figures: EPS, TIFF, BMP, PCX, CDR, WMF, MS Word and MS Graf, JPEG. Figures created using software for mathematical and statistical calculations should be converted to one of these formats.
4. For articles of authors from Ukraine there should be expert conclusions about an opportunity of an open print.

Manuscripts should be sent to:

Lepikh Yaroslav Illich, The Vice Editor, Odesa National I.I. Mechnykov University, ISEPTC (RL-3), str. Dvoryanskaya, 2, Odesa, 65082, Ukraine.

Phone/fax +38(048) 723-34-61,

E-mail: semst-journal@onu.edu.ua,

http://semst.onu.edu.ua

Manuscripts of articles anonymous reviewing is carried out

The manuscript preparation rules:

The manuscripts should be supplemented with the Official letter signed by a chief manager of the institution where the work was performed. This rule does not apply to papers submitted by authors from abroad or international groups of authors.

Copyright transfer to the Publisher.

Title Page:

1. PACS and Universal Decimal Classification code (for authors from CIS) in the top left corner. Several comma-separated codes are allowed. If no classification codes are indicated, the code(s) will be assigned by the Editorial Board.

2. Title of the paper (central, capital, bold, 14pt).

3. Name (-s) of the author(-s) below, in one space (central, normal face, 12pt).

4. Name of affiliated institution, full address, phone and fax numbers, e-mail addresses (if available) for each author below, in one space (central, normal face, 12pt).

5. Abstract: up to 1000 characters.

6. Keywords: its amount must not exceed eight words. In the specific cases it is acceptable to use two- or three-word terms. These words must be placed under the abstract and written in the same language.

Items 2,3,4,5,6 must be presented in series in Ukrainian, English and Russian languages.

For authors from abroad which do not know Ukrainian or Russian languages, items 2-5 may be presented only in English.

7. To each copy of the article abstracts in Ukrainian and the English language are applied (each abstract on a separate sheet). The special attention should be given to the writing of the article summary in English. For this purpose it is expedient to use the qualified experts - linguists with the further scientific editing the text by the author (-s). Before the word "abstract" it is necessary to write the full article name by the appropriate language, UDC, surnames and the initials of the authors, names of affiliated institutions. The abstract in volume of 200-250 words must be structured: the purpose (precisely formulated), research methods and results (shortly), generalizations or conclu-

sions. After the text of the abstract from the item key words are placed.

8. Article text should be printed 1,5-spaced on white paper A4 format with a 12pt, margins: left — 3sm, right — 1,5, upper and lower — 2,5sm. Titles of the sections if it is present should be typed bold, capitals.

Equations should be entered using MS Equation Editor or MathType. Papers with handwritten equations are not accepted. Notations should be defined when the first appearing in the text.

Tables should be submitted on separate pages in the format of appropriate text formats (see above), or in the text format (with columns separated by interval, commas, or tabulation characters).

9. At the article text end one must indicate surnames, names and patronymics of all authors, the mail address, the phone, a fax, e-mail (for the correspondence).

10. List of references should be 1,5-spaced, with references numbered in order of their appearance in the text. The bibliography is printed only by the roman type (cyrillics represents in transliteration).

The literature registration order should conform to DAS of Ukraine requirements, for example:

[1]. I.M. Cidilkov skii. *Elektrony i dyrki v poluprovodnikah*. Nauka, M. 450 s. (1972).

[2]. J.A. Hall. *Imaging tubes*. Chap. 14 in *The Infrared Handbook*, Eds. W.W. Wolfe, G.J. Zissis, pp. 132-176, ERIM, Ann Arbor, MI (1978).

[3]. N. Blutzer, A.S. Jensen. *Current readout of infrared detectors // Opt. Eng.*, 26(3), pp. 241-248 (1987).

11. Figures and tables captions should be printed in the manuscript double-spaced after the list of references. Footnotes should be avoided if possible.

Only high-quality pictures can be accepted. Inscriptions and symbols should be printed inside picture. Negatives, and slides are not accepted.

Each figure should be printed on a separate page and have a size not exceeding 160x200 mm. For text inside figures, use 10pt. Measurement

units should be indicated after a comma (not in blankets). All figures are to be numbered in order of its appearance in the text, with sections denoted as (a), (b), etc. Placing the figure numbers and captions inside figures is not allowed. On the backside, write with a pencil the paper title, author(s) name(s) and figure number, and mark the topside with an arrow.

Photographs should be submitted as original prints. Color printing is possible if its cost is covered by the authors or their sponsors.

12. The article must be signed by author (all authors) with the date indication on the last page.

Authors bear full responsibility for irreproachable language make out of the text, especially for a correct scientific terminology (it should be verified under terminological dictionaries of the appropriate speciality).

13. The date of article acceptance is that one when the final variant comes to the publisher after a prepublication review.

After obtaining the proof sheet the author should correct mistakes (clearly cancel incorrect variant with blue or black ink and put the correct variant on border) and send urgently the revised variant to the editor by e-mail.

Author's signature at the article end vouches that author grants a copyright to the publisher. Author vouches that the work has not been published elsewhere, either completely, or in part and has not been submitted to another journal.

Not accepted manuscripts will not be returned.

To author attention

International agency ISSN has established our Journal shortcut – «**Sens. elektron. mikrosist. tehnol.**» We ask you in your references and article bibliographic dates use such name as on it the reference to your article will be carried out.

Комп'ютерне верстання – С. О. Остапенко

Підп. до друку 23.03.2021. Формат 60×84/8.
Ум.-друк. арк. 7,56. Тираж 300 пр.
Зам. № 2239.

Видавець і виготовлювач
Одеський національний університет імені І. І. Мечникова

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4215 від 22.11.2011 р.

Україна, 65082, м. Одеса, вул. Єлісаветинська, 12
Тел.: (048) 723 28 39