

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, № 4**

**SENSOR
ELECTRONICS
AND MICROSYSTEM
TECHNOLOGIES
2021 – VOL. 18, No. 4**

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 “Djerele»
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 № 5 від 21 грудня 2021 р.

Publishes on the resolution of Odesa
I. I. Mechnykov National University
Scientific Council
Transaction No. 5, 21.12.2021

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

Фізичні, хімічні та інші явища, на основі яких можуть бути створені сенсори Physical, chemical and other phenomena, as the bases of sensors

Ya. M. Olikh, O. E. Belyaev, Ya. I. Lepikh
METHOD OF EXCITATION OF QUASI
LONGITUDINAL ACOUSTIC WAVES
IN LAYERED STRUCTURES..... 4

Я. М. Оліх, О. Є. Беляєв, Я. І. Леніх
МЕТОД ЗБУДЖЕННЯ КВАЗИПОЗДОВЖ-
НИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ
У ШАРУВАТИХ СТРУКТУРАХ

Біосенсори Biosensors

*O. O. Soldatkin, V. M. Arkhipova,
I. S. Kucherenko, D. Y. Kucherenko,
S. V. Dzyadevych*
ADAPTATION OF THE PROCEDURE
OF CO-IMMOBILIZATION OF ENZYMES
WITH DIFFERENT MODIFICATIONS
OF ZEOLITES ON THE SURFACE
OF CONDUCTOMETRIC
TRANSDUCERS 11

*О. О. Солдаткін, В. М. Архипова, І. С. Куче-
ренко, Д. Ю. Кучеренко, С. В. Дзядевич*
АДАПТАЦІЯ ПРОЦЕДУРИ КОІММО-
БІЛІЗАЦІЇ ФЕРМЕНТІВ З РІЗНИМИ
МОДИФІКАЦІЯМИ ЦЕОЛІТІВ НА ПО-
ВЕРХНЮ КОНДУКТОМЕТРИЧНИХ
ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Сенсори та інформаційні системи Sensors and information systems

P. P. Fastykovsky, Ya. I. Lepikh
PORTABLE SEISMIC SYSTEMS
(OVERVIEW) 27

П. П. Фастиковський, Я. І. Леніх
ПОРТАТИВНІ СЕЙСМІЧНІ СИСТЕМИ
(ОГЛЯД)

*V. I. Santoniy, Ya. I. Lepikh,
L. M. Budianskaya, V. I. Yanko*
FORMATION OF THE OBJECT
IDENTIFICATION ZONE WITH LASER
INFORMATION-MEASURING SYSTEMS
AT SHORT DISTANCES 43

*В. І. Сантоній, Я. І. Леніх, Л. М. Будіянська,
В. І. Янко*
ФОРМУВАННЯ ЗОНИ ВИЯВЛЕННЯ
ОБ'ЄКТІВ ЛАЗЕРНИМИ ІНФОРМАЦІЙ-
НО-ВИМІРЮВАЛЬНИМИ СИСТЕМА-
МИ НА МАЛИХ ВІДСТАННЯХ

**Call for start-ups on biomolecular
electronics 53**
**Конкурс стартапів з біомолекулярної
електроніки**

**Інформація для авторів. Вимоги
до оформлення статей у журнал..... 57**

**Information for authors. The requirements
on papers preparation 60**

ФІЗИЧНІ, ХІМІЧНІ ТА ІНШІ ЯВИЩА, НА ОСНОВІ ЯКИХ МОЖУТЬ БУТИ СТВОРЕНІ СЕНСОРИ

PHYSICAL, CHEMICAL AND OTHER PHENOMENA, AS THE BASES OF SENSORS

UDC: 541.183+548.571

DOI: 10.18524/1815-7459.2021.4.248176

МЕТОД ЗБУДЖЕННЯ КВАЗИПОЗДОВЖНИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ У ШАРУВАТИХ СТРУКТУРАХ

Я. М. Оліх¹, О. Є. Беляєв¹, Я. І. Лепіх²

¹Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України,
пр. Науки 41, 03028 Київ, Україна; e-mail: jaroluk3@ukr.net

²Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр МОН і НАН України при ОНУ
імені І. І. Мечникова, ndl_lepikh@onu.edu.ua

МЕТОД ЗБУДЖЕННЯ КВАЗИПОЗДОВЖНИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ У ШАРУВАТИХ СТРУКТУРАХ

Я. М. Оліх, О. Є. Беляєв, Я. І. Лепіх

Анотація. Досліджено і проведено аналіз методичних можливостей збудження квазіпоздовжних (QL) акустичних хвиль мегагерцового частотного діапазону у шаруватих структурах GaN-on-sapphire. Для генерації і детектування QL-хвиль використано перетворювачі об'ємного типу поляризовані по товщині пластинки. Зроблено висновок, що таким методом можуть бути збуджені квазіпоздовжні хвилі (QL, quasilongitudinalmodes) – так звані хвилі Анісімікіна (AN), площа зміщень для яких локалізується в площині плівки, а напрям зміщення направлений вздовж хвильового вектора.

Ключові слова: квазіпоздовжні поверхневі акустичні хвилі, хвилі Анісімікіна, шаруваті структури

METHOD OF EXCITATION OF QUASI LONGITUDINAL ACOUSTIC WAVES IN LAYERED STRUCTURES

Ya. M. Olikh, O. E. Belyaev, Ya. I. Lepikh

Abstract. The analysis of methodological possibilities of excitation of quasi-longitudinal (QL) acoustic waves of the megahertz frequency range in layered structures GaN-on-sapphire is studied and carried out. Volume-type transducers polarized by plate thickness are used to generate and detect

© Я. М. Оліх, О. Є. Беляєв, Я. І. Лепіх, 2021

QL waves. It is concluded that quasilongitudinal modes (QL) can be excited by this method – the so-called Anisimkin (AN) waves, for which the displacement plane is localized in the film plane and the displacement direction is directed along the wave vector.

Keywords: quasi-longitudinal surface acoustic waves, Anisimkin waves, layered structures

МЕТОД ВОЗБУЖДЕНИЯ КВАЗИПРОДОЛЬНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В СЛОИСТЫХ СТРУКТУРАХ

Я. М. Олих, А. Е. Беляев, Я. И. Лепих

Аннотация. Исследован и проведен анализ методических возможностей возбуждения квазипродольных (QL) акустических волн мегагерцового частотного диапазона в слоистых структурах GaN-on-sapphire. Для генерации и детектирования QL-волн использованы преобразователи объемного типа, поляризованные по толщине пластинки. Сделано заключение, что таким методом могут быть возбуждены квазипродольные волны (QL, quasilongitudinal modes) – так называемые волны Анисимкина (AN), плоскость смещений для которых локализуется в плоскости пленки, а направление смещения направлено вдоль волнового вектора.

Ключевые слова: квазипродольные поверхностные акустические волны, волны Анисимкина, слоистые структуры

Вступ

При виготовленні акустoeлектронних (АЕ) пристроїв на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) (фільтри, резонатори, лінії затримки тощо) застосовують п'єзоелектричні підкладки кварцу, ніобату літію, танталата літію та інш. При цьому для збудження і приймання ПАХ, як правило, використовують зустрічно-штирєві перетворювачі (ЗШП).

В шаруватих структурах (наприклад, нітрідні плівки AlN, GaN, AlGaN – на сапфірі Al₂O₃, кремнії Si) можливе поширення інших АХ (типу хвилі Стоунлі). Причому, допустиме використання і неп'єзоелектричних плівок, якщо для збудження АХ використовують інші методи. Також можлива заміна в акустичному резонаторі плівки п'єзоелектрика (AlN, GaN, ZnO) на плівку матеріалу, який виявляє наведений п'єзоэффект під дією постійного електричного поля, наприклад, титанату барію-стронцію, що знаходиться в параелектричній фазі.

Відкриття хвиль Анісімікіна (AN) та квазіпоздовжніх хвиль (QL) мод значно розширило можливість вибору нових матеріалів для сенсорних пристроїв та структур. При цьому постає проблема пошуку ефективних криста-

лографічних зрізів матеріалів, для яких режими AN та QL реалізуються, і простої методики збудження цих хвиль. В даній роботі розглядається метод збудження і детектування QL акустичних мод за допомогою п'єзоелектричних перетворювачів для об'ємних АХ в шаруватих структурах.

Характеристики AN і QL акустичних мод

До теперішнього часу в якості акустичних хвиль для дослідження властивостей рідин використовувалися головним чином зсувні хвилі або квазізсувної поляризації, чи нормальні хвилі Лемба перших номерів, які не випромінюють свою енергію з твердого тіла в рідину, що досліджується, через повільні швидкості поширення. У 2004 р. в літературі з'явилося повідомлення про відкриття нового типу нормальних хвиль з домінуючим поздовжніми зміщенням $U_1 \gg U_2, U_3$ [1]. Було показано, що існує дві модифікації таких хвиль – одна AN з практично постійним профілем зміщення по глибині пластини, інша QL – зі слабо мінливим профілем. Обидві модифікації можуть існувати в кристалах різних сингоній (від орторомбічної до кубічної і ізотропної),

що не залежать від п'єзоелектричних і анізотропних властивостей цих кристалів і можуть розглядатися як трансформація нормальних хвиль Лемба за виконання 2-х умов: 1) швидкості нормальних хвиль v_n повинні бути близькі до швидкості поздовжньої об'ємної хвилі v_L в тому ж напрямку; 2) довжина хвилі λ_n у порівнянні з товщиною пластини d повинна бути мала ($\lambda_n/d \leq 2$). Ці нові нормальні моди v_n характеризуються надзвичайно слабкою дисперсією при фіксованому напрямку поширення.

Ці моди дослідженні лише у високосиметричних напрямках (вздовж осі 2-го порядку) для тригональних кристалів. Зокрема, Гуляєв та Анісімкін старший шляхом числового моделювання провели пошук аналогічних режимів у монокристалах кварцу [2], LiNbO_3 та Te [3]. Вони знайшли режими QL в хвилях, що поширюються уздовж осі Z' , у дуже тонких повернутих Y -зрізах пластин LiNbO_3 . У випадку Te режими QL були знайдені для хвиль, що поширюються вздовж осі X для повернутих Y -зрізів пластин, з широким діапазоном товщин. Анісімкін старший продовжив пошук QL-мод для інших матеріалів. Його пошук був обмежений певним скороченням площин, можливо, через великі обчислювальні навантаження.

Акустoeлектронні сенсори

Дослідження фізичних властивостей твердих і рідких речовин при різних зовнішніх впливах дозволяє глибше зрозуміти природу цих речовин і застосувати отримані дані в сенсориці. За останні роки чутливість сенсорів стала вищою, розміри менші, вибірковість кращою, вартість нижчою. При цьому один з найбільш відчутних стрибків стався з сенсорами акустoeлектронного типу, ринок яких зростає приблизно на 18% щорічно [4]. Питання дослідження сенсорних властивостей маловивчених і недавно відкритих акустичних хвиль в анізотропних структурах, включаючи новий тип акустичних коливань, які отримали назву квазіпоздовжніх мод AN [5–10], є актуальним завданням на сучасному етапі. Наступне використання акустичних хвиль в сенсорах

на основі тих же пристроїв поставило вимогу забезпечити умови, при яких вплив зовнішніх факторів потрібно зробити максимальним, селекційним і стабільним. Тепер такі сенсори створені для вимірювання широкого спектра чинників – температури, тиску, прискорення, електричного і магнітного полів, концентрації газів та ін. При цьому особливе місце в ряду акустoeлектронних сенсорів займають детектори рідини, потреба в яких особливо зросла у зв'язку з екологічною, хімічною та біологічною безпекою, а також в медичній, фармацевтичній, харчовій і інших галузях промисловості. Прогресу акустoeлектронних сенсорів різних типів, в тому числі і рідинних, в значній мірі сприяла наявність досліджень в уже відпрацьованих на акустoeлектронних лініях затримки, резонаторах і генераторах, промисловий випуск освоєних п'єзоелектричних кристалів, сумісність технології виготовлення акустoeлектронних сенсорів з технологіями мікроелектроніки. Цьому ж сприяло використання різних типів хвиль, які можуть існувати в твердих тілах і шаруватих структурах.

Застосування акустичних перетворювачів в якості первинних датчиків контролю властивостей рідин виявляється досить ефективним. Фізичною основою застосування акустичних методів для вимірювання характеристик рідких середовищ є функціональна залежність параметрів акустичних хвиль, що поширюються в рідинах (швидкість поширення, коефіцієнт загасання, поздовжній і зсувний акустичні імпеданси), від властивостей рідини.

В даний час застосовуються в основному вимірювання швидкості A_X в рідинах. Технічні складності вимірювань зсувної в'язкості і щільності за допомогою існуючих акустичних методів викликані дуже малими чисельними значеннями зсувних і поздовжніх імпедансів рідини порівняно з твердими тілами, що призводить до великих похибок вимірів. Тому проблема дослідження і розробки методів і засобів контролю в'язкості і щільності рідких середовищ із застосуванням A_X хвиль є актуальною.

Зокрема, з метою розробки високочастотних акустoeлектронних пристроїв, придатних

для роботи в рідинному середовищі вивчаються акустичні моди поляризовані по довжині уздовж тонких п'єзоелектричних пластин. Такий режим має певні особливості, які важливі для використання в АЕ сенсорах.

Метод збудження AN і QL хвиль в шаруватих структурах і результати досліджень

У даній роботі запропоновано і реалізовано метод збудження і детектування QL акустичних мод за допомогою п'єзоелектричних перетворювачів об'ємного типу поздовжніх акустичних хвиль (АХ) в діапазоні частот (9–50) МГц – способом прямого введення через поперечну поверхню (торець) структури GaN-on-sapphire (товщина $d_{\text{GaN}} \approx 5$ мкм, $d_{\text{Al}_2\text{O}_3} \approx 400$ мкм, площа (111)) (рис. 1) [11].

На рис. 2 показано фото вимірювального стенду, на якому реалізована схема експерименту – рисунок 1.

Оцінка ефективності реалізації QL-режиму проводилася шляхом вимірювання часу поширення збуджених імпульсів АХ (тривалість $t_{\text{имп}} \approx 0,5$ мкс) за допомогою прийомного ПП-2 на протилежній стороні пластини (на відстані ≈ 50 мм).

Отримані осцилограми імпульсів АХ наведені на рис. 3. Відповідність розрахованих з експерименту значень швидкості поширення

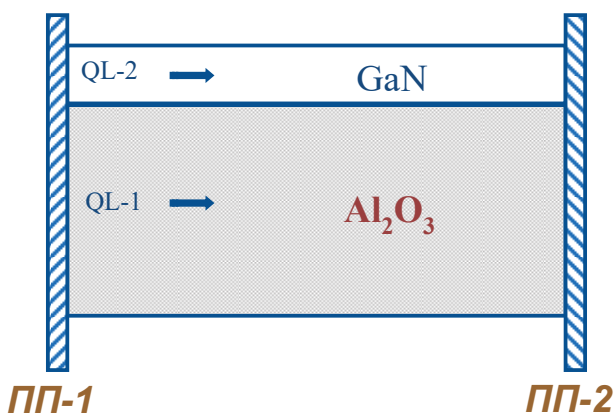


Рис. 1. Схема експерименту (бокова проекція паралельно напрямку поширення АХ). ПП-1 і ПП-2 – п'єзоперетворювачі, Al_2O_3 – підкладка, GaN – плівка на сапфірі.

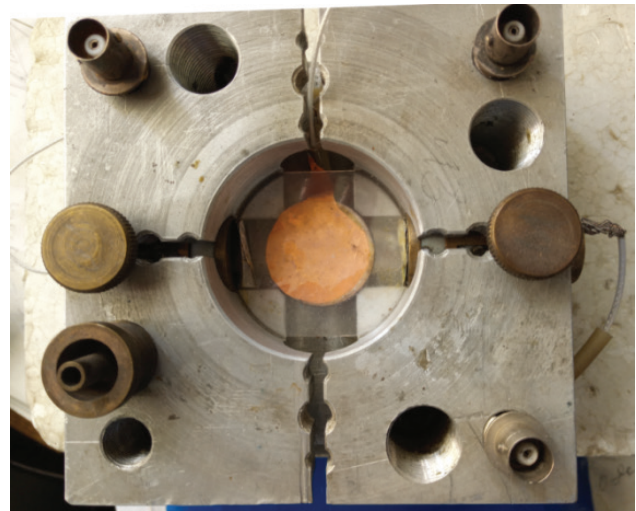


Рис. 2. Фото вимірювального стенду для дослідження AN і QL хвиль в плівках. ПП-1 і ПП-2 – п'єзоперетворювачі, Al_2O_3 – підкладка, GaN – плівка на сапфірі.

АХ в GaN (QL-2) та у Al_2O_3 (QL-1) з літературними даними для відповідних об'ємних поздовжніх АХ підтверджує достовірність збуджуваних квазіпоздовжніх АХ.

Як показали дослідження метод дає можливість працювати в широкому діапазоні частот. Гармоніки основної частоти ПП-1,2 на 10 МГц дієві на частотах 200–1200 МГц. Причому, в реалізованому конструктивному методі фактично не потрібна будь-яка функціональна реконструкція при зміні частоти при збудженні

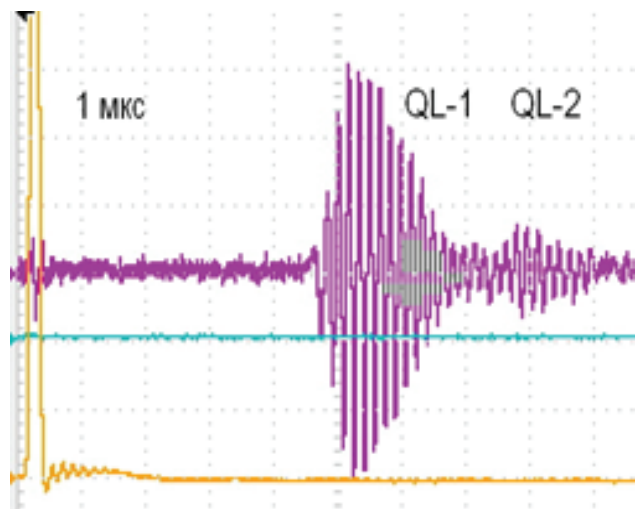


Рис. 3. Осцилограми імпульсів АХ $t_{\text{имп}} \approx 0,5$ мкс. QL-1 – в підкладці $v_{\text{Al}_2\text{O}_3} \approx 12,2 \cdot 10^3$ м/с; QL-2 – в плівці $v_{\text{GaN}} \approx 7,8 \cdot 10^3$ м/с.

АХ як синусоїдальним сигналом, так і однополярним ударним імпульсом.

Генерована АХ не розходить (в поперечній площині зберігається діаграма направленості в процесі поширення), не трансформується в інші типи нормальних хвиль, відсутні дисперсія і збудження хвиль з вертикальною поляризацією, що важливо для цілей вимірювання параметрів рідин.

Висновки

Дослідження показали можливість збудження квазіпоздовжніх поверхневих акустичних хвиль мегагерцового частотного діапазону у шаруватих плівкових структурах за допомогою перетворювачів об'ємного типу з поляризацією по товщині. Найбільш ефективними можуть бути квазіпоздовжні хвилі (quasilongitudinal modes) – так звані хвилі Анісімікіна, площина зміщень в яких локалізується в площині плівки, а напрям зміщення направлений вздовж хвильового вектора.

Дослідження підтверджують можливість практичної реалізації відповідних п'єзоелектричних хвилеводів в інтегрально-схемних акустоелектронних пристроях для роботи в рідкому середовищі.

Робота виконувалася в рамках науково-технічного проекту № 605, що фінансується Міністерством освіти і науки України.

Список використаної літератури

[1]. Anisimkin I. V. New type of an acoustic plate modes: quasilongitudinal normal wave. *Ultrasonics*, **42**, pp. 1095–1099 (2004).

[2]. Gulyaev Y. V. Properties of the Anisimkin Jr. modes in quartz plates. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, **54**, pp. 1382–1385 (2007).

[3]. Gulyaev Y. V. Peculiarities of the Anisimkin Jr. plate modes in LiNbO_3 and Te single crystals. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, **56**, pp. 1042–1045 (2009).

[4]. O. L. Balysheva. «Akustoelektronnaya komponentnaya baza», *Zhurnal Radioelektroniki* № 6 (<http://www.cplire.ru>), (2014) (*in Russian*).

[5]. Anisimkin V. I. General properties of the Anisimkin Jr. plate modes. *Proc IEEE Ultrasonic Symp*, pp. 2580–2583 (2009).

[6]. Anisimkin V. I. General properties of the Anisimkin Jr. plate modes. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, **57**, pp. 2028–2034(2010).

[7]. Onoe M, Kaga S. Analysis of Anisimkin's (qua-silongitudinal) modes in piezoelectric plate. *Proc Ul-trasonic Electronics Symp*, **30**, pp. 397–398 (2009).

[8]. Onoe M, Kaga S. Analysis of Anisimkin's (qua-silongitudinal) modes in piezoelectric plate. *Jpn J Appl Phys*, **49**, p.07HD01 (2010).

[9]. Acoustic Properties of the Film/Plate Layered Structure V Anisimkin et al. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, **58** (3), pp. 578–584(2011).

[10]. Propagation of the Anisimkin Jr.' and Quasi-Longitudinal Acoustic Plate Modes in Low-Symmetry Crystals of Arbitrary Orientation VI Anisimkin et al. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control* **59** (4), pp. 806–810(2012).

[11]. Olikh Ya. M., Belyaev O. Ye, Lepikh Ya. I. Doslidzhennia kvazipodovzhnikh QL akustychnykh khvyl dlia sensoriv na strukturakh GaN-on-sapphire. *Tezy dopovidei 9-oi Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Sensorna elektronika ta mikrosystemni tekhnolohii"* (SEMST-9) Ukraine, Odesa, 20–24 veresnia, 2021, S. 64 (*in Ukrainian*).

Стаття надійшла до редакції 24.11.2021 р.

UDC: 541.183.+548.571

DOI: 10.18524/1815-7459.2021.4.248176

METHOD OF EXCITATION OF QUASI LONGITUDINAL ACOUSTIC WAVES IN LAYERED STRUCTURES

Ya. M. Olikh¹, O. E. Belyaev¹, Ya. I. Lepikh²

¹V. Ye. Lashkarev Institute of Semiconductor Physics. National Academy of Sciences of Ukraine, 41 Nauki Ave., 03028 Kyiv, Ukraine; e-mail: jaroluk3@ukr.net

²Interdepartmental scientific-educational physics and technical center of MES and NAS of Ukraine at the Odesa I. I. Mechnikov National University, ndl_lepikh@onu.edu.ua

Summary

The characteristics of SAW devices, in which SAW conversion is performed by interdigital transducers (IDT) applied to the surface of the piezoelectric acoustic duct, are determined mainly by the electrophysical parameters (EPhP) of the piezoacoustic duct and the design of the IDT. Conditions on the working surface of the acoustic duct are limiting at solving of the wave equation for SAW.

It follows that theoretically it is always necessary to take into account the components of the mechanical intensity and shear on the surface of the acoustic duct.

In practice, this means that in some cases the presence of tension on the surface of the acoustic duct, ie when the surface can not be considered free, leads to a change in the characteristics of SAW and, consequently, the operating characteristic of the device on SAW, or degeneration of one type of SAW in another.

However, such transformation of wave types becomes noticeable only at certain proportion of geometric (layer thickness h and wavelength λ) and mechanical (acoustic) parameters. In particular, at $h / \lambda \ll 1$ the effect of degeneration of one type of SAW (in this case the Lev wave) is absent.

In order to improve the basic characteristics of SAW devices and increase their reliability, we investigated a new type of quasi-elongated waves called Anisimkin waves in layered GaN-on sapphire structures.

The analysis of methodological possibilities of excitation of quasi-longitudinal (QL) acoustic waves of the megahertz frequency range in layered structures GaN-on-sapphire is studied and carried out. Volume-type transducers polarized by plate thickness are used to generate and detect QL waves. It is concluded that quasilongitudinal modes (QL) can be excited by this method – the so-called Anisimkin (AN) waves, for which the displacement plane is localized in the film plane and the displacement direction is directed along the wave vector.

Keywords: quasi-longitudinal surface acoustic waves, Anisimkin waves, layered structures

МЕТОД ЗБУДЖЕННЯ КВАЗИПОЗДОВЖНИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ У ШАРУВАТИХ СТРУКТУРАХ

Я. М. Оліх¹, О. Є. Беляєв¹, Я. І. Лепіх²

¹Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України,
пр. Науки 41, 03028 Київ, Україна; e-mail: jaroluk3@ukr.net

²Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр МОН і НАН України при ОНУ
імені І. І. Мечникова, ndl_lepikh@onu.edu.ua

Реферат

Характеристики пристроїв на ПАХ, у яких перетворення ПАХ здійснюється зустрічно-штирьовими перетворювачами (ЗШП) нанесеними на поверхню п'єзоелектричного звукопроводу, визначаються в основному електрофізичними параметрами (ЕФП) п'єзозвукопроводу і конструкцією ЗШП.

Умови на робочій поверхні звукопроводу є граничними при вирішенні хвильового рівняння для ПАХ. З цього випливає, що теоретично завжди варто враховувати компоненти механічної напруженості і зсуву на поверхні звукопроводу.

Практично ж це означає, що в деяких випадках наявність напруженості на поверхні звукопроводу, тобто коли поверхня не може вважатися вільною, призводить або до зміни характеристик ПАХ і, як наслідок, робочих характеристик пристрою на ПАХ, або до виродження одного типу ПАХ в інший.

Однак таке перетворення типів хвиль стає помітним тільки при визначених співвідношеннях геометричних (товщини шару h і довжини хвилі λ) і механічних (акустичних) параметрів. Зокрема, при $h/\lambda \ll 1$ ефект виродження одного типу ПАХ (у даному випадку хвилі Лява) відсутній.

З метою поліпшення основних характеристик пристроїв на ПАХ і підвищення їхньої надійності нами досліджувався новий тип квазіпоздовжніх хвиль названих хвилями Анісімікіна в шаруватих структурах GaN-on-sapphire.

Досліджено і проведено аналіз методичних можливостей збудження квазіпоздовжніх (QL) акустичних хвиль мегагерцового частотного діапазону у шаруватих структурах GaN-on-sapphire. Для генерації і детектування QL-хвиль використано перетворювачі об'ємного типу поляризовані на товщині пластинки. Зроблено висновок, що таким методом можуть бути збуджені квазіпоздовжні хвилі (QL, quasilongitudinal modes) – так звані хвилі Анісімікіна (AN), площина зміщень в яких локалізується в площині плівки, а напрям зміщення направлений вздовж хвильового вектора.

Ключові слова: квазіпоздовжні поверхневі акустичні хвилі, хвилі Анісімікіна, шаруваті структури

БІОСЕНСОРИ

BIOSENSORS

УДК 543.555+577.15+582.923.5:581.143.6+547.94

DOI: 10.18524/1815–7459.2021.4.248177

АДАПТАЦІЯ ПРОЦЕДУРИ КОІММОБІЛІЗАЦІЇ ФЕРМЕНТІВ З РІЗНИМИ МОДИФІКАЦІЯМИ ЦЕОЛІТІВ НА ПОВЕРХНЮ КОНДУКТОМЕТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

О. О. Солдаткін¹, В. М. Архипова¹, І. С. Кучеренко¹, Д. Ю. Кучеренко¹, С. В. Дзядевич^{1,2}

¹Інститут молекулярної біології та генетики НАН України,
вул. Заболотного, 150, 03680, м. Київ, Україна

²Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
вул. Володимирська, 64, 01003, м. Київ, Україна

e-mail авторів: alex_sold@yahoo.com, avalka@yahoo.com, kucherenko.i.s@gmail.com,
didukh.d@gmail.com, dzyad@yahoo.com

АДАПТАЦІЯ ПРОЦЕДУРИ КОІММОБІЛІЗАЦІЇ ФЕРМЕНТІВ З РІЗНИМИ МОДИФІКАЦІЯМИ ЦЕОЛІТІВ НА ПОВЕРХНЮ КОНДУКТОМЕТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

О. О. Солдаткін, В. М. Архипова, І. С. Кучеренко, Д. Ю. Кучеренко, С. В. Дзядевич

Анотація. Проведено порівняльне дослідження різних параметрів кондуктометричних біосенсорів на основі уреази та глюкозооксидази, коімобілізованих з різними типами цеолітів. Продемонстровано, що уреаза, іммобілізована на силікаліті-2, мала кращі показники, ніж іммобілізована уреаза без цеоліту. Кондуктометричний біосенсор з глюкозооксидазою, коімобілізованою з цеолітом NH₄⁺-Beta 25, мав подібні значення відгуків у порівнянні з іммобілізованим ферментом без цеоліту. Ко-іммобілізація цеолітів NH₄⁺-BEA 30 і H⁺-BEA 30 разом з уреазою призводить до підвищення відгуку біосенсора, при цьому відтворюваність сигналу залишається незмінною. Біосенсори з цеолітами з більшим співвідношенням Si/Al характеризувались підвищеними сигналами. Використання цеолітів, модифікованих метилвіологеном і сріблом, не дало позитивного ефекту.

Ключові слова: уреаза, глюкозооксидаза, кондуктометричний біосенсор, цеоліти, коімобілізація ферментів

ADAPTATION OF THE PROCEDURE OF CO-IMMOBILIZATION OF ENZYMES WITH DIFFERENT MODIFICATIONS OF ZEOLITES ON THE SURFACE OF CONDUCTOMETRIC TRANSDUCERS

O. O. Soldatkin, V. M. Arkhypova, I. S. Kucherenko, D. Y. Kucherenko, S. V. Dzyadevych

Abstract. A comparative study of different parameters of conductometric biosensors based on urease and glucose oxidase, co-immobilized with different types of zeolites. Urease immobilized on silicalite-2 was shown to have better performance than immobilized urease without zeolites. Conductometric biosensor with glucose oxidase co-immobilized with zeolite NH_4^+ -Beta 25 had similar response values compared to immobilized enzyme without zeolite. Immobilization of zeolites NH_4^+ -BEA 30 and H^+ -BEA 30 together with urease leads to an increase in the response of the biosensor, while the reproducibility of the signal remains unchanged. Biosensors with zeolites with a higher Si/Al ratio were characterized by increased signals. The use of zeolites modified with methylviologen and silver did not give a positive effect.

Keywords: urease, glucose oxidase, conductometric biosensor, zeolites, co-immobilization of enzymes

АДАПТАЦІЯ ПРОЦЕДУРИ КОІММОБІЛІЗАЦІЇ ФЕРМЕНТОВ С РІЗНИМИ МОДИФІКАЦІЯМИ ЦЕОЛІТОВ НА ПОВЕРХНІСТЬ КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

A. A. Soldatkin, V. N. Arkhipova, I. S. Kucherenko, D. Y. Kucherenko, S. V. Dzyadevych

Аннотация. Проведено сравнительное исследование различных параметров кондуктометрических биосенсоров на основе уреазы и глюкозооксидазы, коиммобилизованных с разными типами цеолитов. Продемонстрировано, что уреазы, иммобилизованная на силикалите-2, имела лучшие показатели, чем иммобилизованная уреазы без цеолита. Кондуктометрический биосенсор с глюкозооксидазой, коиммобилизованной с цеолитом NH_4^+ -Beta 25, имел схожие значения откликов по сравнению с иммобилизованным ферментом без цеолита. Иммобилизация цеолитов NH_4^+ -BEA 30 и H^+ -BEA 30 вместе с уреазой приводит к повышению отклика биосенсора, при этом воспроизводимость сигнала остается неизменной. Биосенсоры с цеолитами с большим соотношением Si/Al характеризовались увеличенными сигналами. Использование цеолитов, модифицированных метилвиологеном и серебром, не дало положительного эффекта.

Ключевые слова: уреазы, глюкозооксидаза, кондуктометрический биосенсор, цеолиты, коиммобилизация ферментов

1. ВСТУП

Електрохімічні біосенсори розглядаються сьогодні як успішна альтернатива класичним методам аналізу з огляду на існуючі успіхи в розробці їх лабораторних прототипів і вихід на ринок ряду конкурентоспроможних вимірювальних приладів. Біосенсорні прилади мають такі переваги у порівнянні з існуючими методами аналітичної хімії, як простота і зручність у використанні, короткий час аналізу,

портативність, та, головне, низька собівартість та можливість проведення аналізу широким колом осіб як у централізованих лабораторіях, так і в домашніх чи польових умовах [1].

Аналізуючи характеристики наноматеріалів, стає очевидним також, що використання наноматеріалів у біосенсорних технологіях відкриває широкі можливості для застосування різних принципів детектування одного і того ж аналізу та створення мультисенсорних приладів (приладів для одночасного визначення

ряду аналітів, присутніх у зразку). Відповідно це призведе до суттєвої оптимізації часу, зменшення економічних затрат і людських зусиль, необхідних на проведення аналізу з високим ступенем точності та достовірності. Враховуючи той факт, що велика кількість наноматеріалів є біосумісними, їх можна застосовувати для надання певних важливих властивостей тим біоселективним елементам сенсорів, що вже застосовуються, і тим самим розширюючи можливості аналізу. Такі характеристики наноматеріалів, як велика питома поверхня, пористість, температурна стабільність, можливість простої модифікації поверхні різними функціональними групами, хімічна та біологічна стійкість, і в ряді випадків, невисока вартість, також обумовлюють зростання інтересу до застосування даних матеріалів у біосенсоріці.

Успіх іммобілізації ферментів сильно залежить від властивостей використовуваних носіїв. Матеріал-носіє повинен мати високу здатність зв'язувати фермент, бути механічно стабільним і не повинен знижувати ферментативну активність. Органічні носії, такі як полімери, призводять до низки проблем, таких як погана стабільність та проблеми їхньої утилізації [2]. На противагу цьому, неорганічні матеріали, такі як кремнезем і глинозем, є термічно та механічно стабільними та міцними [3, 4].

Цеоліти є перспективними наноматеріалами для модифікації біосенсорів [5]. Вони являють собою неорганічні сполуки, структура яких має кристалічну решітку, що складається з алюмінію і кремнію, зв'язаних атомами кисню. У середині решітки знаходяться поодинокі атоми металів або йони водню, що нейтралізують негативний заряд окремих частин кристала, і сорбована вода. Алюмінієво-кремнієвий скелет утворює багато пір і каналів, що значно збільшує поверхню цеоліту [6]. Вчені виявляють великий інтерес до цеолітів через специфічні властивості останніх. Вони малотоксичні, хімічно, механічно та термостабільні, толерантні до мікроорганізмів [7]. Деякі параметри цеоліту можна контролювати в процесі їх штучного синтезу. Співвідношення Si/Al можна змінювати, таким чином змі-

нюючи заряд цеоліту і гідропатію, кількість і розмір пір. Атоми лужних і лужноземельних металів можуть бути включені в кристалічну решітку і утримуватися там за допомогою координаційних зв'язків [8]. Термічна обробка може регулювати кількість поверхневих –ОН груп, які важливі для іммобілізації цеоліту в біоселективному елементі [9]. Поверхня цеоліту також може бути модифікована різними органічними та неорганічними групами (–NH₂, –SH, –Cl, –CN, –C₆H₅ тощо), забезпечуючи таким чином різні взаємодії між цеолітом, ферментом та перетворювачем [10, 11]. Широкий спектр модифікацій дозволяє отримувати цеоліти з різноманітними властивостями, потенційно корисними для розробки біосенсорів.

Кондуктометричні біосенсори засновані на тому, що майже всі ферментативні реакції передбачають або споживання, або утворення заряджених речовин, і, отже, призводять до глобальної зміни іонного складу досліджуваного зразка [12]. Біосенсори, засновані на кондуктометричному принципі, мають ряд переваг: а) тонкоплівкові електроди придатні для мініатюризації та великомасштабного виробництва з використанням недорогих технологій мікроелектроніки, б) вони не потребують жодного електрода порівняння, в) перетворювачі не є світлочутливими, г) керуюча напруга може бути достатньо низькою, щоб істотно зменшити споживання електроенергії, д) великий спектр сполук різної природи можна визначити на основі різних реакцій і механізмів.

Тому було досліджено процедури коіммобілізації ферментів з різними варіантами модифікацій цеолітів на поверхню кондуктометричних перетворювачів.

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

2.1. Матеріали

Для виготовлення біоселективної мембрани використовували ферменти уреази (КФ 3.5.1.5) із *Canavalia ensiformis* з активністю 15000–50000 од/г та глюкозооксидаза (ГОД) із *Aspergillus niger* (К.Ф. 1.1.3.4) з активністю 100000–250000 од. акт./г препарату виробництва фірми “Sigma-Aldrich”.

Як субстрати використовували сечовину та глюкозу фірми “Sigma-Aldrich”.

Фосфатний буфер був виготовлений з дигідроортофосфат калію (KH_2PO_4) (чистота 98,5%, Helicon, Росія) та гідроксиду натрію (NaOH) (чистота 99%, Helicon, Росія).

Усі інші реактиви, як вітчизняного, так і імпортного виробництва, були кваліфікації «ос.ч» і «х.ч».

2.2. Кондуктометричні датчики і портативний вимірювальний пристрій

В роботі використовувались перетворювачі, виготовлені згідно наших рекомендацій в Інституті фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарьова (м. Київ, Україна). Вони мають розмір 5 мм×30 мм та складаються з двох ідентичних пар тонкошарових планарних золотих електродів, виготовлених за технологією вакуумного напилення золота на непровідну підкладинку з ситалу (рис. 1). Для покращення адгезивних властивостей золота на ситал наносили шар хрому товщиною 50 нм. Кожна така система складається із 20 пар гребінчастих електродів, що мають ширину та зазор між ними 20 мкм із загальною площею чутливої поверхні біля 2 мм² [13].

Виміри проводилися за допомогою портативного пристрою «МСП-3», розробленого та виготовленого згідно наших рекомендацій в Інституті електродинаміки НАН України

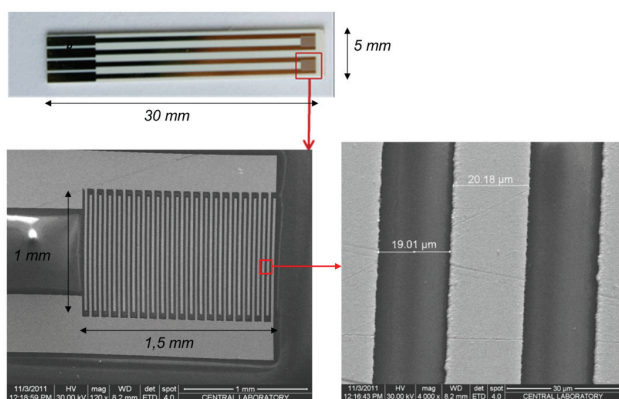


Рис. 1. Зовнішній вигляд кондуктометричних перетворювачів з диференційною парою золотих гребінчастих електродів, нанесених на ситалову підкладинку

(рис. 2). Вимірювання проводили при частоті струму 37 кГц та амплітуді 14 мВ.

2.3. Цеоліти та їх характеристики

В роботі використовувались такі цеоліти, як цеоліт Y, H⁺-Beta 300, H⁺-Beta 150, NH₄⁺-Beta 25 – комерційні зразки, отримані від компанії Sud-Chemie (США) та силікаліти, бета-цеоліти з різним співвідношенням Si/Al і цеоліт А, які були синтезовані в Середньосхідному технічному університеті (Анкара, Туреччина).

Мікрофотографії низки цеолітів, отримані за допомогою скануючого електронного мікроскопу, наведено на рис. 3.

Силікаліт-1. Вихідний гель для синтезу містив вихідні речовини у наступних молярних співвідношеннях: ТРАОН: 5 ТЕОС: 500 Н₂О. Тетраетилортосилікат (ТЕОС) виступав джерелом кремнію, тетрапропіламонію гідрохлорид (ТРАОН) виступав як шаблон. Суміш перемішували за кімнатної температури протягом 6 годин, після чого ставили в термостат на 18 годин при 125 °С. Отримані тверді частинки центрифугували при 13000 об./хв., відмивали деіонізованою водою та висушували при 80 °С.

Силікаліт-2. Гель, що використовувався для синтезу силікаліту, містив вихідні речовини у наступних молярних співвідношеннях: 1 ТРАОН: 4 ТЕОС: 350 Н₂О. Розчин для синтезу був отриманий шляхом змішування ТЕОС, ТРАОН та деіонізованої води протягом 6 го-

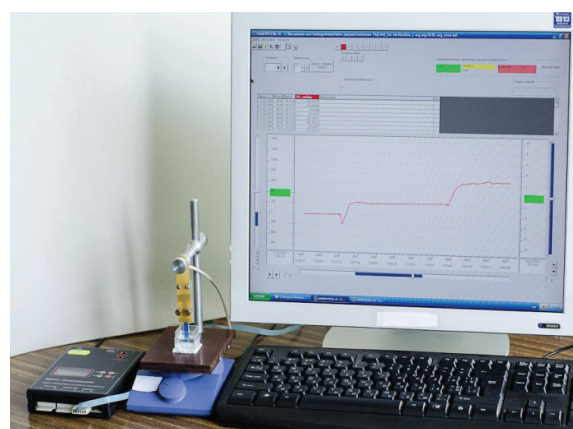


Рис. 2. Загальний вигляд кондуктометричної установки на основі портативного аналізатора «МСП-3»

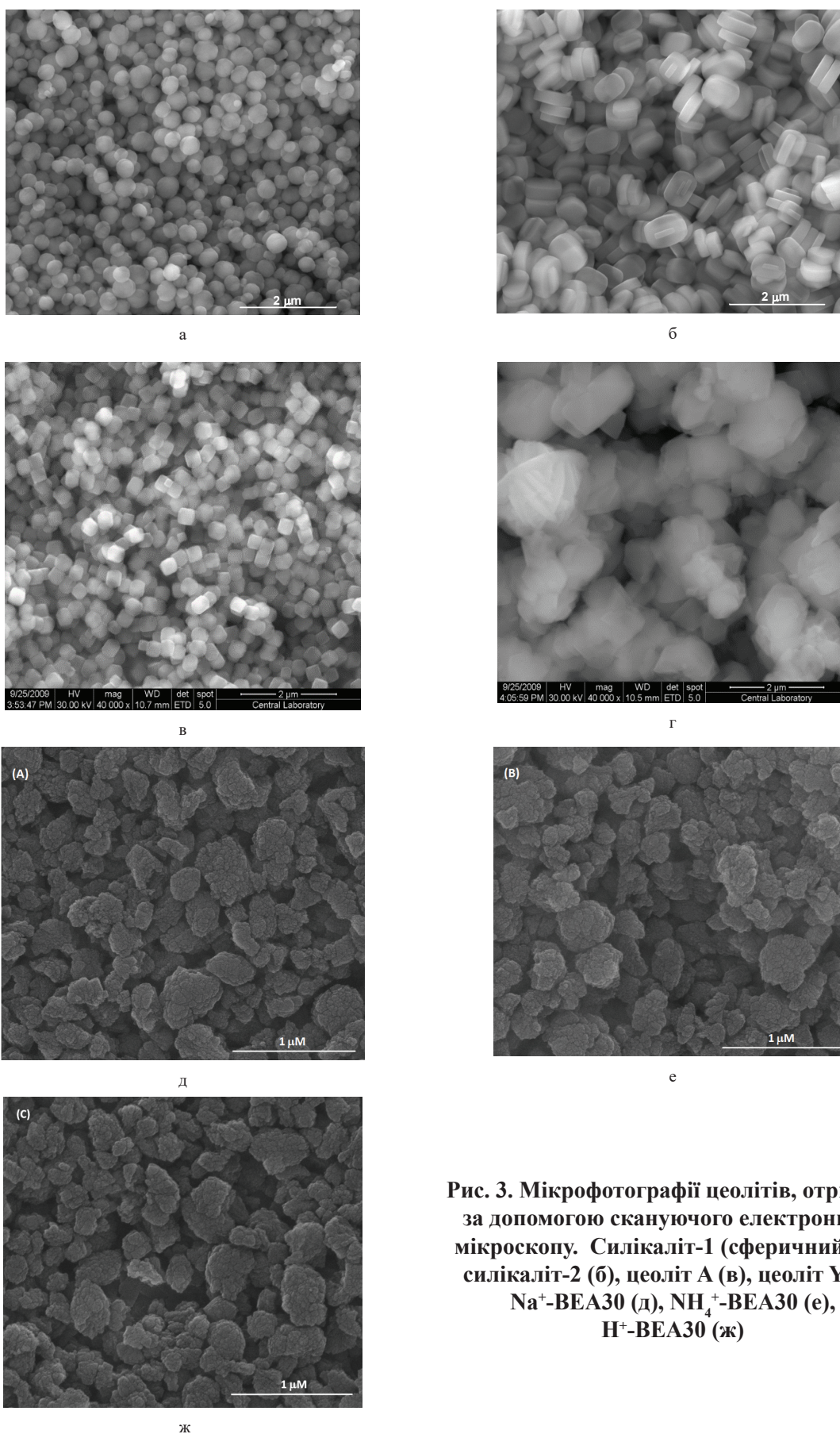


Рис. 3. Мікрофотографії цеолітів, отримані за допомогою скануючого електронного мікроскопу. Силікаліт-1 (сферичний) (а), силікаліт-2 (б), цеоліт А (в), цеоліт Y (г), Na⁺-BEA30 (д), NH₄⁺-BEA30 (е), H⁺-BEA30 (ж)

дин, після чого його ставили в термостат на 1 добу при 125 °С для кристалізації. Чистий силікаліт отримували після центрифугування з деіонізованою водою при 7500 об./хв та висушували при 50 °С. Потім продукт був кальцинований на повітрі за температури 650 °С протягом 6 годин.

Бета-цеоліти з різним співвідношенням Si/Al. Зразки цеоліту Na⁺-BEA були гідротермально синтезовані з розчинів гелю, що мають склад 1,92Na₂O: Al₂O₃: ySiO₂: 4,6(TEA)₂O: 444H₂O. Склад визначали за зміною співвідношення SiO₂/Al₂O₃ (y = 30, 40, 50, 60) зразків Na⁺-BEA. Розчин попередника алюмінату натрію для цеоліту BEA готували шляхом розчинення NaOH (>97 мас.%, JT Baker) та алюмінату натрію (50,8 мас.% Al₂O₃, 43,4 мас.% Na₂O, Riedel de Haën) у деіонізованій воді (питомий опір > 18 МОм см⁻¹). Потім додавали розчин гідроксиду тетраетиламонію (TEAOH 35 мас.%, у воді, Aldrich), який є структуро-направляючим агентом для синтезу цеоліту BEA, та ретельно перемішували приготований розчин попередника. Розчин колоїдного кремнезему Ludox® HS-40 (суспензія 40 мас.% SiO₂ у воді, Sigma Aldrich) додавали до алюмінатного попередника та ретельно перемішували перед тим, як помістити в автоклави із нержавіючої сталі, покриті тефлоном. Автоклави зберігали статично при 120 °С у звичайній печі протягом 7 днів. Отримані тверді частинки фільтрували під вакуумом, промивали деіонізованою водою і сушили при кімнатній температурі. NH₄⁺ форми кристалів BEA отримували шляхом іонного обміну з 1 М водним нітратом амонію при 80 °С протягом 24 год. Кислотні (H⁺) форми отримували прожарюванням кристалів NH₄⁺-BEA 30 при 500 °С протягом 6 год.

Зразки модифікували метилвіологеном (MV) шляхом перемішування 100 мг MV і 300 мг порошку цеоліту в 20 мл дистильованої води протягом 24 годин при кімнатній температурі. Потім отриманий розчин двічі центрифугували при 10000 об./хв протягом 10 хвилин. Отримані частинки сушили протягом ночі при 60 °С.

Іонообмінну процедуру застосовували шляхом перемішування 300 мг цеолітів з роз-

чином 120 мг AgNO₃ і 100 мл дистильованої води протягом 24 годин у темному середовищі. Модифікацію частинок BEA цеоліту в наночастинки срібла здійснювали шляхом відновлення іонообмінних зразків срібла в суспензії боргідриду натрію (60 мМ) при кімнатній температурі. Після кожного етапу отриманий розчин двічі центрифугували при 10000 об./хв протягом 10 хвилин, а потім частинки цеоліту сушили протягом ночі в печі при 60 °С.

2.4. Методика іммобілізації ферментів на поверхню перетворювачів

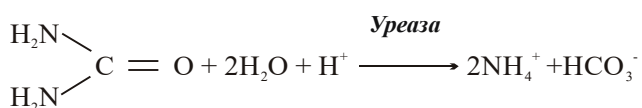
Для створення біоматриць за основу був взятий метод іммобілізації ферментів за допомогою глутарового альдегіду. Біоселективні мембрани отримували шляхом коіммобілізації ензиму у суміші з БСА у парах ГА на поверхні перетворювача. Для виготовлення робочої мембрани готували розчини ферментів та БСА у 20 мМ фосфатному буферному розчині (рН 7,4) з кінцевими концентраціями 10 мг/мл – 100 мг/мл в залежності від задач експерименту, та змішували їх у співвідношенні 1:1. До суміші ензим-БСА додавали гліцерин до кінцевої концентрації 10% для стабілізації ензиму при іммобілізації та запобігання передчасному висиханню розчину, нанесеного на поверхню перетворювачів. Суміш для приготування референтної мембрани готували таким же чином, але замість ензиму брали тільки розчин БСА в подвійній концентрації. Краплю суміші фермент-БСА (ферментна мембрана) наносили на одну частину поверхні перетворювача, на іншу – розчин БСА без ферменту (референтна мембрана). Для полімеризації мембран датчики розміщували в атмосферу насичених парів глутарового альдегіду в ексикаторі на 20–30 хв. Після полімеризації біосенсори витримували протягом 15–20 хвилин на повітрі за кімнатної температури та відмивали в робочому буферному розчині (10–15 хв.) від незв'язаних компонентів біоселективних мембран та надлишку глутарового альдегіду.

Для виготовлення модифікованих наночастинками мембран змішували вихідні розчини ферментів та розчин (суспензію) цеолітів в об'ємному співвідношенні компонентів 1:1.

Відразу після цього результуючу суміш загальним об'ємом 0,2 мкл наносили на чутливу поверхню пари електродів та розподіляли рівномірним шаром до повного її покриття. Для полімеризації мембран датчики розміщували в атмосфері насичених парів глутарового альдегіду в ексикаторі на 20–30 хв. Після полімеризації біосенсори витримували протягом 15–20 хвилин на повітрі за кімнатної температури та відмивали в робочому буферному розчині (10–15 хв.) від незв'язаних компонентів біоселективних мембран та надлишку глутарового альдегіду.

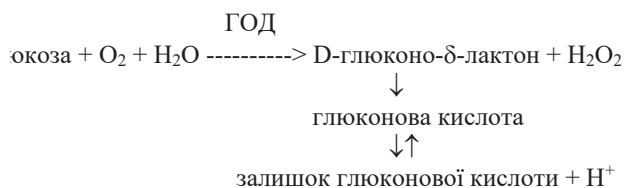
3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

У разі аналізу сечовини результуючі зміни провідності викликаються ферментативно каталізованим гідролізом субстрату:



а для глюкози вони зумовлені дисоціацією глюконової кислоти, що утворюється в резуль-

таті ферментативного окислення глюкози за схемою:



Типова залежність відгуку кондуктометричного біосенсора від часу після додавання глюкози показана на рис. 4. Після досягнення біосенсором стабільної базової лінії в фоновому фосфатному буферному розчині додавання глюкози викликало відгук біосенсора, який була результатом локального збільшення концентрації протонів всередині мембрани. Як видно, час відгуку біосенсора у стаціонарному режимі, тобто час, необхідний для досягнення 90% амплітуди стабільного стану, становив приблизно 1–2 хв.

Спочатку досліджували вплив завантаження цеоліту в іммобілізаційну суміш на відгук біосенсора на 0,2 мМ глюкози. Різні концентрації силікаліту-2 в мембрані були випробувані для оптимізації величини завантаження цеоліту відповідно до відгуку сенсора

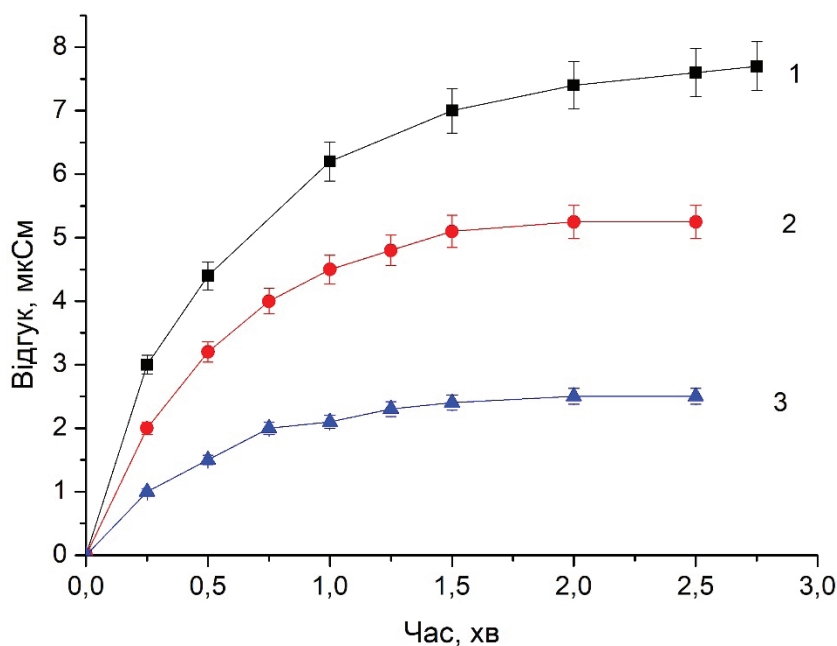


Рис. 4. Типові криві відгуків кондуктометричного біосенсора на основі глюкозооксидази з використанням силікаліту-1 для 1 мМ (1), 0,6 мМ (2) та 0,3 мМ (3) глюкози. Вимірювання проводили в 5 мМ фосфатному буфері, рН 7,4

(рис. 5). Відгуки біосенсора з 5% цеолітом були низькими у порівнянні з відгуками з меншою концентрацією цеоліту в мембрані. Рівень насичення відгуків біосенсорів також різниться залежно від концентрації цеолітів у мембранах. Для подальшої експериментальної роботи використовували біосенсори з використанням 0,5% цеоліту.

Щоб визначити вплив часу поперечного зшивання для ферменту, електроди витримували в парах глутарового альдегіду протягом різного часу. Як показано на рис. 6 для цеоліту А, спостерігали, що час витримки в парах глутарового альдегіду протягом 25 хвилин привів до найвищого відгуку біосенсора для визначення сечовини і, таким чином, до оптимального часу для поперечного зшивання уреазі. Насправді, якщо час витримки залишається коротким для іммобілізації, може статися вимивання ферменту через мембрану через недостатній рівень з'єднання. Це призведе до поганої стабільності біосенсорів, і відповідно спостерігається зниження відгуків сенсорів. З іншого боку, якщо час експозиції для іммобілізації довший за оптимальне значення, також спостерігається зниження відгуків. Це може бути пов'язано з утворенням великої кількості

зв'язків між глутаровим альдегідом і молекулами ферменту, що призводить до ущільнення мембрани. Таким чином, активний центр ферменту може бути недоступним для молекул субстратів.

Добре відомо, що вибір буфера може впливати на активність ферменту. Найбільш часто використовуваним буфером у подібних системах є фосфатний буферний розчин. Було отримано, що найвище значення відгуків датчика спостерігалося при використанні розчину з рН 7,4 для уреазі, коїммобілізованої з цеолітом А, тобто оптимум рН для такої системи був 7,4.

Як видно з рис. 7, уреазі іммобілізована з силікалітом-2 показала найвищий відгук у порівнянні з іншими цеолітами, а також вищий, ніж уреазі, іммобілізована без цеоліту. Силікаліт-2 не має алюмінію, тому є найбільш гідрофобним матеріалом серед усіх досліджуваних зразків. Крім того, цеоліт Y показав дещо вищу реакцію, ніж цеоліт А. Це може бути пов'язано з відносно більшим розміром пор і співвідношенням Si/Al і площею поверхні цеоліту Y щодо кристалів цеоліту А.

Дуже цікавим матеріалом є бета-цеоліт (BEA) – цеоліт з великими порами з триви-

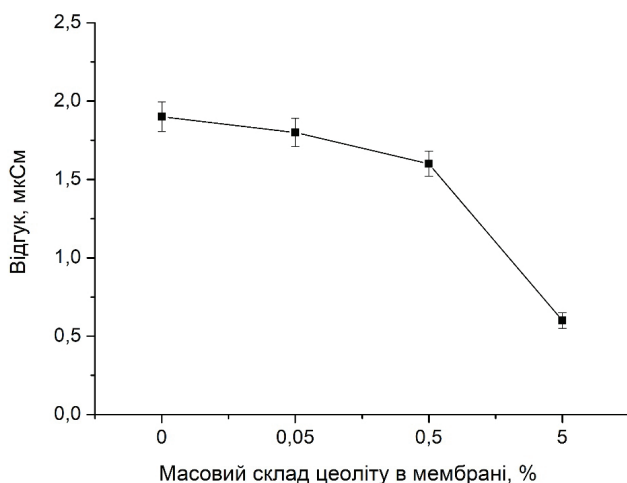


Рис. 5. Залежність відгуків глюкозного біосенсора від масового відсотка цеоліту (силікаліт 2) в мембранах. Склад мембрани: 5% GOD, 5% BSA, 20 mM PBS, рН 7,4, 10% гліцерин

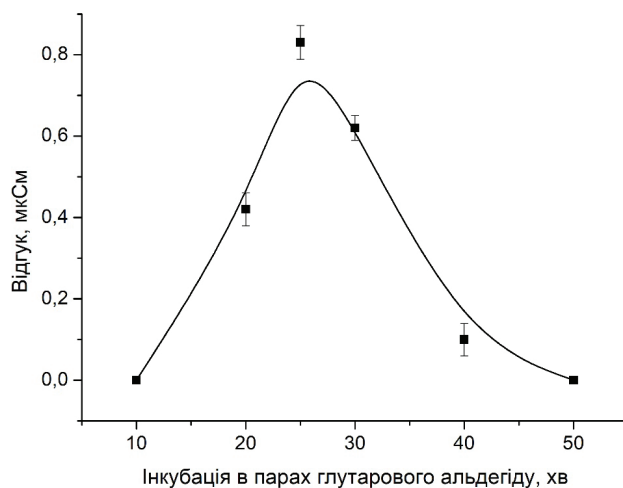


Рис. 6. Залежність відгуків кондуктометричних біосенсорів від часу зшивання в парах глутарового альдегіду для уреазі та цеоліту А в мембранах біосенсору

мірною системою взаємопов'язаних каналів з 12-членними отворами (7,6 x 6,4 Å) [14]. З моменту свого відкриття в 1967 році цей тип цеоліту представляв великий інтерес через можливість його синтезу з широким діапазоном співвідношення Si/Al від 5 до нескінченності. Він привернув велику увагу як потенційний каталізатор у численних реакціях через його кислотні властивості. Найбільш цікавим для каталітичних цілей є те, що ВЕА-цеоліт може бути легко модифікований різними йонними частинками, що може призвести до утворення різних кислотних і гідрофобних областей на його зовнішній поверхні. Це повинно дозволити досліджувати зміну гідрофобної та кислотної природи цього матеріалу на характеристики біосенсорів.

Тому було перевірено потенціал різноманітних модифікацій ВЕА-цеолітів для контрольованого покращення аналітичних характеристик кондуктометричних біосенсорів для визначення сечовини. Відповідно досліджено вплив амонійного (NH_4^+) та протонного (H^+) іонного обміну, різного співвідношення Si/Al, та модифікації тих самих цеолітів метилвіологеном на отримані характеристики біосенсорів.

Калібрувальні криві лабораторних прототипів кондуктометричних біосенсорів на осно-

ві глюкозооксидази без цеоліту та іммобілізованої з різними цеолітами наведені на рис. 8. Лінійний динамічний діапазон визначення глюкози становив до 1–1,5 мМ у 5 мМ фосфатному буферному розчині з межею виявлення 200 нМ. Аналіз робочих характеристик розроблених біосенсорів продемонстрував лінійний діапазон визначення глюкози для ферменту, іммобілізованого з цеолітами, майже в тому ж діапазоні концентрацій, що й глюкозооксидаза, іммобілізована без цеоліту. Біосенсор з ГОД, коіммобілізованою з NH_4^+ -Beta 25, демонстрував найкращі робочі характеристики: низька межа виявлення, високий рівень відгуку, високу операційну стабільність та стабільність при зберіганні.

Було досліджено вплив цеоліту Na^+ -ВЕА 30, доданого до біоселективного елемента, на відгук біосенсора та лінійний діапазон вимірювання. З калібрувальної кривої для біосенсора з 5% цеолітом і такою ж без цеоліту (рис. 9) видно, що наявність цеоліту Na^+ -ВЕА 30 не має помітного ефекту. Типовим методом активації бета-цеоліту для каталітичних цілей є зміна його кислотного характеру за рахунок, насамперед, іонного обміну амонію, що призводить до зміни іонів Na^+ з іонами NH_4^+ в каркасі цеоліту (NH_4^+ -ВЕА). Наступним кроком

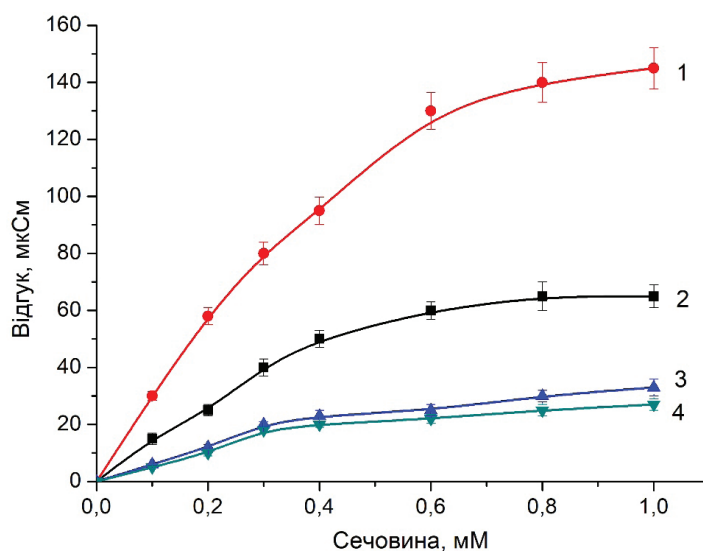


Рис. 7. Калібрувальні криві для визначення сечовини для біосенсора на основі уреазі, коіммобілізованої в мембрані з силікалітом-2 (1), без цеоліту (2), цеоліту Y (3) та цеоліту A (4). Вимірювання проводили в 5 мМ фосфатному буфері, pH 7,4

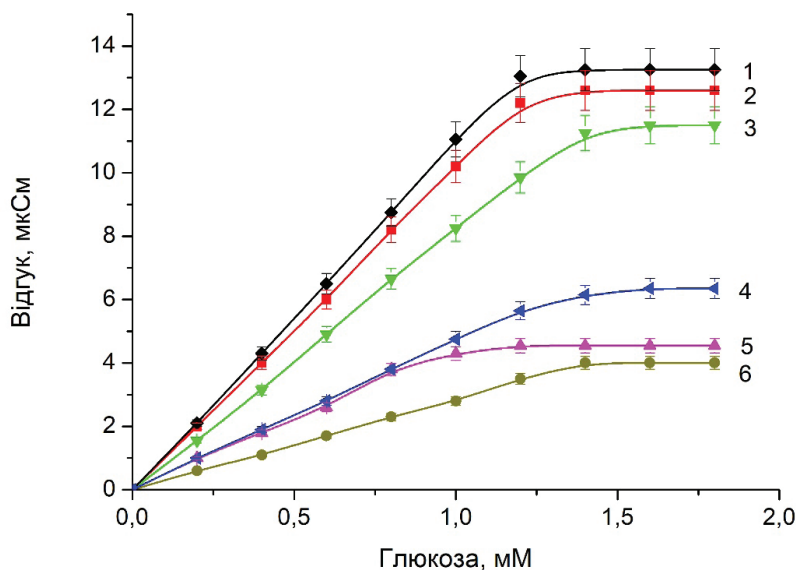


Рис. 8. Калібрувальні криві для визначення глюкози для кондуктометричного біосенсора на основі глюкозооксидази, коїмобілізованої з NH_4^+ -Beta 25 (2), Силікаліт-1 (3), Силікаліт-2 (4), H^+ -Beta 300 (5), H^+ -Beta 150 (6) і без цеоліту (1). Вимірювання проводили в 5 мМ фосфатному буфері, рН 7,4

є застосування процедури термічної обробки для перетворення цих іонів NH_4^+ в іони H^+ (H^+ -BEA). Іонообмін амонію є кращим, оскільки він зменшує можливість пошкодження структури цеоліту BEA під час термічної обробки. Відповідно до цього дослідження, цеоліт Na^+ -BEA 30 також був модифікований шляхом спо-

чатку перетворення Na^+ -BEA 30 в NH_4^+ -BEA 30 шляхом обміну іонів натрію на іони амонію. Після цього NH_4^+ -BEA 30 перетворювали в H^+ -BEA 30 шляхом прожарювання. Отримані калібрувальні криві як функцію цього перетворення для біосенсорів з модифікованими цеолітами можна побачити на рис. 9.

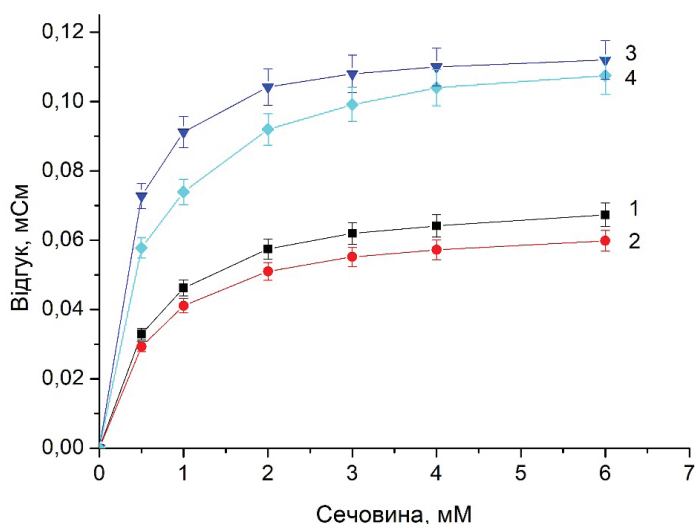


Рис. 9. Вплив цеолітів на калібрувальні криві біосенсорів для визначення сечовини. Уреазу коїмобілізували з цеолітами Na^+ -BEA 30 (2), NH_4^+ -BEA 30 (3) і H^+ -BEA 30 (4). Для порівняння використовується іммобілізація уреазі без цеолітів (1). Концентрація цеоліту в біоселективному елементі біосенсора – 5%. Вимірювання проводили в 5 мМ фосфатному буфері, рН 7,4

Як показано на рис. 9, наявність модифікованих цеолітів у мембрані суттєво вплинула на величину сигналу i , отже, на чутливість біосенсора, тоді як лінійний діапазон вимірювань змінювався незначно. Ось чому, щоб продемонструвати ефект цеоліту більш очевидно, відгуки біосенсорів на 6 мМ сечовини (що є кінцевою концентрацією насичення) представлені у вигляді діаграми на рис. 10 як залежність від типу модифікованих цеолітів. Відгук біосенсора тільки на основі уреазу без будь-якого цеоліту, був прийнятий за 100%. Результати показали, що найбільш чутливими були біосенсори з цеолітами NH_4^+ -ВЕА 30 та H^+ -ВЕА 30.

Показано, що цеоліти NH_4^+ -ВЕА 30 та H^+ -ВЕА 30 у складі біоселективних елементів підвищують чутливість біосенсора до субстрату. Одним із визнаних методів зміни кислотних властивостей цеолітів є зміна іонів Na^+ в рамках цеолітів. Оскільки під час іонного обміну відношення Si/Al підтримувалося постійним на рівні 10 ± 1 , таке збільшення чутливості біосенсорів може бути пов'язане зі збільшенням кислотних властивостей, пов'язаних зі зміною поверхневих груп цеоліту ВЕА. Відомо, що амонієвий обмін цеоліту ВЕА посилює його кислотний характер, що призводить до значно-

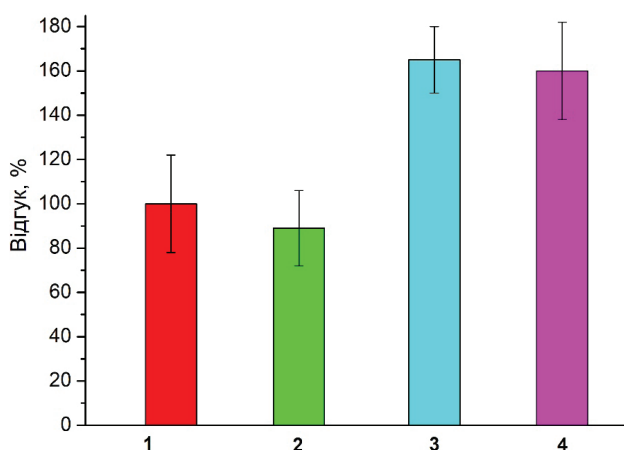


Рис. 10. Відгуки біосенсорів на 6 мМ сечовину без цеолітів Na^+ -ВЕА 30 (2), NH_4^+ -ВЕА 30 (3), H^+ -ВЕА 30 (4). Концентрація цеоліту в мембрані – 5%. Вимірювання проводили в 5 мМ фосфатному буфері, рН 7,4

го збільшення концентрації кислотних центрів Бренстеда і, таким чином, концентрації іонів H^+ , пов'язаних з тетраедрично координованими групами Al-OH-Si в каркасі цеоліту [14]. Також було показано, що відносно підвищення кислотності з подальшим перетворенням NH_4^+ -ВЕА в H^+ -ВЕА може бути практично постійним. Цей факт відповідає характеру реакції каталізу сечовини, яка була прикладом системи гідролізу, яка потребує протону як реагенту. Таким чином було показано, що підвищення кислотності цеоліту ВЕА стимулює уреазну реакцію в результаті збільшення протонних донорних ділянок цеолітної мережі. Однак важливо також перевірити, чи мають цеоліти якийсь негативний вплив на відтворюваність сигналу. Для цього вимірювали реакції біосенсорів на 6 мМ уреазу протягом робочого дня з 20-хвилинними інтервалами, які витримували в робочому буфері при кімнатній температурі. Похибки вимірювання (S_d) були приблизно однаковими (2%) для біосенсорів як з цеолітами, так і без них.

Ще одним параметром, який необхідно досліджувати, є відтворюваність біосенсорної активності після іммобілізації різними методами, так звана взаємовідтворюваність біосенсорів (inter-assay). Біосенсори з 5% концентрацією цеолітів NH_4^+ -ВЕА 30 та H^+ -ВЕА 30 тестувалися разом із контрольними мембранами без цеоліту. Показано, що додавання цеоліту NH_4^+ -ВЕА 30 з концентрацією 5% призвело до покращення взаємовідтворюваності, однак додавання H^+ -ВЕА 30 з концентрацією 5% не спричинило жодних змін. Підвищення концентрації NH_4^+ -ВЕА 30 від 5 до 15% призводило до більшого S_d а, отже, погіршення взаємовідтворюваності.

На наступному етапі була проведена оптимізація концентрації цеоліту в мембрані. До складу мембрани в різних кількостях додавали цеоліти NH_4^+ -ВЕА 30 та H^+ -ВЕА 30. Як видно з рис. 11, оптимальні концентрації цеоліту становили 15% і 7,5% для NH_4^+ -ВЕА 30 і H^+ -ВЕА 30 відповідно. Ймовірно, спостережуване зниження реакції на H^+ -ВЕА 30 при використанні концентрацій вище 7,5% (рис. 11-Б), а також гірша взаємовідтворюваність, що спо-

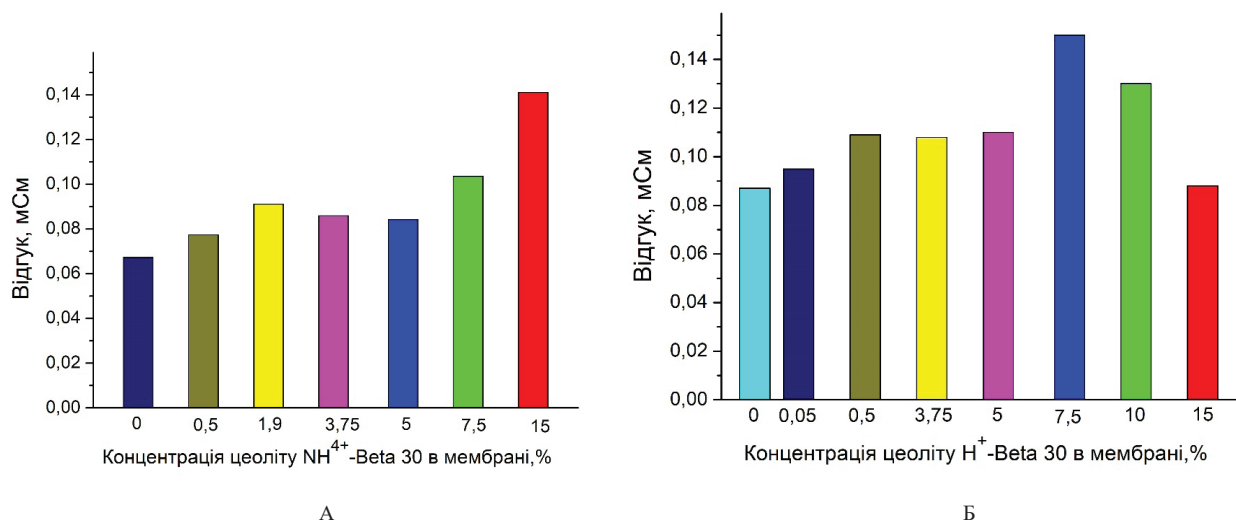


Рис. 11. Залежність відгуків уреазних біосенсорів від концентрації цеоліту в мембрані (А - NH₄⁺-BEA 30; В – H⁺-BEA 30). Кінцева концентрація субстрату – 6 мМ. Вимірювання проводили в 5 мМ фосфатному буфері, рН 7,4

стерігається при використанні 15% NH₄⁺-BEA 30, ймовірно, пояснюється до несумісності та поганого змішування ферментно-цеолітної суміші, нанесеної на перетворювач, що призвело до низької якості іммобілізації біоселективного елемента.

Таким чином, можна досягти найвищої чутливості біосенсора (рис. 11-А) або покращити взаємовідтворюваність біосенсора, змінюючи концентрацію цеоліту NH₄⁺-BEA 30 в біоактивному елементі.

Співвідношення кремнію та алюмінію (Si/Al) є важливою характеристикою цеолітів. Відомо, що цеоліти з більшою кількістю алюмінію мають більші гідрофільні властивості [15]. Очевидно, що гідрофобність цеоліту впливає на взаємодію між молекулами ферменту та кристалами цеоліту. Тому також досліджували вплив співвідношення Si/Al (тобто 30, 40, 50 і 60) цеоліту Na⁺-BEA. Як видно з рис. 12, зменшення співвідношення Si/Al супроводжується зменшенням значень відповіді. Це явище може бути результатом зниження гідрофобних взаємодій між молекулами ферменту та кристалами цеоліту. Відповідно, використання цеолітів з високим співвідношенням Si/Al може бути перспективним підходом для подальшого покращення характеристик біосенсорів.

Крім того, досліджено вплив додавання цеолітів, модифікованих метилвіологеном та іонами срібла. Спочатку цеоліт Na⁺-BEA 40, 50 і 60 модифікували шляхом інтеграції метилвіологена (MV) в їх пори. Очікувалося, що метилвіологен змінить провідність пор; однак збільшення відповідей біосенсорів у порівнянні з біосенсорами, що містять немодифіковані цеоліти, не спостерігалось. Таким чином, ви-

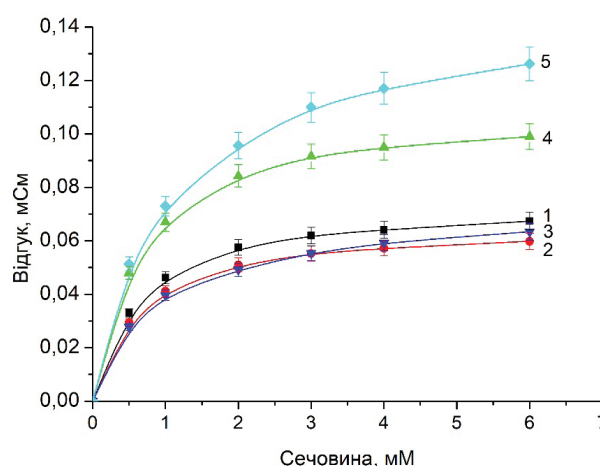


Рис. 12. Калібрувальні криві біосенсорів на основі уреазі, іммобілізованої без цеолітів (1) та з цеолітами: Na⁺-BEA 30 (2), Na⁺-BEA 40 (3), Na⁺-BEA 50 (4), Na⁺-BEA 60 (5). Концентрація цеоліту в мембрані – 5%. Вимірювання проводили в 5 мМ фосфатному буфері, рН 7,4

користання цеолітів, модифікованих метилвіологеном, у кондуктометричних біосенсорах не має сенсу. Крім того, щоб змінити іонні властивості цеоліту Na^+ -BEA 40, 50 і 60, іони срібла були обмінені іонами натрію (Na^+), які вже присутні в синтезованих цеолітах. Було отримано, що іонний обмін срібла і наночастинки срібла, включаючи цеоліти, не дають жодної реакції до введення 5 мМ сечовини. Причиною може бути інгібування уреазу за рахунок іонів срібла, які повільно вивільняються з цеоліту.

4. ВИСНОВКИ

Проведено порівняльне дослідження різних параметрів кондуктометричних біосенсорів на основі уреазу та глюкозооксидази, коімобілізованих з різними типами цеолітів. Зокрема, продемонстровано, що уреазу, іммобілізована на силікаліті-2, мала кращі показники, ніж іммобілізована уреазу без цеоліту. Кондуктометричний біосенсор з глюкозооксидазою, коімобілізованою з цеолітом NH_4^+ -Beta 25, мав подібні значення відгуків у порівнянні з іммобілізованим ферментом без цеоліту. Іммобілізація цеолітів NH_4^+ -BEA 30 і H^+ -BEA 30 разом з уреазою призводить до підвищення відгуку біосенсора, при цьому відтворюваність сигналу залишається незмінною. Біосенсори з цеолітами з більшим співвідношенням Si/Al характеризувались підвищеними сигналами. Використання цеолітів, модифікованих метилвіологеном і сріблом, не дало позитивного ефекту.

Ці результати свідчать про те, що цеоліти різних типів можуть бути використані як альтернатива для іммобілізації ферментів при розробці кондуктометричних біосенсорів. Показано, що різні цеоліти з різними характеристиками призводять до різних результатів для біосенсорів. Таким чином, можна припустити, що різні властивості цеолітів, такі як їх іонообмінна поведінка, розміри частинок, групи поверхні, розміри пор і співвідношення Si/Al, можуть бути адаптовані таким чином, щоб можна було досягти оптимальної продуктивності біосенсора при виборі правильного типу цеоліту та налаштування його характеристик властивостей.

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

Список використаної літератури

- [1]. Dzyadevych S. V. Naukovi ta tekhnolohichni zasady stvorennia miniatiurnykh elektrokhimichnykh biosensoriv / S. V. Dzyadevych, O. P. Soldatkin. – K: Naukova dumka NANU, 2006. – 255 s. (in Ukrainian).
- [2]. Norouzian D., Enzyme immobilization: the state of art in biotechnology // Iranian Journal of Biotech. – 2003. – V.1, N4. – P. 197–206.
- [3]. Karakuş E., Pekyardımcı Ş., Immobilization of apricot pectinesterase (*Prunus armeniaca* L.) on porous glass beads and its characterization // Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic. – 2009. – V.56. – P. 13–19.
- [4]. Johnson M., Li Z., Wang J., Yan Y., Mechanical characterization of zeolite low dielectric constant thin films by nanoindentation // Thin Solid Films. – 2007. – V.515, N6. – P. 3164–3170.
- [5]. Granda Valdes M., Perez-Cordoves A. I., Diaz-Garcia M. E. Zeolites and zeolite-based materials in analytical chemistry // Trends in Analytical Chemistry. – 2006. – 25. – P. 24–30.
- [6]. Meier W. M., Olsen D. H. Atlas of Zeolite Structure Types / New York: Wiley-Interscience. – 1974.
- [7]. Adalgisa Tavolaro, Palmira Tavolaro, Enrico Drioli. Zeolite inorganic supports for BSA immobilization: Comparative study of several zeolite crystals and composite membranes // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. – 2007. – 55. – P. 67–76.
- [8]. Baohong Liu, Fang Yan, Jilie Kong, Jiaqi Deng. A reagentless amperometric biosensor

based on the coimmobilization of horseradish peroxidase and methylene green in a modified zeolite matrix // *Analytica Chimica Acta.* – 1999. – 386. – P. 31–39.

[9]. Öztürk S., Akata B. Oriented assembly and nanofabrication of zeolite A monolayers // *Micropor. Mesopor. Mat.* – 2009. – 126. – P. 228–233.

[10]. Liu A. M., Hidajat K., Kawi S., Zhao D. Y. A new class of hybrid mesoporous materials with functionalized organic monolayers for selective adsorption of heavy metal ions // *Chem. Commun.* – 2000. – 13. – P. 1145–1146.

[11]. Humphrey Hak Ping Yiu, Paul A. Wright, Nigel P. Botting. Enzyme immobilisation using SBA-15 mesoporous molecular sieves with functionalised surfaces // *J. Mol. Catal. B: Enzymatic.* – 2001. – 15. – P. 81–92.

[12]. Dzyadevych S. V., Jaffrezic-Renault N., Conductometric Microbiosensors

for Environmental Monitoring // *Sensors.* – 2008. – V.8. – P. 2569–2588.

[13]. Kukla O. L. Patent Ukrainy na korysnu model «Analoho-tsyfrovyi ionno-sensornyi vymiriuvach parametriv ridkykh seredovysch» / Kukla O. L., Pavliuchenko O. S., Bushma O. V., Holtvianskyi Yu. V., Dzyadevych S. V., Soldatkin O. P. // UA No. 48359 MPK G01N27/26, 27/27 – zaiavl. 26.10.2009, opubl. 10.03.2010 – Biul. No.5. (*in Ukrainian*).

[14]. Kuehl G. H., Timken H. K. C. Acid sites in zeolite Beta: effects of ammonium exchange and steaming // *Micropor. Mesopor. Mat.* – 2000. – 35–36. – P. 521–532.

[15]. Eng-Poh Ng, Mintova S. Nanoporous materials with enhanced hydrophilicity and high water sorption capacity // *Micropor. Mesopor. Mat.* – 2008. – 114. – P. 1–26.

Стаття надійшла до редакції 24.11.2021 р.

UDC543.555+577.15+582.923.5:581.143.6+547.94

DOI: 10.18524/1815-7459.2021.4.248177

ADAPTATION OF THE PROCEDURE OF CO-IMMOBILIZATION OF ENZYMES WITH DIFFERENT MODIFICATIONS OF ZEOLITES ON THE SURFACE OF CONDUCTOMETRIC TRANSDUCERS

O. O. Soldatkin¹, V. M. Arkhypova¹, I. S. Kucherenko¹, D. Y. Kucherenko¹, S. V. Dzyadevych^{1,2}

¹Institute of Molecular Biology and Genetics of National Academy of Sciences of Ukraine, Zabolotnogo Street 150, 03680 Kyiv, Ukraine;

²Institute of High Technologies of Taras Shevchenko National University of Kyiv, 4G Glushkova Av., 03022 Kyiv, Ukraine.

e-mail: alex_sold@yahoo.com, avalka@yahoo.com, kucherenko.i.s@gmail.com, didukh.d@gmail.com, dzyad@yahoo.com

Summary

Zeolites are promising nanomaterials for modification of biosensors due to such characteristics as large specific surface area, porosity, temperature stability, the possibility of simple surface modification by different functional groups, chemical and biological stability, and in some cases, low cost.

The aim of the work was to adapt the procedure of co-immobilization of glucose oxidase and urease enzymes with different modifications of zeolites to the surface of conductometric transducers.

Research methods: The conductometric method of analysis with differential measurement mode was used in the work. Conductometric transducers were used as sensors. The enzymes glucose oxidase and urease, which were co-immobilized with different types of zeolites, were used in the production of the bioselective membrane of the biosensor.

Results: It was shown that urease immobilized on silicalite-2 had better performance than immobilized urease without zeolite. Conductometric biosensor with glucose oxidase co-immobilized with zeolite NH_4^+ -Beta 25 had similar response values compared to immobilized enzyme without zeolite. Immobilization of zeolites NH_4^+ -BEA 30 and H^+ -BEA 30 together with urease leads to an increase in the response of the biosensor, while the reproducibility of the signal remains unchanged. Biosensors with zeolites with a higher Si / Al ratio were characterized by increased signals.

Conclusions: Zeolites of different types can be used as an alternative for immobilization of enzymes in the development of conductometric biosensors. Various properties of zeolites, such as their ion exchange behavior, particle size, surface group, pore size and Si / Al ratio, can be adapted so that better analytical characteristics of biosensors can be achieved.

Keywords: urease, glucose oxidase, conductometric biosensor, zeolites, co-immobilization of enzymes

УДК 543.555+577.15+582.923.5:581.143.6+547.94

DOI: 10.18524/1815-7459.2021.4.248177

АДАПТАЦІЯ ПРОЦЕДУРИ КОІММОБІЛІЗАЦІЇ ФЕРМЕНТІВ З РІЗНИМИ МОДИФІКАЦІЯМИ ЦЕОЛІТІВ НА ПОВЕРХНЮ КОНДУКТОМЕТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

О. О. Солдаткін¹, В. М. Архипова¹, І. С. Кучеренко¹, Д. Ю. Кучеренко¹, С. В. Дзядевич^{1,2}

¹Інститут молекулярної біології та генетики НАН України,
вул. Заболотного, 150, 03680, м. Київ, Україна

²Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
вул. Володимирська, 64, 01003, м. Київ, Україна

e-mail авторів: alex_sold@yahoo.com, avalka@yahoo.com,
kucherenko.i.s@gmail.com, didukh.d@gmail.com, dzyad@yahoo.com

Реферат

Цеоліти є перспективними наноматеріалами для модифікації біосенсорів завдяки таким характеристикам, як велика питома поверхня, пористість, температурна стабільність, можливість простої модифікації поверхні різними функціональними групами, хімічна та біологічна стійкість, і в ряді випадків, невисока вартість.

Мета роботи полягала в адаптації процедури коімобілізації ферментів глюкозооксидаза та уреаза з різними модифікаціями цеолітів на поверхню кондуктометричних перетворювачів.

Методи дослідження: В роботі застосовували кондуктометричний метод аналізу з диференційним режимом вимірювання. Як датчики використовувались кондуктометричні перетворювачі. При виготовленні біоселективної мембрани біосенсора використовували ферменти глюкозооксидаза та уреаза, які були коімобілізовані з різними типами цеолітів.

Результати дослідження: Показано, що уреаза, іммобілізована на силікаліті-2, мала кращі показники, ніж іммобілізована уреаза без цеоліту. Кондуктометричний біосенсор з глюкозооксидазою, коімобілізованою з цеолітом NH_4^+ -Beta 25, мав подібні значення відгуків у порівнянні з іммобілізованим ферментом без цеоліту. Іммобілізація цеолітів NH_4^+ -BEA 30 і H^+ -BEA 30 разом з уреазою призводить до підвищення відгуку біосенсора, при цьому відтворюваність сигналу

залишається незмінною. Біосенсори з цеолітами з більшим співвідношенням Si/Al характеризувались підвищеними сигналами.

Висновки: Цеоліти різних типів можуть бути використані як альтернатива для іммобілізації ферментів при розробці кондуктометричних біосенсорів. Різні властивості цеолітів, такі як їх іонообмінна поведінка, розміри частинок, групи поверхні, розміри пор і співвідношення Si/Al, можуть бути адаптовані таким чином, щоб можна було досягти кращих аналітичних характеристик біосенсорів.

Ключові слова: уреаза, глюкозооксидаза, кондуктометричний біосенсор, цеоліти, коїмобілізація ферментів

СЕНСОРИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ

SENSORS AND INFORMATION SYSTEMS

PACS 07.07.Df УДК 621.391

DOI: 10.18524/1815-7459.2021.4.248178

ПОРТАТИВНІ СЕЙСМІЧНІ СИСТЕМИ (ОГЛЯД)

П. П. Фастиковський, Я. І. Лепіх

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, вул. Дворянська, 2,
м. Одеса, 65082, Україна, e-mails: fpp@te.net.ua, ndl_lepikh@onu.edu.ua

ПОРТАТИВНІ СЕЙСМІЧНІ СИСТЕМИ (ОГЛЯД)

П. П. Фастиковський, Я. І. Лепіх

Анотація. В огляді представлено сучасний стан розвитку портативних (переносних) охоронних та розвідувально-сигналізаційних сейсмічних систем. Показано особливості застосування та переваги таких систем над стаціонарними. Описано загальні тенденції в конструюванні переносних охоронних та розвідувально-сигналізаційних систем. Наведено основні конструктивні особливості і характеристики систем, що серійно виготовляються для використання у цивільних та військових цілях.

Ключові слова: сейсмічний сенсор; наземний сенсор, що не обслуговується (UGS); переносна охоронна та розвідувально-сигналізаційна система

PORTABLE SEISMIC SYSTEMS (OVERVIEW)

P. P. Fastikovsky, Ya. I. Lepikh

Abstract. The review presents the current state of development of portable (transportable) guard and reconnaissance-signaling seismic systems. The features of application and advantages of such systems over stationary are shown, the general trends in the design of the portable guard and reconnaissance-signaling systems are to be described. The main design features and characteristics of systems that serially produced for civilian and military use are given.

Keywords: seismic sensor, unattended ground sensor (UGS), portable guard and reconnaissance-signaling system

ПОРТАТИВНЫЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (ОБЗОР)

П. П. Фастиковский, Я. И. Лепих

Аннотация. В обзоре представлено состояние современного развития портативных (переносных) охранных и разведывательно-сигнализационных сейсмических систем. Показаны особенности применения и преимущества переносных систем над стационарными системами, выявлены общие тенденции в конструировании переносных охранных и разведывательно-сигнализационных систем. Приведены их основные конструктивные особенности и характеристики серийно выпускаемых для использования в гражданских и военных целях.

Ключевые слова: сейсмический сенсор, необслуживаемый наземный сенсор (UGS), переносная охранная и разведывательно-сигнализационная система

1. ВСТУП

Охоронні та розвідувально-сигналізаційні сейсмічні системи (ОРССС) призначені для встановлення як факту порушення межі території, що контролюється, так і типу об'єкту проникнення (людина, тварина, транспортний засіб) на основі аналізу сейсмічних коливань ґрунту, викликаних таким об'єктом. Коливання ґрунту спочатку перетворюються в електричний сигнал за допомогою механо-електричних перетворювачів генераторного типу, найчастіше – індукційних (геофони) або п'єзоелектричних [1, 2]. Далі перетворений сигнал надходить до блоку обробки, де здійснюється селекція корисних сигналів від завод і класифікація об'єктів, що рухаються.

ОРСС поділяються на стаціонарні та такі, що можуть бути швидко розгорнуті – портативні (переносні). Стаціонарні системи використовуються для постійної охорони периметру будь якої території. Тому для них не так важливі такі параметри як маса, габаритні розміри, енергоспоживання та непомітність на місцевості. Пост охорони при цьому знаходиться на одному постійному місці, куди інформація від системи сейсмічних сенсорів для обробки і аналізу поступає, як правило, по дротах і звідки забезпечуються електроживлення і команди управління.

Переносні системи використовуються як для тимчасової охорони різних об'єктів, так і для розвідувальних цілей. Вони встановлюються в районі доріг або стежок чи потенційних шляхів проникнення, причому час їх

установки займає не більше кількох хвилин. Переносна система може бути як протяжною, що складається з багатьох розташованих на деякій відстані один від одного сейсмічних сенсорів, так і точковою, що містить один сейсмічний сенсор [3]. Такі віддалені від центра управління системи живляться від невеликих автономних джерел і можуть автономно функціонувати продовж багатьох місяців. Головною перевагою переносних систем є їх скритність на контрольованих ділянках, а також їх висока інформативність при мінімумі енергоспоживання. Передача інформації про виявлення рухомого об'єкта в зоні дії системи на пульт управління і індикації (ПУІ) здійснюється за допомогою радіоканалу, в тому числі з використанням ретрансляторів. В останньому випадку система може комплектуватися декількома переносними ПУІ, що забезпечує тактичну гнучкість. Місця установки переносних систем позиціонуються по мапі місцевості вручну, або автоматично за допомогою супутникової глобальної системи визначення місця розташування і можуть бути візуалізовані на моніторі переносного комп'ютерного пристрою.

Перевагами переносних систем у порівнянні із стаціонарними є [4]:

- менша маса і габаритні розміри, менший час розгортання;
- мобільність, тобто можливість швидкого переустановлення на іншій території, у тому числі на непідготовлений в інженерному відношенні місцевості;
- малопомітність при маскуванні;

- можливість роботи з декількома переносними пультами відображення інформації, що забезпечує оперативність управління системою.

2. ПЕРЕНОСНІ ОРССС ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Переносні ОРССС з сейсмічними сенсорами можна умовно поділити на дві групи – охоронні та розвідувально-сигналізаційні системи. Основними завданнями, які вирішуються переносними охоронними системами, є потайне виявлення порушників в місцях, де стаціонарна система з яких-небудь причин не встановлена, або необхідне посилення охорони периметра в окремих зонах. Такі системи виявляють несанкціоноване вторгнення людей чи транспорту і передають сигнал тривоги до ПУІ. Розгортання систем здійснюється вручну. Основне завдання розвідувально-сигналізаційних систем – скритна розвідка на неконтрольованій території (в тому числі під час воєнних дій) в зоні ймовірного пересування противника (стежки, дороги, балки). Такі системи призначені, в основному, для непомітного виявлення, класифікації, підрахунку та визначення напрямку пересування живої сили і рухомої техніки, передачі по радіоканалу даних на ПУІ, які можуть бути віддалені на десятки кілометрів. Системи і ретранслятори можуть комплектуватися пристроями самознищення, що спрацьовують, наприклад, при спробі демонтажу або розряді джерела живлення. Установка засобів виявлення в деяких системах може здійснюватися з повітря (вертольоти) або за допомогою артилерії.

Переносні ОРССС з сейсмічними сенсорами можуть складатися з одного або з декількох зв'язаних між собою кабелем або радіозв'язком сенсорів. При роботі у віддаленому автономному режимі такі сенсори називаються наземними сенсорами, що не обслуговуються (*unattended ground sensors – UGS*) [5, 6]. Наземний сенсор означає сенсор, розташований як на поверхні землі, так і закопаний в ній. В сучасних переносних системах для отримання більш повних даних про рухомі об'єкти сейсмічні сенсори доповнюють інши-

ми типами сенсорів – акустичними, магнітними, оптичними інфрачервоними тощо. Якщо сенсорів багато, то вони можуть утворювати бездротові сенсорні мережі (*wireless sensor network – WSN*) [7].

Для сучасних розробок провідних зарубіжних компаній характерні деякі загальні тенденції в конструюванні переносних ОРССС: застосування нових економічних електронних компонентів і нових на основі літію джерел живлення; використання, крім сейсмічних, перетворювачів інших фізичних величин; використання мультисенсорного комплексу; створення бездротових сенсорних мереж; використання новітніх цифрових методів обробки сигналів; створення ефективних алгоритмів розпізнавання людей та техніки.

Однією з найбільш надійних переносних охоронних систем з сейсмічними сенсорами на даний час є комплекс “PSICON” (*Perimeter security and intrusion classification system*), що випускається англійською компанією *Geoquip* [8, 9]. В ньому у якості сейсмічних перетворювачів використовуються геофони (рис. 1). При монтажі геофонів під землею система “PSICON” надійно виявляє людину, яка селитно йде або повзе. Всі геофони підключені до загального аналізатору, який обробляє сигнали і видає сигнал тривоги при локалізації вторгнення. Геофони з'єднуються армованим багатожилним кабелем і поставляються у вигляді готових до укладання в землю кіс. В аналізаторі системи використовується потужний процесор для обробки сигналів і фільтрації завад, що створюються навколишнім середовищем (шум транспорту, рух коренів дерев, дощ тощо.). Аналізатор використовує принцип розпізнавання образів і порівняння їх з еталонними, що записані в пам'яті процесора. Порівняння відбувається в реальному масштабі часу і дозволяє надійно розпізнавати слабкі сигнали від порушника на фоні навіть значних інтенсивних завад або шумів. Систему можна «навчати» безпосередньо на об'єкті, зберігаючи в пам'яті процесора як «тривожні», так і «перешкоджаючі» сигнали. Аналізатор “PSICON” має габаритні розміри 400x300x110 мм і споживає струм 500 мА при номіналь-

ній напрузі джерела 12 В. Діапазон робочих температур системи: від -25 до $+70$ °С. Виявлення людини досягається на відстані до 20 м. Недоліком системи є необхідність сезонних налаштувань в процесі експлуатації, а також значне енергоспоживання.

До класу переносних охоронних систем можна віднести також комплекс охорони периметру “CLASSIC 2000” (Covert Local Area Sensor System for Intruder Classification) компанії Racal Radio Ltd відомого концерну Racal (Великобританія) [10]. У комплекс входять комбінації сенсорів декількох типів: сейсмічні сенсори (з геофонами), п’єзоелектричні вібраційно-чутливі кабелі, пасивні інфрачервоні сенсори; контактні сенсори (розмикаючі дроти, сенсори тиску). Всі сенсори об’єднуються в групи відповідно до конфігурації зон охорони. Кожен сенсор системи має автономне живлення, блок обробки сигналу та конструктивно об’єднаний з радіопередавачем сигналів тривоги. Сейсмічні сенсори системи “CLASSIC 2000” (рис. 2) дозволяють не тільки виявляти, але й класифікувати рухомі об’єкти, виділяючи три категорії: гусеничний транспортний засіб, колісний транспортний засіб, людина. Відстань, на якій ці сенсори виявляють об’єкт,

залежить від типу і стану ґрунту, а також температури повітря. Так, за сухої теплої погоди радіус виявлення пішохода становить до 25 м, а транспортний засіб виявляється на відстанях не менше 30 м. Система дозволяє визначити не тільки наявність об’єктів, але також їх кількість. Алгоритм обробки сейсмосигналу має адаптивний поріг для зниження рівня помилкових тривог, що викликаються, наприклад, коливаннями ґрунту під час дощу. Розміри корпусу сейсмічного сенсора з батареями живлення (8 «АА» батарейок) – 120x120x52 мм, вага 0,85 кг, розмір власне геофону – 100xФ29 мм. Система призначена головним чином для використання армією, воєнізованими підрозділами, поліцією і спецслужбами. Систему “CLASSIC-2000” відрізняють швидкість розгортання, простота інтерфейсу користувача, велика інформативність.

До переносних охоронних систем сухопутних військ США відноситься автономна тактична автоматизована система забезпечення безпеки TASS (Tactical Autonomous Security System) компанії Qual-Tron [11, 12]. Ця система базується або на мініатюрній системі виявлення MIDS, або на поліпшеній системі EMIDS. TASS має відкриту архітектуру і об’єднує під-

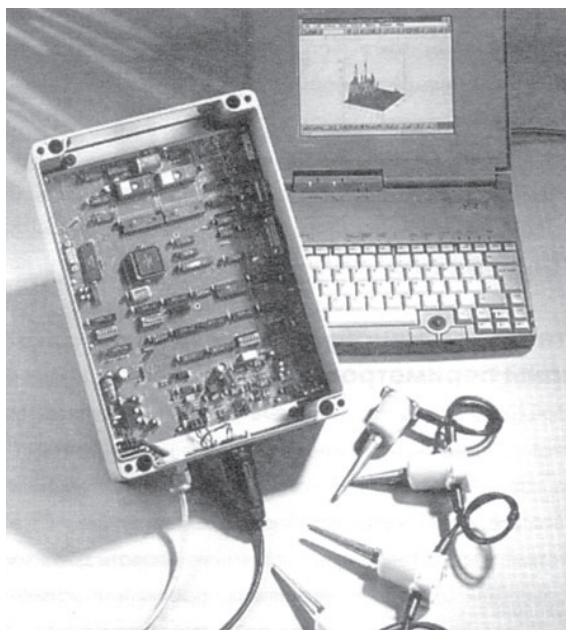


Рис. 1. Геофони і аналізатор сейсмічної системи “PSICON” [9]

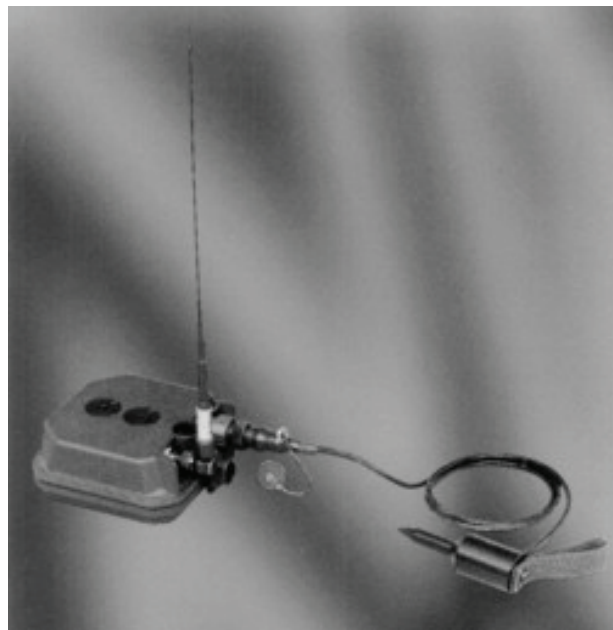


Рис. 2. Сейсмічний сенсор системи “CLASSIC 2000” [10]

системи, комплекси і пристрої, що працюють на різних фізичних принципах. До складу систем MIDS/EMIDS входять сейсмічні, магнітні, інфрачервоні активні і пасивні сенсори. Вага повного комплексу становить 5,5 кг. Далекість виявлення людини, що рухається, сейсмічними сенсорами становить приблизно 20 м. Дані про виявлення рухомого об'єкту передаються в цифровій і аналоговій формі радіопередавачем на пост спостереження і далі через комп'ютерний пристрій можуть транслюватися по телефонних і супутникових каналах зв'язку. MIDS-EMIDS може спрягатися з системами «CLASSIC 2000», «REMBASS», «IREMBASS». Вона використовується більш ніж в 50 країнах світу. Досвід бойового застосування цієї системи в Іраку і Афганістані показав її високу ефективність і надійність.

До класу переносних ОРССС відноситься також ізраїльська система “SensoGuard unattended ground sensors (UGS) system” [13]. У цій системі використовуються сейсмічні сенсори SG-1 з геофонами, які оперативно встановлюються на поверхні землі або на деякій глибині під землею і які віддалено дозволяють виявляти рухомих людей і транспортні засоби. Радіус виявлення людини цими датчиками становить 12 м, а транспорту – 25 м. Напруга живлення – від 3 до 24 В, час автономної роботи при дротовому з'єднанні сенсорів – до 3 місяців, робоча температура – від – 30 до +70 °С. У армійському варіанті бездротової мережі сенсорів (WSN) при використанні потужного літійового джерела живлення час автономної роботи системи зростає до 3 років, а у варіанті віддаленого сейсмічного сенсора з передачею даних по GSM каналу – до 1 року. Габаритні розміри корпусу сенсора SG-1 (блок обробки і передавач) з батареєю живлення – 120x120x52 мм, вага – 0,85 кг.

На озброєнні Росії знаходиться комплекс розвідувально – сигналізаційних засобів (РСЗ) 1К18 «Реалія-У», який призначений для дистанційного виявлення пересування особового складу та техніки у тилу супротивника і на лініях вірогідного зіткнення з ним та передачі відомостей про виявлені об'єкти по радіоканалу за допомогою пристроїв прийому і відобра-

ження інформації в масштабі часі, близькому до реального. Всі РСЗ поряд з функціональними блоками обробки сигналів, що надходять від сейсмічних, акустичних і магнітних перетворювачів, мають малопотужний передавач з антеною, джерело електроживлення і елемент, що забезпечує як неможливість знешкодження РСЗ, так і можливість їх самоліквідації. За допомогою сейсмічного РСЗ 1Б37 виявлення особового складу відбувається на відстанях 30-70 м, колісної та гусеничної техніки – до 500 м. Вага 1Б37 складає 5 кг [14].

Малогабаритний комплекс сейсмічних РСЗ 1К124 «Табун» (Росія) призначений для дистанційного виявлення пересування особового складу (до 50 м) та техніки (до 200 м). Тривалість автономної роботи складає не менше 6 діб, вага – 0,95 кг [14]. Перші варіанти систем 1К18 та 1К124 використовувались ще у війні СРСР в Афганістані.

Сучасний сигналізаційний комплекс «Радіобарьер» (ООО Полюс-СТ, Росія) – це переносна автономна бездротова малогабаритна охоронна система, призначена для виявлення порушника, який проник на контрольовану ділянку місцевості [15]. Особливості комплексу: мобільність, автономність, скритність, надійність, інформативність, універсальність. У комплексі використовуються радіосигналізатори, що працюють на різних фізичних принципах – інфрачервоний, радіохвильовий, магнітний, – і радіосигналізатор універсальний РС-У, що складається з сейсмічного сенсора і сенсора обривного типу, ретранслятора тривожних і сервісних повідомлень і пристрою для зв'язку з пультом оператора. Радіосигналізатори дозволяють виявити порушника і ідентифікувати його за типом (людина або транспортний засіб). Використовується також автономна система відеоспостереження, яка включається по сигналу від будь-якого засобу виявлення або по команді оператора. Тривожне повідомлення передається по радіоканалу за допомогою ретранслятора(ів) на переносний контрольний приймач і (або) пульт оператора. Сигналізатори РС-У разом з літійовими джерелами живлення встановлюються в ґрунт на глибину 20-30 см, а на поверхні знаходиться

тільки антена у вигляді тонкого дроту. РС-У може працювати на будь-яких типах місцевості, в будь-яких ґрунтах, зберігає працездатність під снігом, не вимагає сезонних налаштувань і періодичного обслуговування. Час автономної роботи від одного джерела живлення без підзарядки і заміни складає до 5 років; діапазон робочих температур становить від -40 до +50 °С. Вага РС-У становить 0,7 кг, а габаритні розміри – 120х64х64 мм. Сейсмічний засіб РС-У за допомогою вбудованого геофона виявляє людину на дальності до 100 м, автомобіль – до 200 м (чутливість регулюється по радіоканалу). Час установки одного РС-У становить близько 5-10 хвилин. Після підключення живлення до РС-У вбудований мікропроцесор безперервно обробляє сейсмічний сигнал і формує сигнали тривоги тільки в тому випадку, якщо сигнал схожий з кроками людини або рухом транспортного засобу. Підключений до комп'ютера РС-У організовує обмін даними між радіомережею і картографічною системою. Це дає можливість наочно відобразити встановлені радіосигналізатори на карті або плані місцевості, дистанційно керувати параметрами і режимами їх роботи. Регулювання чутливості і вибір функції РС-У (сейсмічний, обривний засіб виявлення або ретранслятор) здійснюється по радіоканалу з переносного контрольного приймача або персонального комп'ютера. При регулюванні чутливості сейсмічного засобу виявлення можна визначити рівень сейсмошумів в режимі реального часу і, якщо це необхідно, налаштувати чутливість для досягнення необхідного радіуса виявлення.

На озброєнні армії США знаходиться система дистанційно керованих РСЗ, яка отримала назву “REMBASS” (Remotely Monitored Battlefield Sensor System) розробки компанії L-3 Communications – East (США). Модифіковані системи – “IREMBASS” і “REMBASS-II”. Всі ці системи призначені для ведення розвідки в усіх видах бою на будь-якому театрі військових дій [16, 17]. РСЗ систем використовуються при спостереженні за великими за площею ділянками місцевості, позиціями противника, районами зосередження, шляхами руху військ, водними перешкодами і перепра-

вами в реальному масштабі часу, забезпечуючи при цьому можливість не тільки виявляти, але й розпізнавати цілі (гусеничну і колісну техніку, особовий склад), а також фіксувати час, напрямок, швидкість руху і визначати довжину колон військової техніки. Крім того, передбачається прикриття РСЗ мінних полів та інших загороджень, а також закидання в передбачувані або заздалегідь намічені райони (рубезі) дистанційного мінування або в заплановані райони висадки морських (повітряних) десантів.

Система “REMBASS-II” являє собою систему UGS, яка в пасивному режимі виявляє, класифікує та визначає напрям руху людей і транспортних засобів, що проникли в контрольовану системою зону. Її РСЗ включені в єдину мережу і пов'язані між собою через інтегровану УКХ – радіостанцію (рис. 3) [17]. Також передбачається передача даних виявлення на віддалений командний центр через супутникову систему зв'язку. РСЗ розгортаються на видаленні 50–350 м один від одного на найімовірніших напрямках руху мобільних об'єктів (дороги, переправи і ін.). Вони можуть встановлюватися вручну (наприклад, силами розвідувально-диверсійних груп) або дистанційно (за допомогою авіації, артилерії, дистанційно керованих машин – роботизованих засобів). Кожен РСЗ включає сенсор, радіопередавач, електронний блок обробки сигналу і акумуляторну батарею. У комплект кожної системи входять РСЗ трьох типів: сейсмоакустичні МК-2967/GRS, магнітні МК-2966/GRS та інфрачервоні МК-2965/GRS. Система може бути доповнена додатковими типами сенсорів – хімічними/біологічними, радіочастотними, метеорологічними – без зміни та оновлення апаратного та програмного забезпечення. В сейсмоакустичних РСЗ основним каналом прийому є сейсмічний. Акустичний канал включається додатково для розпізнавання цілі по супроводжуваним їй рух звуків. У якості сейсмічних і акустичних перетворювачів в них використовуються заглиблені в ґрунт геофони і розташовані над землею мікрофони, відповідно. В даний час саме РСЗ з такими сенсорами отримали найбільш широке поширення. Характерні особливості сей-

смічних сигналів аналізуються вбудованим в електронний блок обробки сигналу логічним пристроєм, який визначає тип виявленої цілі: особовий склад, транспортний засіб (колісний або гусеничний). Потім координати цілі і дані її класифікації передаються передавачем РСЗ на пристрій управління системою і відображення отриманих розвідувальних даних, що знаходиться в пункті управління військами. Сейсмоакустичний РСЗ може визначати гусеничні транспортні засоби до 350 метрів, вантажні автомобілі до 250 метрів і людей до 75 метрів. Його вага складає 1,2 кг, габаритні розміри – 18,9x10,4x8,0 см, робочий діапазон температур – від -40 до +65 °С. Час автономної роботи з літєвою батареєю становить 3 місяця [16]. РСЗ системи можуть визначати не тільки тип об'єкту, що рухається, але його кількість, напрям руху та швидкість, а також локацію. До комплекту REMBASS-II включений радіоретранслятор RT-1175C / GSQ, що має дальність передачі до 15 км. Дальність може бути збільшена до 150 км, за рахунок використання БПЛА в якості ретранслятора, або до глобальних дальностей при використанні блоку ретранслятора супутникового зв'язку. Система знаходиться на озброєнні сил спеці-

альних операцій, сухопутних військ і військово-повітряних сил США і Ізраїлю та успішно застосовувалася в Іраку і Афганістані [18]. На думку зарубіжних військових фахівців система REMBASS-II на сьогоднішній день є досконалим і концептуально завершеним засобом ведення розвідки.

На озброєнні сухопутних військ США знаходяться також мобільні системи РСЗ «SCORPION» та «SCORPION-II» (SCORPION: Unattended Target Recognition Systems) виробництва американської корпорації *Northrop Grumman* [19]. Вони призначені для таємного дистанційного виявлення і стеження за пересуванням людей і наземної техніки, а також для класифікації об'єктів в тактичній (оперативно-тактичній) глибині. Всі РСЗ встановлюються вручну, а необхідний на це час не перевищує декількох хвилин. РСЗ виконані в спеціальному захисному металевому корпусі і розраховані на автономну експлуатацію в несприятливих кліматичних умовах. До комплекту кожного РСЗ системи «SCORPION» входять: один сенсор, електронний блок обробки з УКХ – передавачем і акумуляторна батарея. В електронний блок обробки задалегідь встановлено універсальне програмне забезпечення для попередньої обробки даних від сенсорів різного типу. Для підвищення ефективності сенсорів і зниження ймовірності їх помилкового спрацювання в РСЗ використовується регулювання порога чутливості. Спрацювання сенсора в електронному блоці обробки РСЗ формує кодований сигнал, який потім передається на командний пункт.

В системі «SCORPION-II» [20] використовуються РСЗ комбінованого типу, які мають менші масогабаритні характеристики і енерговитрати, а також збільшений в два рази час безперервного функціонування (до шести місяців). До основного складу такого РСЗ входять три сенсора – сейсмічний, магнітометричний і пасивний інфрачервоний. Комбінація може бути змінена за допомогою акустичних, гідроакустичних, хімічних/біологічних та оптичних сенсорів. Виявлення людини сейсмічним сенсором відбувається на відстані до 15 м, а транспортного засобу – до 50 м в діапазоні



Рис. 3. Основні елементи системи «REMBASS-II» [9]: 1 - засіб індексації та програмування AN/PRQ-16 (для прийому даних від РСЗ); 2 - інфрачервоний РСЗ МК-2965/GRS; 3 - радіоретранслятор; 4 - станція обробки (польовий комп'ютер); 5 - сейсмоакустичний РСЗ МК-2967/GRS; 6 - магнітний РСЗ МК-2966/GRS

температур від -25 до $+60$ °С. Відмінними рисами даної системи є:

- модульна, відкрита і нарощувана архітектура для налаштування РСЗ в ході ведення бойових дій (операцій);

- адаптований, безпечний, двосторонній зв'язок через лінії ближнього УКХ – радіозв'язку або заобрійного зв'язку (система супутникового зв'язку «Iridium»);

- функціональна сумісність з сенсорами різного типу (сейсмічний, магнітометричний або комбінований сейсмічний / магнітометричний, акустичний, пасивний інфрачервоний);

- низьке енергоспоживання елементів системи, збільшений час безперервного їх функціонування та ін.

На початку 2000-х років на озброєння сухопутних військ США була прийнята нова система РСЗ RF-5400 Falcon Watch виробництва компанії Harris Corporation (в даний час – L3 Harris Technologies). Дана система призначена для таємного автоматичного дистанційного виявлення і спостереження за пересуванням людей і наземної техніки, а також для стеження за мобільними і стаціонарними об'єктами в тактичній (оперативно-тактичній) глибині [21]. Всі РСЗ системи встановлюються вручну. Вони включають сейсмічні, пасивні інфрачервоні і магнітні сенсори. Кожний РСЗ включає до свого складу один-три сенсора, електронний блок обробки з УКХ – передавачем і акумуляторну батарею. В електронний блок обробки встановлено універсальне спеціальне програмне забезпечення, яке використовує єдиний алгоритм попередньої обробки даних для різних типів сенсорів. Застосування регульованого порога чутливості датчиків значно знижує ймовірність їх помилкового спрацьовування. Для визначення напрямку руху об'єктів в системі застосовується кутомірний спосіб. Дальність виявлення сейсмічним датчиком людини становить 15 м, транспортного засобу – 50 м. Окремо існує акустичний РСЗ з решіткою мікрофонів, призначений для виявлення транспортних засобів, літальних апаратів, визначення пеленгу на них та передачі цих даних на станцію їх обробки. Спеціальне програмне забезпечення дозволяє відстежувати місце роз-

ташування об'єктів в контрольованому районі і в реальному масштабі часу відображати дані поточної тактичної обстановки на тлі електронної карти місцевості.

Система Falcon Watch може застосовуватися або для охорони і спостереження за підконтрольною територією, або для ведення розвідки в глибині території, зайнятій противником. В обох випадках задіюються РСЗ і ретранслятори, що забезпечують зв'язок на дальність прямої радіовидимості, при цьому дані оповіщення (сигнали тривоги) надходять на УКХ – радіостанції. В системі при спрацьовуванні сенсорів на контрольованій ними території РСЗ проводять попередню обробку вхідних даних для виключення помилкового спрацьовування. У разі прийняття позитивного рішення формується сигнал тривоги у вигляді синтезованого голосового повідомлення (наприклад: «сенсор № 8, автомобіль») або формалізованого текстового повідомлення про об'єкт із зазначенням номера активованого сенсора і типу виявленого об'єкта по закритому каналу УКХ – радіозв'язку прямої видимості і через ретранслятори поступає на станцію обробки даних і управління, що розміщена на пункті управління.

Майже всі наведені вище системи по суті є системами з віддаленими наземними сенсорами, що не обслуговуються – так звані Unattended Ground Sensors (UGS) systems [5]. Одна з основних причин впровадження технології автоматичних наземних сенсорів полягає в тому, що жоден сенсор, будь то сейсмічний, акустичний, оптико-електронний, магнітний, інфрачервоний або радіолокаційний, не може забезпечити повне покриття всіх цілей на всіх дистанціях. Замість цього застосовується багаторівневий підхід, тобто одночасне розгортання кількох різних типів повністю взаємопов'язаних сенсорів з метою отримання якомога більшого обсягу інформації з місця дії, що знаходиться під наглядом. Ці системи встановлюються вручну або скидаються з вертольота чи літака. Більш ранні (по виготовленню) системи містять окремі РСЗ з сенсорами певного типу, підключеними до віддаленого центру контролю і управління за допомогою

радіоканалу з використанням ретрансляторів або через супутник. Кожен окремий РСЗ забезпечує роботу одного сенсора і не поєднує дані від інших сенсорів. На противагу цьому, нові системи UGS використовують мультисенсорне об'єднання і високошвидкісну обробку для поліпшення виявлення і класифікації цілей. Численні типи сенсорів можуть бути інтегровані в мережеву систему сенсорів, що забезпечує енергоефективність та підтримує спільну обробку даних і інформації. По сенсорній мережі UGS система може здійснювати виявлення рухомих об'єктів, їх відстеження, локалізацію і розпізнавання. Надійна інформація про цілі може бути отримана шляхом об'єднання інформації, отриманої від різних типів сенсорів, спільно розташованих на одному і тому ж UGS. Об'єднання сенсорів більш високого рівня, включаючи інформацію з різних UGS, також може підвищити продуктивність. Наприклад, об'єднання інформації від сейсмічних, акустичних та інфрачервоних сенсорів може поліпшити класифікацію та ідентифікацію цілей, а об'єднання інформації про пеленг з різних UGS можна використовувати для триангуляції і оцінки місця розташування об'єктів [5]. UGS передають дані в центр контролю по бездротовим радіочастотним каналах або через супутник.

У UGS є багато переваг, які можна використовувати в ОРССС. Такі системи в основному працюють у пасивному режимі (тільки прийом), що знижує вимоги до їх енергоспоживання і можливості виявлення. UGS можуть працювати автономно місяцями завдяки сучасним акумуляторам, а невеликий розмір і фіксоване розташування ускладнюють їх візуальне виявлення. Так як акумулятор в першу чергу визначає розмір і вагу UGS сенсора, то для підтримки його тривалої автономної роботи вирішальне значення має енергоефективність передавача [22]. Цінова доступність сучасних UGS дозволяє розгорнути їх у великій мережі. До UGS систем пред'являються наступні експлуатаційні вимоги: пасивний тип датчиків, невисока вартість, широка зона покриття, міцність і стійкість до погодних умов, розпізнавання цілей, можливість віддаленого

моніторингу і перепрограмування, тривалий термін служби (в залежності від місії), надійний радіозв'язок, захист від злому.

Концепція об'єднання декількох сенсорів використана в мультисенсорних виробках Umra 1G ID, Umra 1G CL і Umra Mini шведської компанії Exensor [23]. Сенсорний блок Umra 1G ID включає два зонда з п'ятьма сенсорами, включаючи один сейсмічний, один акустичний і три магнітних сенсора. Інформація, зібрана цими сенсорами, передається за допомогою радіорелейної лінії на базову станцію, яка складається з переносного комп'ютера і радіоприймача, що працює під управлінням спеціалізованого програмного забезпечення Umra. Використовуючи базову станцію, оператор може бачити і аналізувати інформацію, отриману від сенсорів. Це програмне забезпечення також включає шаблони транспортних засобів для того, щоб оператор міг визначити тип машини, що маневрує поблизу від датчика, а також її швидкість і напрямок руху. Сенсори можуть виявляти людей на відстані 15 м., а виявлення транспортних засобів можливо на дистанції 200 м.

Сенсор Umra Mini має сейсмоприймач і мікрофон для виявлення і класифікації різних цілей: особовий склад на дистанції до 50 м і важкі машини – до 500 м. Ці сенсори можуть об'єднуватися в бездротову комірчасту мережу, що самовідновлюється. Компанія Exensor також поставляє «інструментарій», який підключає ці сенсори до просунутої комірчастої мережі з малим енергоспоживанням.

UGS система «DARPA» (США) [24] складається з чотирьох вузлів сенсорів різного типу (включаючи радіочастотний), перехідного мережевого вузла і командного пульта оператора. Сенсорні вузли містять пасивні сейсмічні і акустичні сенсори і мережу зв'язку ближньої дії для взаємодії з перехідним мережевим вузлом. У таких систем є GPS і можливість точного визначення своєї локації. Пристрій перехідного мережевого вузла збирає цільову інформацію від сенсорних вузлів по WSN для визначення діапазону цілей, пеленга, класифікації і характеристик цілей для ідентифікації. Він також містить «далекобійне»

комунікаційне обладнання, необхідне для відправки інформації на пульт управління на відстань до 25 км. При дальності до цілі не більше 500 м ймовірність її виявлення становить понад 70%, а ймовірність помилкового виявлення – менше 10%.

Англійська фірма Digital Barriers виготовляє UGS систему «RDC» [25]. Виявлення сейсмічним датчиком цієї системи (рис. 4) людини відбувається на відстанях до 30 м, а великих транспортних засобів на ґрунті – до 100 м. Тварин UGS «RDC» не відокремлює, тому при їх появі в зоні контролю UGS виникають помилкові спрацювання UGS. Діаметр UGS становить 90 мм, а вага – 0,5 кг; робоча температура – від -20 до +70 °С. Літєва батарея забезпечує безперервну роботу сенсора до 6 місяців.



Рис. 4. Сейсмічний сенсор UGS «RDC 2» [25]

Компанія Pathfinder (США) виробляє сейсмічні сенсори E-UGS (рис. 5), які можуть працювати як окремо, так і в системному режимі WSN і виявляти людину та транспортні засоби [26]. Габаритні розміри сенсора: 66 x 195,6 мм, вага – 453 г. Літєва батарея забезпечує роботу сенсора продовж року.



Рис. 5. Сейсмічний сенсор E-UGS [26]

Болгарська фірма High-tech IMS Ltd виробляє сейсмічні UGS сенсори (рис. 6), які здатні виявляти: людину на відстані до 50 м, колісну техніку – до 100 м і гусеничну техніку – до 300 м [27]. Але при цьому вірогідність коректного виявлення низька: $\approx 70\%$. Робочий діапазон температур складає від -25 до +60 °С. Живлення забезпечується літєвою батареєю з напругою 3,6 В. Вага сенсора складає 870 г.



Рис. 6. UGS сейсмічний сенсор фірми High-tech IMS Ltd [27]

Чеська фірма EVPU Defence виробляє сейсмічні системи UGS для виявлення людини та транспортних засобів [28]. Кожний UGS являє собою мультисенсор, що включає в себе сейсмічний сенсор та сенсор обривного типу. UGS також може працювати як ретранслятор. Система з таких UGS крім виявлення рухомих об'єктів може визначати напрямок їх руху, швидкість та координати. Далекість виявлення людини – 100 м, а транспортних засобів – 200 м. Автономність роботи складає до 6 років (у компактному варіанті – 3 міс.). Глибина закопування мультисенсорів складає 30-50 см.

Для виявлення людини і транспортних засобів американська компанія McQ Inc. розробила та виготовила UGS для WSN мереж [29]. Кожний UGS сенсор складається з сейсмічного, акустичного та магнітного перетворювачей. По сейсмічному каналу сенсор може виявляти людину та транспортні засоби. Габаритні роз-

міри одного сенсора системи: 70 x 51 x 33 мм, вага – 134,5 г, діапазон робочих температур від -20 до +60°C.

Ізраїльська компанія IAI Elta Systems [30] розробила оригінальні UGS сенсори, які можуть встановлюватися за допомогою відстрілу з міномета. Вони є частиною мережі автоматичних наземних сенсорів EL / I-6001 цієї компанії. Сейсмічні та акустичні сенсори артилерійської доставки можуть працювати без зовнішнього джерела живлення до 30 днів, визначати рухомих людей на дистанції 30-50 метрів і транспортні засоби до 500 метрів. Система EL / I-6001 може доповнюватися автоматичним оптико-електронним сенсором, який визначає важкі автомобілі на відстані понад 500 метрів і людей понад 100 метрів, а також опціональним мініатюрним радаром, що працює на сонячній енергії і має дальність визначення транспортних засобів і людей 300 метрів. Всіма цими сенсорами можна управляти з відповідного центру командування і управління EL / I-6001, який включає комп'ютер управління, людино-машинний інтерфейс, модем і приймач для мережі автоматичних наземних сенсорів.

Компанія Elbit Systems Ltd (Ізраїль) виготовляє інтелектуальні універсальні мережеві сейсмоакустичні сенсори «SAND» (Smart All-Terrain Networked Detector), які, за твердженням компанії, можуть визначити рух транспортних засобів і людей на будь-якій місцевості [31]. Ці сенсори (рис. 7) можна з'єднувати в бездротову мережу і використовувати



Рис. 7. Сенсор «SAND» компанії Elbit Systems [31]

вати в самих різних додатках, наприклад, при охороні периметрів і для розпізнавання на полі бою. Що стосується розміщення, то сенсори можна розмістити або прямо на ґрунті, або закопати на невелику глибину. Пропонуються різні моделі з тривалістю роботи від п'яти до десяти років.

Автоматичний наземний мініатюрний сенсор «Dragon Sense» від Frontline Defense Systems (США) складається з сейсмоприймача і мікрофона для визначення і класифікації людей, наземних транспортних засобів, літальних апаратів, що летять низько, а також земляних робіт, що ведуться [32]. Ці сенсори з'єднані в бездротову комірчасту мережу, що самовідновлюється. Кожен сенсор може визначати і класифікувати людей на дистанції 50 м, вантажівки – 200 м, а гусеничний транспорт – 500 м при температурі довкілля від -30 до +70 °С. Кожен сенсор, включаючи перетворювач, передавач, антену і батарею важить 0,8 кг при габаритних розмірах 62 x 68 x 132 мм і працює на різних радіочастотах. Батареї живлення вистачає на 1-2 місяці автономної роботи. Крім сейсмічних і акустичних можливостей система «Dragon Sense» також об'єднує пасивні інфрачервоні, магнітні сенсори і камери в свою комірчасту мережу. Вірогідність коректного виявлення об'єктів, що рухаються, становить 0,95.

Компанія Textron Defense Systems (США) [30, 33] виготовляє вироби, які можуть бути



Рис. 8. Модуль збору інформації, розвідки і спостереження від Textron Defense Systems [30]

використані як в польових, так і в міських умовах. Модуль збору інформації, спостереження і розвідки цієї компанії з використанням сейсмічного та інфрачервоного сенсорів, а також оптико-електронного пристрою може визначати людей, повітряні та транспортні засоби, класифікувати ці цілі і надавати інформацію про їх місцезнаходження як в денний, так і в нічний час (рис. 8). Зібрані ним відомості передаються на вузол мережевого інтерфейсу, який об'єднує дані від сенсорів і передає загальну інформацію по каналу далекого зв'язку іншим користувачам. Дані надходять в модуль мережевого інтерфейсу поряд з даними від радіологічного вузла, який визначає і повідомляє про гамма-променеви випромінювання і його потужність.

Вироби компанії Textron можуть застосовуватися для захисту чого завгодно, від колон вантажівок на марші і до стаціонарних оперативних баз. У конструкцію сенсорів цієї компанії закладена простота і зручність експлуатації, тому вони можуть швидко розгортатися піхотинцями для проведення відносно нетривалих операцій або встановлюватися на тривалий час для довготривалих завдань. Прикладом таких можливостей можуть служити вироби цієї компанії, що складаються з вузла Microobserver

МО-1045 і батарей, які дозволяють працювати до 24 днів, або вузла Microobserver МО-2730, який може залишатися на одному місці без обслуговування до двох років. Сейсмічні сенсори «MicroObservers» можуть інтегруватися з іншими системами, такими як радари або камери, для виявлення та відстеження. В такому комплекті людей та важку техніку ці сенсори виявляють на відстанях 100 і 250 м, відповідно. Сенсори MicroObservers застосовуються для розвідки і спостереження не тільки за наземними транспортними засобами, але також за пілотованими і безпілотними системами. Тестування сенсорів проводилося військовими підрозділами США в Афганістані.

3. ВИСНОВКИ

Огляд наявних переносних сейсмічних систем як для військових, так і для цивільних

цілей, які виробляються провідними зарубіжними фірмами, показує, що розглянуті системи характеризуються такими загальними особливостями як:

- застосуванням нових економічних електронних компонентів, що призводить до зниження енергоспоживання як окремих сенсорів, так і систем на їх основі. Це дозволяє створювати системи з автономним електроживленням, які не потребують застосування кабелів живлення;

- застосуванням нових на основі літію джерел живлення, що дозволяє збільшити термін безперервної роботи віддалених сенсорів і систем;

- використанням, крім сейсмічних, перетворювачів за інших фізичних принципів – акустичних, п'єзоелектричних, магнітного поля, теплового випромінювання тощо.);

- застосуванням UGS, що використовують мультисенсорне об'єднання;

- наявністю мініатюрних радіопередавачів, вбудованих в сенсори систем, що дозволяє створювати бездротові сенсорні мережі для контролю територій та охорони периметрів з високошвидкісною обробкою даних для поліпшення виявлення і класифікації цілей;

- передачею даних в центр контролю по бездротовим радіочастотним каналах або через супутник;

- використанням новітніх цифрових методів обробки сигналів, що призводить до появи «інтелектуальних» сенсорів і систем з такими функціями, як розпізнавання типових сигналів вторгнення і локалізації порушника в межах зони контролю, визначення напрямку його руху, дистанційна діагностика і налагодження систем тощо;

- застосуванням новітніх ефективних алгоритмів виявлення та високоточного розпізнавання об'єктів, що рухаються;

- малими габаритними розмірами і вагою, що сприяє прихованій установці елементів систем.

За останні роки значно зменшилися конструкційні розміри сенсорів систем, при цьому їх функціональність різко зросла. В значній мірі цьому сприяв процес мініатюризації, що

дозволив розмістити радіологічні, біологічні та хімічні сенсори в невеликі і малопомітні блоки. Таким же чином поступово збільшується термін роботи батарей, що дозволяє сенсорам працювати все більш тривалий час. В даний час, багато з ОРССС контролюються з використанням переносного або персонального комп'ютера. Однак, надалі управління сенсорами і зібраної ними інформацією все більшою мірою буде виконуватися за допомогою ручних пристроїв, наприклад персональних цифрових помічників (PDA) або смартфонів. Можливо, найближчим часом для контролю цих сенсорів стане доступним програмне забезпечення у вигляді завантажуваних додатків для смартфонів або PDA, які стають звичайними засобами оснащення бойових підрозділів [30].

Найбільш актуальними проблемами розвитку на сучасному етапі, які до теперішнього часу є не вирішеними, залишаються:

- забезпечення заданої завадостійкості функціонування ОРССС на тлі різних перешкод антропогенного та техногенного характеру;

- забезпечення автоматичної адаптації ОРССС в різних умовах застосування (в різних ґрунтах і в різних природнокліматичних умовах, при зміні погоди, намоканні або промерзанні ґрунту).

Список використаної літератури

- [1]. B. S. Vvedenskiy. Podzemnyye diskretnyye datchiki dlya okhrany perimetrov // *Algorytm bezopasnosti*, №5, (2012), <https://algorithm.org/arch/arch.php?id=60&a=1209>. (in Russian).
- [2]. Ya. I. Lepikh, A. A. Yevtukh, V. O. Romanov. Suchasni mikroelektronni datchyky dlia intelektualnykh system--// *Visn.NAN Ukrainy*, 2013, No. 4.- S.40-49. (in Ukrainian).
- [3]. P. Fastyskovsky, M. Glauberman, Ya. Lepikh. Point seismic system for detection and recognition of moving person and vehicles. The Fourth Internat.Conf. on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2019), 09-13 Sept. 2019, Odesa, Ukraine, PP. 1-4.
- [4]. S.S. Zvezhinskiy. Bystrorazvertyvayemye sredstva obnaruzheniya i sistemy okhrannoy signalizatsii // *Tekhika dlya spetssluzhb*, BNTI, www.bnti.ru 27.01.2006. (in Russian).
- [5]. Z. Haig. Networked unattended ground sensors for battlefield // *AARMS*, 3(3), P. 387-399 (2004).
- [6]. P.P.Fastykovsky, Ya.I.Lepikh. Remote Compact Seismic Sensor for the Moving Person Detection // *IEEE Sensors Letters*, 4(8), P. 1-3, (2020). ASN 2500903, doi: 10.1109/ LSENS. 2020.3007831 <<https://doi.org/10.1109/ LSENS.2020.3007831>>.
- [7]. H. Attia, S. Gaya, A. Alamoudi at al. Wireless Geophone Sensing System for Real-Time Seismic Data Acquisition // *IEEE Access*, 8, P. 81116-81128 (2020), doi: 10.1109/ ACCESS. 2020.2989280.
- [8]. Perimeter Security and Intrusion Classification system (Psicon) // *Geoquip booklet*, <http://www.geoquip.com>.
- [9]. B. S. Vvedenskiy. Sovremennyye sistemy okhrany perimetrov // www.GSM-guard.net. (in Russian).
- [10]. B. S. Vvedenskiy. Obzor zarubezhnykh bystrorazvorachivayemykh kompleksov dlya okhrany perimetrov // *Tekhika dla spetssluzhb*, BNTI, www.bnti.ru 12.04.2006. (in Russian).
- [11]. D. Khorosheyev. Razvedyvatel'nosignalizatsionnyye okhrannyye sistemy i sredstva obnaruzheniya Sukhoputnykh voysk SShA // *Zarubezhnoye voyennoye obozreniye*, №4, S. 45-53 (2011). (in Russian).
- [12]. A. Gostev. Systema obespecheniya bezopasnosti obyektov TASS Sukhoputnykh voysk SShA // *Zarubezhnoye voyennoye obozreniye*, № 7, S. 36-38 (2011). (in Russian).
- [13]. Unattended ground sensors system // *SensoGuard booklet*. <http://www.SensoGuard.com>.
- [14]. Razvedyvatel'no-signal'naya apparatura 1K18 «Realiya-U», 1K124 «Tabun», 1K119 «Realiya-1/10», 17.05.2009. <https://117orb.at.ua/publ/5-1-0-56>. (in Russian).
- [15]. Radiobaryer // *Polyus-ST*. <http://www.polus-st.ru/products/radiobarrier/>. (in Russian).
- [16]. REMBASS-II (Remotely Monitored Battlefield Sensor System). www.L-3Com.com/cs-east.
- [17]. V. Veremeyev. Primeneniye Razvedyvatel'no-signalizatsionnykh priborov VS SShA na

sovremennom etape // Zarubezhnoye voyennoye obozreniye, №3, S. 51-53 (2017). (in Russian).

[18]. Elektronnyye sredstva razvedki i signalizatsii, http://www.0ck.ru/voennoe_delo_i_grazhdanskaya_oborona/elektronnyye_sredstva_razvedki_i.html. (in Russian).

[19]. Ye. Maksimov. Amerikanskaya sistema razvedyvatelno-signalizatsionnykh priborov «Skorpion» // Zarubezhnoye voyennoye obozreniye, №5, S. 49-52 (2014). (in Russian).

[20]. M. Coster, J. Chambers. SCORPION II Persistent Surveillance System Update // Proc. SPIE 7693, Unattended Ground, Sea, and Air Sensor Technologies and Applications XII, (7 May 2010) PP. 76931Q-1 – 76931Q-11, doi:10.1117/12.850427.

[21]. A. Maksimenkov. Amerikanskaya sistema razvedyvatelno-signalizatsionnykh priborov «Falcon Watch» // Zarubezhnoye voyennoye obozreniye, №12, S.40-44 (2009). (in Russian).

[22]. A. Vick, R. M. Moore, B. R. Pirnie, J. Stillion. Aerospace Operations Against Elusive Ground Targets. Appendix A: Advanced Technologies and Systems, <http://www.rand.org/publications/R/MR1398/MR1398.appa.pdf>.

[23]. Common (ground) sense // The Free Library. Armada International, August 1 2011, [https://www.thefreelibrary.com/Common+\(ground\)+sense.-a0266643870](https://www.thefreelibrary.com/Common+(ground)+sense.-a0266643870).

[24]. Tactical Sensors – Unattended Ground Sensors, <http://dtsn.darpa.mil/ixo/programdetail.asp?progid=29>.

[25]. Unattended ground sensors RDC ultramash+, <http://www.digitalbarriers.com>.

[26]. Expendable Unattended Ground Sensors (E-UGS) // Pathfinder booklet, <https://bssholland.com/product-tag/pathfinder/>.

[27]. Seismic sensor, <http://high-tech-ims.com/portfolio/seismic-sensor/>.

[28]. Seismic systems-unattended ground sensors // EVPU Defence, www.evpudefence.com

[29]. Surveillance Sensor // McQ Ranger®, http://www.mcqinc.com/pdf/SURV_McQ_Ranger_Datasheet_20210127_mt.pdf.

[30]. Alex Alexeev. Automatic ground sensors // Military Review, November 11 2014, <https://en.topwar.ru/62088-avtomaticheskienazemnye-sensory.html>.

[31]. UGS // Elbitsystems, <https://elbitsystems.com/product/ugs/>.

[32]. Dragon Sense. Unattended Ground Sensor System (UGS) // Frontline Defense Systems, <http://www.frontlinedefensesystems.com/overview/dragonsense.html>

[33]. MicroObserver – Unattended Ground Sensor (UGS) system // Textrondefense, www.textrondefense.com/products/isr/ugs.php.

Стаття надійшла до редакції 11.11.2021 р.

PACS: 07.07.Df UDC 621.391
DOI: 10.18524/1815-7459.2021.4.248178

PORTABLE SEISMIC SYSTEMS (*OVERVIEW*)

P. P. Fastykovsky, Ya. I. Lepikh

Odesa I. I. Mechnikov National University, 2, Dvoryanskaya Str., Odesa, 65082, Ukraine,
e-mails: fpp@te.net.ua, ndl_lepikh@onu.edu.ua

Summary

The aim of the work is to determine the current state of development of portable guard and reconnaissance-signaling systems with seismic sensors. Such systems are widely used both for temporary protection of various objects and for reconnaissance-signaling purposes. They are installed in the area of roads or paths, and the installation time takes no more than a few minutes. The main advantages of the portable systems over stationary systems are the secrecy of portable systems in controlled areas and their high informativeness with a minimum of energy consumption. For modern developments of the portable guard and reconnaissance-signaling systems, some general trends in their design are characteristic. They are: an application of new economical electronic components and new lithium-based power supplies; the use, in addition to seismic, transducers of other physical quantities; use of multisensor integration; creation of wireless sensor networks; use of the latest digital signal processing methods; creation of effective algorithms for people and vehicle recognition. Such systems are serially produced by many, including leading, enterprises, firms, corporations in many developed countries of the world. Modern systems are mainly wireless networks of combined sensors, which in addition to seismic sensors also include other types of sensors to provide more comprehensive information on moving objects. Information on the detection of a moving object within the system's range is transmitted to the control and indication console, which can be located tens of kilometers away, by radio channel using repeaters or by satellite.

Keywords: seismic sensor, unattended ground sensor (UGS), portable guard and reconnaissance-signaling system

PACS 07.07.Df УДК 621.391
DOI: 10.18524/1815-7459.2021.4.248178

ПОРТАТИВНІ СЕЙСМІЧНІ СИСТЕМИ (*ОГЛЯД*)

П. П. Фастиковський, Я. І. Леніх

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, вул. Дворянська, 2,
м. Одеса, 65082, Україна, e-mails: fpp@te.net.ua, ndl_lepikh@onu.edu.ua

Реферат

Мета роботи полягає у визначенні сучасного стану розвитку портативних (переносних) охоронних і розвідувально-сигналізаційних сейсмічних систем. Такі системи знайшли широке застосування як для тимчасового захисту різних об'єктів, так і для розвідувально-сигналізаційних цілей. Вони встановлюються в районі доріг або стежок, причому час їх установки займає не більше кількох хвилин. Головними перевагами переносних систем над стаціонарними

системами є скритність переносних систем на контрольованих ділянках, а також їх висока інформативність при мінімумі енергоспоживання.

Для сучасних розробок провідних зарубіжних компаній характерні деякі загальні тенденції в конструюванні переносних систем: застосування нових економічних електронних компонентів і нових на основі літію джерел живлення; використання, крім сейсмічних, перетворювачів інших фізичних величин; використання мультисенсорного об'єднання, створення бездротових сенсорних мереж; використання новітніх цифрових методів обробки сигналів, створення ефективних алгоритмів розпізнавання людей та техніки. Такі системи серійно виготовляються багатьма, в тому числі провідними, підприємствами, фірмами, корпораціями в багатьох розвинених країнах світу. Сучасні системи, в основному, являють собою бездротову мережу комбінованих сенсорів, що включають для отримання більш повної інформації про об'єкти, що рухаються, крім сейсмічних також сенсори інших типів. Передача інформації про виявлення рухомого об'єкта в зоні дії системи на пульт управління і індикації, який може бути віддалений на десятки кілометрів, здійснюється за допомогою радіоканалу з використанням ретрансляторів або через супутник.

Ключові слова: сейсмічний сенсор; наземний сенсор, що не обслуговується (UGS); переносна охоронна та розвідувально-сигналізаційна система

УДК 528.021.7:681.78

DOI: 10.18524/1815-7459.2021.4.248179

ФОРМУВАННЯ ЗОНИ ВИЯВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ ЛАЗЕРНИМИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИМИ СИСТЕМАМИ НА МАЛИХ ВІДСТАННЯХ

В. І. Сантоній, Я. І. Лепіх, Л. М. Будіянська, В. І. Янко

Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр МОН і НАН України
при Одеському Національному університеті імені І.І.Мечникова
e-mail: ndl_lepikh@onu.edu.ua

ФОРМУВАННЯ ЗОНИ ВИЯВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ ЛАЗЕРНИМИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИМИ СИСТЕМАМИ НА МАЛИХ ВІДСТАННЯХ

В. І. Сантоній, Я. І. Лепіх, Л. М. Будіянська, В. І. Янко

Анотація. Проведено оптимізацію методів формування просторово-енергетичного розподілу потужності зондуючого випромінювання і обробки приймального сигналу локаційної лазерної інформаційно-вимірювальної системою (ЛІВС) з урахуванням просторово-часової структури, а також здійснено аналіз існуючих методів їх обробки. Проведена оцінка інтегральних критеріїв функціонування ЛІВС при роботі в умовах дії завад. Проведено розрахунок параметрів основних ланок ЛІВС з урахуванням співвідношення між роздільною здатністю оптичної системи і можливостями виявлення, розпізнавання та класифікації об'єктів. Розроблено метод формування розподілу щільності зондуючого випромінювання та обробки приймального сигналу, з урахуванням його просторово-часової структури, що дозволило визначити оптимальну тривалість лазерного зондуючого імпульсу. Визначена тривалість дозволяє виключити похибки виміру параметрів руху об'єкта в умовах впливу сукупності дестабілізуючих факторів та дефіциту часу обробки сигналу, що забезпечить точність виявлення та розпізнавання цілі.

Ключові слова: лазерні інформаційно-вимірювальні системи, зона виявлення, розпізнавання, фотоприймач, параметри руху, просторово-часова структура

FORMATION OF THE OBJECT IDENTIFICATION ZONE WITH LASER INFORMATION-MEASURING SYSTEMS AT SHORT DISTANCES

V. I. Santoniy, Ya. I. Lepikh, L. M. Budianskaya, V. I. Yanko

Abstract. The optimization of the methods for the formation of the spatial-energy distribution of the probing radiation power and the processing the receiving signal by the locating laser information-measuring systems (LIMS), taking into account the spatial-temporal structure, is carried out, and the analysis of the existing methods of their processing is carried out too. An assessment of the integral criteria for the LIMS functioning when operating in conditions of interference has been made. The calculation of the parameters of the LIMS main links was carried out, taking into account the correla-

tion between the resolution of the optical system and the capabilities of object detection, recognition and classification. A method was developed for the formation of the probing radiation density distribution and the receiving signal processing, taking into account its space-time structure, which made it possible to determine the optimal duration of the laser probe pulse. The determined duration makes it possible to eliminate errors in measuring the parameters of an object's movement under the influence of a combination of destabilizing factors and a lack of signal processing time, which will ensure the accuracy of the target detection and recognition.

Keywords: laser information-measuring systems, detection zone, recognition, photodetector, motion parameters, space-time structure

ФОРМИРОВАНИЕ ЗОНЫ ВЫЯВЛЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ЛАЗЕРНЫМИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ НА МАЛЫХ РАССТОЯНИЯХ

В. И. Сантоний, Я. И. Лепих, Л. М. Будианская, В. И. Янко

Аннотация. Проведена оптимизация методов формирования пространственно-энергетического распределения мощности зондирующего излучения и обработки приемного сигнала локационной лазерной информационно-измерительной системой (ЛИСС) с учетом пространственно-временной структуры, а также проведен анализ существующих методов их обработки. Проведена оценка интегральных критериев функционирования ЛИСС при работе в условиях действия помех. Произведен расчет параметров основных звеньев ЛИСС с учетом соотношения между разрешением оптической системы и возможностями обнаружения, распознавания и классификации объектов. Разработан метод формирования распределения плотности зондирующего излучения и обработки приемного сигнала с учетом его пространственно-временной структуры, что позволило определить оптимальную продолжительность лазерного зондирующего импульса. Определенная длительность позволяет исключить погрешности измерения параметров движения объекта в условиях воздействия совокупности дестабилизирующих факторов и дефицита времени обработки сигнала, что обеспечит точность обнаружения и распознавания цели.

Ключевые слова: лазерные информационно-измерительные системы, зона обнаружения, распознавания, фотоприемник, параметры движения, пространственно-временная структура

Постановка задачі

Актуальність створення дистанційної лазерної інформаційно-вимірювальної системи ЛІВС раннього виявлення та розпізнавання наземних та малорозмірних аеродинамічних об'єктів, тобто викривача, обумовлено тим, що вузько направлене монохроматичне лазерне випромінювання, яке прямолінійно поширюється з потенційно великою потужністю і високою спектральною яскравістю, дає електронно-оптичним системам низку незаперечних переваг у порівнянні з традиційними радіолокаційними системами.

Можливість формування надкоротких лазерних імпульсів дозволяє оптико-електронній

системі проводити дистанційне виявлення, розпізнавання та вимірювання координат і параметрів руху швидкісних об'єктів з високою роздільною здатністю. Сучасні комп'ютерні технології дозволяють реалізовувати складні алгоритми обробки в реальному часі, що збільшує точність пристроїв, які проводять оптичні вимірювання.

Для розробки такої оптико-електронної ЛІВС необхідна просторово-часова обробка сигналів за заданим алгоритмам, що видає керуючу команду на виконавчий пристрій, з урахуванням специфіки ІВС оптичної локації. Для цього необхідно провести аналіз методів вимірювання розподілу щільності потужнос-

ті або енергії лазерного випромінювання, які використовують для формування зондуєчих імпульсів у напрямку досліджуваного швидкісного об'єкта, обробки відбитого сигналу і одержання координат і параметрів руху об'єкту виявлення в ЛІВС та оптико-електронних перетворювачах інфрачервоного діапазону. Ці задачі і вирішуються в даній роботі.

Методи вимірювання енергетичних параметрів джерел випромінювання

В даний час широко використовуються напівпровідникові лазерні джерела випромінювання. Постійне їх вдосконалення призвело до створення великого числа різновидів цих джерел, що розрізняються конкретною структурою і використовуваними матеріалами. Застосування їх обумовлюється надійністю, технологічною інтеграцією з іншими компонентами, мікромініатюризацією, а також високою швидкодією.

Проведено аналіз методів вимірювання енергетичних параметрів джерел випромінювання, що визначають доцільність і ефективність їх використання в системах передачі різного призначення. Діаграма спрямованості (ДС) лазерного випромінювання, тобто кутовий розподіл енергії або потужності лазерного випромінювання в просторі є найбільш повною просторово-енергетичною характеристикою лазерів. Цією характеристикою користуються для опису лазерного пучка в далекій зоні лазерного випромінювання через мінливість кутового розподілу поблизу апертури, що випромінює. За одну з меж далекої зони приймають значення, що перевищують d^2/λ , де d – діаметр випромінюючої апертури, λ – довжина хвилі лазерного випромінювання. У лазерів зазвичай розбіжність пучка нормується.

Завжди можливо виміряти просторовий розподіл інтенсивності випромінювання в потрібних поперечних перетинах пучка лазерного випромінювання, з якого можуть бути отримані такі кількісні характеристики, як розбіжність пучків або діаметр пучка в даному перетині. У деяких випадках найбільш зручною характеристикою є енергетична розбіжність

лазерного випромінювання, тобто плоский або тілесний кут, усередині якого поширюється задана частка енергії або потужності лазерного випромінювання.

Відомо кілька методів візуалізації зображення розподілу інтенсивності випромінювання [1,2] :

- методи фотографування;
- методи оптоелектронного перетворення;
- дифракційні методи.

Перераховані методи візуалізації зображення володіють загальним недоліком – малим просторовим розширенням за інтенсивністю і неможливістю отримання інформації про абсолютні значення розподілу інтенсивності.

Для вимірювання щільності потужності випромінювання використовують високочутливі перетворювачі в комплекті з каліброваною вхідною діафрагмою малого діаметра. Розподіл інтенсивності випромінювання вимірюють способом послідовного вимірювання щільності в різних фіксованих точках перетину пучка. Для підвищення оперативності таких вимірів використовують скануючі електромеханічні системи, або матриці необхідних розмірів, набрані з вимірювальних перетворювачів, які забезпечують необхідну дозволу здатність перетину пучка.

Для вимірювання розходження випромінювання застосовують метод двох перетинів зони випромінювання у вертикальній та горизонтальній площинах (рис. 1).

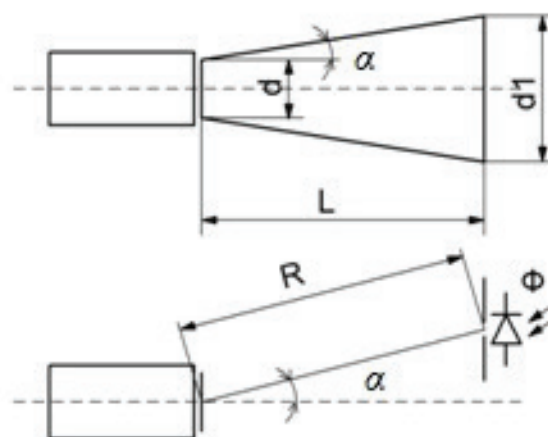


Рис. 1. Метод двох перетинів зони випромінювання

Якщо в далекій зоні виміряти діаметри пучків d_p , d у двох поперечних перетинах, віддалених один від одного на відстані L , то розбіжність пучка можна визначити з співвідношення $tga = (d_p - d) / 2L$. При малій розбіжності та великій відстані L ця формула спрощується до виду $\alpha = d / 2L$.

Реєстрація діаграми спрямованості дозволяє отримати найбільш повну інформацію про просторовий розподіл лазерного випромінювання. Для вимірювання діаграми спрямованості можна використовувати фотодіод (Ф), розташований в далекій зоні, який закритий діафрагмою з отвором малого діаметра. Переміщаючи фотодіод по дузі кола радіусом R , реєструють кутовий розподіл інтенсивності випромінювання. Знаючи діаграму спрямованості, можна розрахувати енергетичну і кутову розбіжність випромінювання.

Формування зони виявлення ЛІВС

Зона виявлення (ЗВ) ЛІВС в залежності від застосування може мати різну форму: точка, конус, протяжна лінія, дуга кола, а так само вузьке кругове «поле зору» навколо корпусу ЛІВС, розташоване під кутом 90° або іншим до його осі. Приймально-передавальні об'єктиви можуть розташовуватися як в носовій частині, так і по колу на бічній поверхні корпусу ЛІВС (рис. 2). Площа поверхні корпусу, на якій необхідно встановити оптичні елементи приймально-передавальної системи ЛІВС практично завжди обмежена. У передавальному об'єктиві оптимальним є використання плоско-опуклої або двоопуклої лінзи з мінімальним діаметром і фокусною відстанню, яка дозволяє повністю перехопити потік випромінювання в робочому

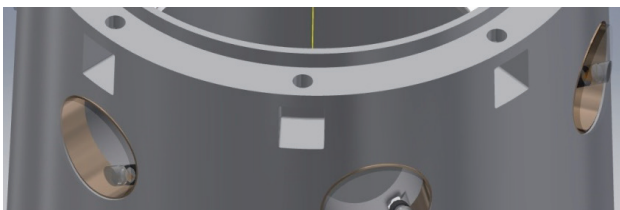


Рис. 2. Розташування приймально-передавальних об'єктівів ЛІВС на бічній поверхні корпусу

тілесному куті використовуваного лазерного діода. У приймальному об'єктиві треба використати збиральний оптичний елемент з максимально можливою площею поверхні.

З вищенаведеного випливає, що з можливого конструктивного виконання і енергетичних співвідношень оптимальною для побудови конструкції приймально-передавальних об'єктівів є дзеркальна оптична схема, що реалізована по схемі Коссегрена, яка наведена на рис. 3.

Оптичні вісі об'єктівів нахилені по відношенню до осі ЛІВС під кутом 47° . Проекція кола приймального сферичного дзеркала на циліндричну поверхню корпусу ЛІВС являє собою еліпс. Прозорі вікна в зовнішній стінці корпусу нахилені під кутом 47° для мінімального затінення потоку випромінювання, відбитого від поверхні об'єкта. Форма зовнішньої поверхні вікон повторює форму зовнішньої бокової поверхні ЛІВС. Випромінювання від сформованого тіла світіння у вигляді смуги за допомогою двоопуклої лінзи 5 направляється

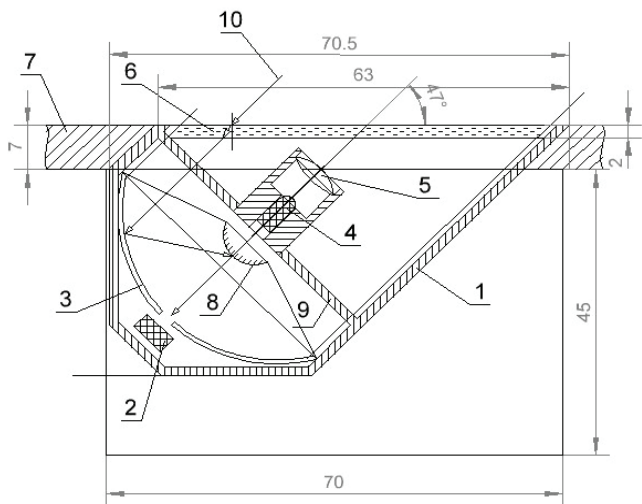


Рис. 3. Конструкція приймально-передавальних об'єктівів ЛІВС

- 1 – корпус приймально-передавального об'єктива,
- 2 – фотоприймач (ФП),
- 3 – сферичне увігнуте дзеркало, 4 – випромінювач, 5 – об'єктив випромінювача,
- 6 – прозоре скляне вікно в корпусі ЛІВС, 7 – корпус ЛІВС, 8 – сферичне опукле дзеркало, 9 – перемички, які утримують передавальний об'єктив, 10 – хід променя, відбитого від поверхні об'єкта зондування

ся до поверхні об'єкта, де утворює смугу, що світиться.

Відбитий від поверхні об'єкта промінь 10 проходить через прозоре скляне вікно 6 в корпусі відсіку управління ЛІВС і надходить на сферичне увігнуте дзеркало 3. Відбившись від поверхні увігнутого дзеркала 3, промінь надходить на опукле дзеркало 8, повторно відбивається і через поздовжній отвір в увігнутому дзеркалі потрапляє на ФП.

Скляне вікно виконано у вигляді фрагмента циліндричної поверхні, що повторює форму зовнішньої поверхні корпусу ЛІВС. Відбите випромінювання, що падає на поверхню скляного вікна, відповідно до закону заломлення світла, проходить через прозору межу двох середовищ з різними показниками заломлення, двічі заломлюється на поверхнях скла і надходить на поверхню увігнутого дзеркала під тим же кутом. Однак, ця обставина не порушить взаємне фокусування передавального і приймального об'єктивів через те, що випромінювання передавального об'єктива так само проходить дві поверхні захисного скляного вікна тієї ж товщини.

В оптичних локаційних системах використовують фазові та часові методи вимірювання поточного значення дистанції до поверхні об'єкта. Прийомні і передавальні оптико-електронні елементи (випромінюючі лазерні діоди, лавинні ФП) працюють з сигналами НВЧ діапазону з частотами до 1,0 ГГц. Особливістю цих елементів є мінімальна площа тіла світіння лазерів і мінімальна площа чутливого майданчика фотоприймача з розмірами менш 1,0 мм².

Для формування діаграми спрямованості заданої форми в фокальній площині оптичних елементів приймального і передавального об'єктивів необхідно розташувати тіло світіння лазерного діода або чутливий майданчик ФП з відповідними розмірами.

Для прикладу розглянемо зону виявлення у вигляді смуги з поперечними розмірами довжиною 2,0 м та мінімальною шириною,

сформованими на відстані 10 м від ЛІВС. Поздовжні розміри полів зору передавального і приймального об'єктивів мають бути рівними, а ширина поля зору приймального об'єктива повинна бути вдвічі більше ширини зони опромінення поверхні об'єкта, що компенсує неточності юстирування оптичних систем.

Сформувати вузьку протяжну зону опромінення на поверхні об'єкта опромінення можливо використанням в об'єктиві циліндричної лінзи, що перетворює сфокусований потік від точкового випромінювача в смугу. Однак розподіл випромінюваної потужності уздовж отриманої смуги не є рівномірним. На краях рівень випромінюваної потужності у багато разів менший, ніж в середині, що може привести до непевного прийому і пропуску малорозмірних об'єктів в цих зонах. Можливо об'єднати декілька об'єктивів з точковими джерелами випромінювання, згрупувавши їх зони опромінення у вигляді смуги, при цьому потужність уздовж смуги буде рівномірною.

Для розглядуваної зони виявлення об'єднання декількох об'єктивів з точковими джерелами випромінювання та використанні у якості випромінювача поширених в застосуванні імпульсних лазерних діодів SPLPL90-3 є можливість отримання зони опромінення довжиною 2,0 м. Тіло світіння вище наведених лазерних діодів має розміри 200 x 10 мкм. При використанні у окремому передавальному об'єктиві плоско-опуклої лінзи діаметром 3,5 мм з фокусною відстанню 3,0 мм на відстані 10 м на поверхні об'єкта формується смуга з розмірами 66,7 x 3,3 см. При використанні у передавальній системі трьох наведених об'єктивів згрупованих у вигляді віяла з зонами опромінення розташованими у лінію виникає можливість отримати зону опромінення на поверхні об'єкта з розмірами 200,1 x 3,3 см.

У приймальному об'єктиві можливо використання оптичного елемента, який збирає, з кутом поля зору 11,5°, що дозволить перехопити віддзеркалене від поверхні об'єкта зондуюче випромінювання у повному обсязі.

Енергетичні розрахунки і модель поширення випромінювання до поверхні об'єкта і назад

Конструкція приймального і передавального об'єктів ЛІВС розроблені з метою отримання максимально можливого значення відношення прийнятої потужності до випромінюваної. Для оцінки цього відношення в програмному середовищі Trace Pro Expert розроблена модель поширення випромінювання до поверхні об'єкта та назад в діапазоні дистанцій від 1 до 10 м [3]. До складу моделі вимірювального каналу ЛІВС входить 3D-модель приймального і передавального об'єктів, перенесена з конструкторської програми Autodesk Inventor, та ряд відбиваючих поверхонь, що знаходяться в його полі зору. Матеріал елементів приймального і передавального об'єктів задається з внутрішнього переліку матеріалів моделюючої програми. Всі обчислення проводяться відповідно до характеристик обраних матеріалів. Відбиваючі поверхні розташовані на п'яти фіксованих відстанях – 1, 2, 3, 5, 10 м. Моделювання на кожній фіксованій відстані

проводиться шляхом встановлення відбивних властивостей необхідної поверхні і відключення всіх інших. Поверхні сферичної форми, всі точки яких в межах поля зору об'єктів віддалені на однакову відстань, відбивають випромінювання, що зондує, під одним і тим же кутом. Коефіцієнт відбиття всіх поверхонь об'єкта для даного моделювання обраний рівним 0,8, що відповідає білій матовій поверхні.

Трасування променів з поверхні тіла світіння, що проходять через передавальний об'єкт до відбивної поверхні, проводиться таким чином. Поверхня тіла світіння випромінювача розбивається на певну задану кількість світних точок. Використовуючи заломлючі властивості поверхонь елементів передавального об'єкта, розраховується положення зображення кожної з точок тіла світіння випромінювача на заданій відбивальній поверхні. Для точного розрахунку відношення прийнятої потужності до випромінюваної форма тіла світіння випромінювача у моделі задається рівною 4,5 x 0,075 мм, на якій сформована матриця світних точок, тобто 8000 x 300 шт. Сумарна потуж-

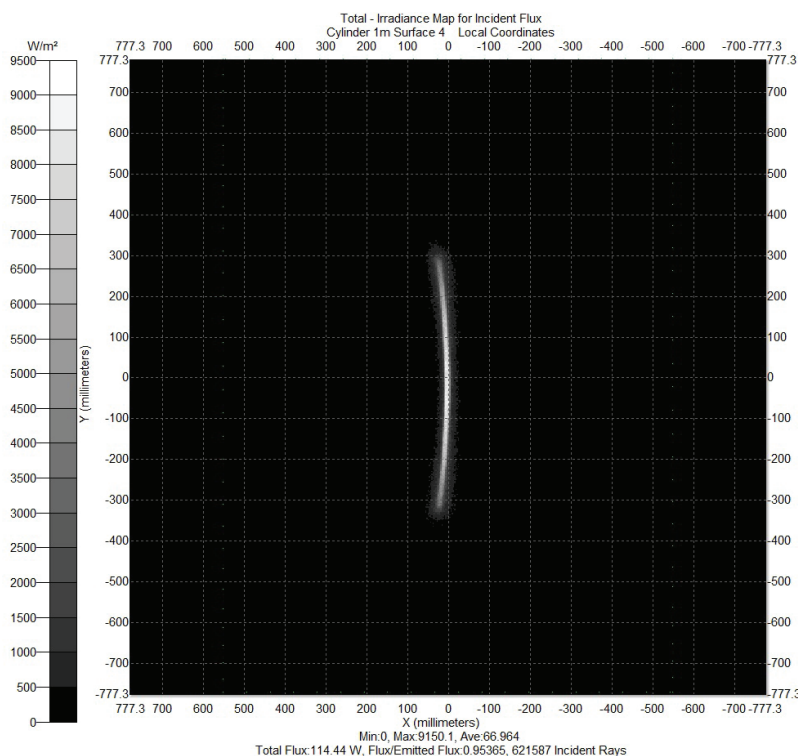


Рис. 4. Форма зображення тіла світіння випромінювача на поверхні об'єкта

Мінімальне значення P_{ϕ} на дистанції 10 м при використанні лавинного фотодіода МТАРD-07-007 з чутливістю 50 А/Вт призведе до появи в структурі діода фотоструму величиною 6,25 мА. Струм такої величини на диференціальному опорі фотодіода 10 Ом викличе падіння напруги в 60 мВ, що на три порядки більше чутливості використовуваного в схемі вхідного інтегрального імпульсного підсилювача. Для візуальної оцінки перетину діаграм спрямованості передавального і приймального об'єктів майданчик ФП замінюється випромінювальним майданчиком того ж розміру. Потужність випромінювання заміненого майданчика ФП дорівнює потужності випромінювача. Зображення обох майданчиків проектуються одночасно на поверхню об'єкта, що знаходиться на відстані 10 м від об'єктива.

На рис. 6 приведено перетин діаграм спрямованості об'єктива випромінювача і об'єктива ФП зі зміненими властивостями фотоприймального майданчика. На рис. 6 більш яскравим білим кольором показано зображення майданчика випромінювача. Зображення майданчика ФП зі зміненими властивостями показано у вигляді поля точок з меншою яскравістю.

Висновки

Оптична схема і конструкція приймально-передавальної системи, що наведена, дозволяє швидко створювати математичні моделі оптико-електронних технічних систем, використовуючи існуючі та додатково створені програмні модулі. Аналіз співвідношень розрахованих і отриманих вихідних сигналів наочно демонструє точність використаних методів.

Список використаної літератури

- [1]. http://aco.ifmo.ru/el_books/introduction_into_specialization/glava-5/glava-5-3.html.
- [2]. Ya. I. Lepikh, V. I. Santoniy, L. M. Budianskaya, I. O. Ivanchenko, V. V. Yanko. Optyko-elektronni systemy blyzhnoi lokatsii: monohrafiya.– Odesa: Odes. nats. un-t im. I. I. Mechnykova, 2019. – 294 s. ISBN 978-617-689 (in Ukrainian).
- [3]. Yanko V. V. PSpice-modelirovanie optiko-elektronnyh lokatorov // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature.–2006.– No. 4. S. 14-17 (in Russian).

Стаття надійшла до редакції 17.11.2021 р.

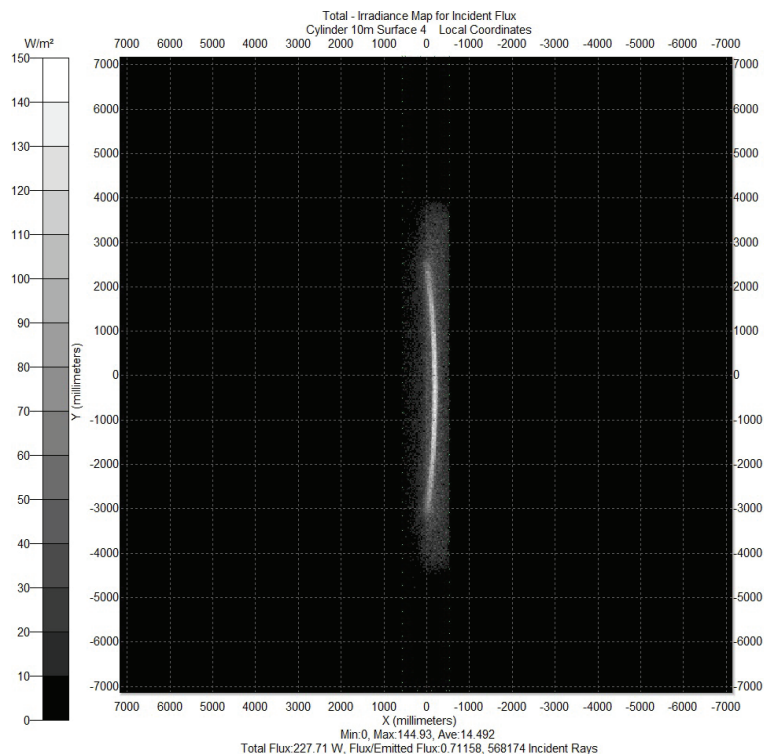


Рис. 6. Перетин діаграм спрямованості об'єктів випромінювача і ФП

UDC 528.021.7:681.78

DOI: 10.18524/1815-7459.2021.4.248179

FORMATION OF OBJECT IDENTIFICATION ZONE WITH LASER INFORMATION-MEASURING SYSTEMS AT SHORT DISTANCES

V. I. Santoniy, Ya. I. Lepikh, L. M. Budianskaya, V. I. Yanko

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

Summary

Locating laser information-measuring systems (LIMS) are intended to detect, recognize and calculate the parameters of the high-speed object movement, mainly in special equipment. Depending on the application, the LIMS detection area can have a different shape: a point, a cone, an extended line, an arc of a circle or a narrow circular field of view. To improve the accuracy of object classification, it is necessary to obtain the maximum possible value of the ratio of the received power to the radiated power. To assess it, a computer model of radiation propagation to the object and back in the range of small distances up to 10 m has been developed

The rays reflected from the target surface tracing towards the receiving lens surface and calculation of signal power which reached the photodetector (PhD) sensitive platform, is carried out in the Trace Pro Expert simulation software environment.

The optimization of the methods for the formation of the spatial-energy distribution of the probing radiation power and the processing the receiving signal by the LIMS, taking into account the spatial-temporal structure, is carried out, and the analysis of the existing methods of their processing is carried out too. An assessment of the integral criteria for the LIMS functioning when operating in conditions of interference has been made. The calculation of the parameters of the LIMS main links was carried out, taking into account the correlation between the resolution of the optical system and the capabilities of object detection, recognition and classification. A method was developed for the formation of the probing radiation density distribution and the receiving signal processing, taking into account its space-time structure, which made it possible to determine the optimal duration of the laser probe pulse. The determined duration makes it possible to eliminate errors in measuring the parameters of an object's movement under the influence of a combination of destabilizing factors and a lack of signal processing time, which will ensure the accuracy of the target detection and recognition.

Keywords: laser information-measuring systems, detection zone, recognition, photodetector, motion parameters, space-time structure

ФОРМУВАННЯ ЗОНИ ВИЯВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ ЛАЗЕРНИМИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИМИ СИСТЕМАМИ НА МАЛИХ ВІДСТАННЯХ

В. І. Сантоній, Я. І. Лепіх, Л. М. Будіянська, В. І. Янко

Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр МОН і НАН України при Одеському Національному університеті імені І. І. Мечникова
e-mail: ndl_lepikh@onu.edu.ua

Реферат

Локаційні лазерні інформаційно-вимірювальні системи (ЛІВС) призначені для виявлення, розпізнавання і обчислення параметрів руху швидкісних об'єктів в основному у виробках спецтехніки. Зона виявлення ЛІВС в залежності від застосування може мати різну форму: точка, конус, протяжна лінія, дуга кола чи вузьке кругове «поле зору». Для підвищення точності класифікації об'єкта необхідно отримання максимально можливого значення відношення прийнятої потужності до випроміненої. Для її оцінки розроблена комп'ютерна модель поширення випромінювання до об'єкта та назад в діапазоні малих дистанцій до 10 м. Трасування променів відбитих від поверхні цілі в сторону поверхні приймального об'єктива і розрахунок потужності сигналу, що досягла чутливого майданчика фотоприймача (ФП), проводиться в моделюючому програмному середовищі Trace Pro Expert.

Проведено оптимізацію методів формування просторово-енергетичного розподілу потужності зондуючого випромінювання і обробки приймального сигналу локаційної лазерної інформаційно-вимірювальної системою (ЛІВС) з урахуванням просторово-часової структури, а також здійснено аналіз існуючих методів їх обробки. Проведена оцінка інтегральних критеріїв функціонування ЛІВС при роботі в умовах дії завад. Проведено розрахунок параметрів основних ланок ЛІВС з урахуванням співвідношення між роздільною здатністю оптичної системи і можливостями виявлення, розпізнавання та класифікації об'єктів. Розроблено метод формування розподілу щільності зондуючого випромінювання та обробки приймального сигналу, з урахуванням його просторово-часової структури, що дозволило визначити оптимальну тривалість лазерного зондуючого імпульсу. Визначена тривалість дозволяє виключити похибки виміру параметрів руху об'єкта в умовах впливу сукупності дестабілізуючих факторів та дефіциту часу обробки сигналу, що забезпечить точність виявлення та розпізнавання цілі.

Ключові слова: лазерні інформаційно-вимірювальні системи, зона виявлення, розпізнавання, фотоприймач, параметри руху, просторово-часова структура

IMBG NASU announces the “**Call for start-ups on biomolecular electronics**”. The event organized by the [Institute of Molecular Biology and Genetics NAS of Ukraine](#) (IMBG) in frame of EU-funded [BIONANOSENS project](#), a twinning project of the IMBG with EU partners, aimed at the development of novel smart biosensors for analytical bionanotechnology.

The Call is focused at searching for and supporting all those, who have an idea, innovation or know-how in the field of biomolecular electronics in Ukraine, especially early-stage researchers. It is planned as a competition of start-ups and innovations, which includes 2 rounds with a final pitch contest at the end of February 2022 (Kyiv, Ukraine).

The IMBG NASU “Call for start-ups on biomolecular electronics” starts on November 15, and the deadline for applications is December 20, 2021. The finalists will be selected by the Experts from Ukraine and EU countries – partners of IMBG NASU in the BIONANOSENS project (Austria, Germany, France). Hi-scored applicators will be invited to the final, for pitch session contest. The winners of the contest will have an opportunity to participate in the Summer school on smart devices and their applications, which is planned to be held in Germany in 2022.

The Institute of Molecular Biology and Genetics of the National Academy of Sciences of Ukraine (IMBG NASU) <http://imbg.org.ua/en/> was founded in 1973 by prominent Ukrainian scientists – Academicians of NASU B.E.Paton, S.M.Gershenson, V.P.Zosymovych, P.K.Shkvarnikov and G.Kh.Matsuka (who was the first IMBG NASU Director, 1973-2003). Ganna Elskaya, Professor, Academician of NASU, Honoured Worker of Science and Technology of Ukraine was the second Director (2003-2019). Since 2019, the Institute is headed by Honoured Worker of Science and Technology of Ukraine, Academician of NASU, Professor Mykhailo Tukalo.

Currently, IMBG NASU is represented by 14 Scientific Departments and 6 Scientific Laboratories. The Institute has one of the highest-level research potentials in Ukraine, including many prominent scientists working here. Presently its staff is comprised of 300 employees (including 217 researchers), 23 Doctors of Sciences (Dr.Sc) and 100 Doctors of Philosophy (PhD), 3 Full Members of NASU and 5 Corresponding Members of NASU. About 25 PhD students work at the Institute each year

IMBG NASU funding consists of the state Ukrainian funding of the National Academy of Sciences of Ukraine, as well as its own costs: about 50% IMBG earns due to winning projects in the different national and international competitions.

The key research areas of IMBG NASU are following the main trends in molecular biology, genetical and molecular biotechnology sciences. Nowadays the Institute`s core competencies are:

- Development of new molecular and cell biotechnologies;
- Elucidation of fundamental and practical aspects of structural and functional genomics;
- Research on proteomics and protein engineering;
- Application of bioinformatics, computational modelling and new drugs design.

IMBG NASU is one of the leading research centres in Ukraine in the field of analytical biotechnology, and our contemporary goal is development of market-driven innovations.

IMBG has a long-term history (about 40 years) of cooperation with European colleagues being very active in international collaboration now days. It has joint research projects with colleagues from Germany, France, Great Britain, Poland, Italy, Greece and others. In total, IMBG has had permanent cooperation with universities, research and medical institutions in 34 different countries until now. Among IMBG international donors there are currently CNRS (Centre national de la recherche scientifique, France), NATO (North Atlantic Treaty Organisation), STCU (Science and

Technology Centre in Ukraine), earlier – NIH (National Institute of Health, USA), Welcome Trust Fund (United Kingdom), etc.

Regarding the European Framework Programmes for Research and Innovation, the Institute started its first project under FP5 and continues to collaborate in projects until the most recent Horizon 2020:

5th Framework Program project: ECS “European collaborative study on pregnant HIV-infected women and their children” (2000-2004), coordinated by the University College of London (United Kingdom), where IMBG was subcontractor of the Odessa Regional Hospital, Department of Obstetrics Gynecology <https://cordis.europa.eu/project/id/QLK2-CT-2000-00002>

6th Framework Program project: IMPRESMAN-COEUR4LIFE project, “Improving project & research management skills in third countries to stimulate their cooperation with Europe for life sciences” (2004-2006), coordinated by European Research and Project Office (Germany), where IMBG was subcontractor of the Ukrainian Association of Internal Medicine <https://cordis.europa.eu/project/id/512108/reporting/es>

7th Framework Program projects:

- COMBIOM ERA-WIDE project “Strengthening cooperation in Molecular Biomedicine between EU and Ukraine” (2011-2015), where IMBG was the Coordinator and the Leader of several work packages.
- CHERISH project, “Improving diagnoses of mental retardation in children in Central Eastern Europe and Central Asia through genetic characterisation and bioinformatics/statistics” (2009-2012), coordinated by University of Bologna (Italy) – IMBG was one of the project participants <https://cordis.europa.eu/project/id/223692>
- IMBG FP7 International Research Staff Exchange Scheme (IRSES) projects:
- NANOBIOSENS IRSES project, “Nanosensors based on nanomaterials” (2009 – 2011), coordinated by the Middle East Technical University (Turkey), where IMBG was the WP Leader <https://cordis.europa.eu/project/id/318524>
- NANODEV IRSES project, “Integrated nanomaterials and nanodevices” (2013 – 2015), coordinated by the PHILIPS Electronic Nederland B.V. (Netherlands) <https://cordis.europa.eu/project/id/510103>
- SMARTCANCERSENS IRSES project, “Micro/nanosensors for early cancer warning system - diagnostic and prognostic information” (2013 – 2016), coordinated by the Institute of Technology Tallaght (Ireland) <https://cordis.europa.eu/article/id/170406-biosensors-for-cancer-diagnosis>

Horizon 2020 projects:

- Waste2Fresh Innovation Action project, “Smart innovative system for recycling wastewater and creating closed loops in textile manufacturing industrial processes” (2020-2023), coordinated by Konya Teknik University (Turkey), where IMBG was one of the project participants and the WP Leader <https://cordis.europa.eu/project/id/958491>
- ERASMUS+ project "Elemental metabolomics as a new tool for food safety and health care"

The most recent EU funded Horizon 2020 project coordinated by IMBG is **BIONANOSENS** “Deeping collaboration on novel biomolecular electronics based on “smart” nanomaterials”. It is funded under the call H2020-WIDESPREAD-2020-5 (for which the overall success rate was only 13%). BIONANOSENS, which is coordinated by IMBG, is the only project, coordinated by the Ukrainian participant, funded under the Horizon 2020 Twinning scheme in 2020. The BIONANOSENS project www.bionanosens.eu (2020-2023) aims to position IMBG as an international Centre for Excellence in analytical biotechnology inside the country and beyond Ukrainian borders.

IMBG NASU as the initiator, the main beneficiary and the Coordinator of BIONANOSENS is supported by four high-profile research and innovation institutes from Europe - together they form the **BIONANOSENS consortium**:

IMBG NASU – Sergey Dzyadevych, Yanina Mishchuk,
Oleksandr Skorohod



UCBL – Université Claude Bernard Lyon 1,
France (Prof. Abdelhamid Errachid-el-Salhi,
Prof. Nicole Jaffrezic-Reno, Prof. Jean-Marc Chovelon)



HZDR - Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf,
Germany (Dr. Denys Makarov -)



ZSI - Zentrum für Soziale Innovation,
Austria (Gorazd Weiss, Philipp Brugner,
Andrea C. Mayr)



LIP – Lyon Ingénierie Projets, France
(Javier Olaiz, Patricia Odet)



What are the activities of BIONANOSENS?

BIONANOSENS implements tailor-made twinning actions helping to build and strengthen capacities for IMBG. Both the overall goal of the project and the single objectives related to it are taking into account IMBG's current operational situation.

BIONANOSENS possesses very ambition goals concerning creation of the international Centre for Excellence in analytical biotechnology on the base of IMBG NASU:

- Establishment of institutional grant management procedures in accordance with EU standards
- Establishment of an innovation unit at IMBG to support the institute's staff in project management tasks
- Providing better access to international networks for the institute in view of future proposal building
- Trainings on project proposal writing and project management

- Promotion and training of young researchers,
- Facilitating the dissemination and exploitation of research results produced by IMBG

Accordingly to these goals, the following key activities are planned to be implemented during the BIONANOSDENS lifetime:

- Strengthening collaboration in research and innovations with the European partners through numerous mutual visits, workshops and scientific trainings.
- Building IMBG NASU capacities for successful participation in the innovative European collaborative research.
- Promoting young scientists and early stage researchers, meaning special trainings, start-up call and a Summer school on biomolecular electronics.
- Joint development of the IMBG NASU Research and Innovation Strategy in biomolecular electronics for the nearest future after the project completion to ensure sustainability of the results obtained.
- Public outreach: communication, dissemination and exploitation of knowledge and the project results inside the country and beyond. For Ukrainian stakeholders, strengthening IMBG NASU competitiveness in corresponding research area will be a case of successful story of effective involvement in ERA, improving IMBG responses to the socio-economic needs of Ukraine. Several actions aimed at increasing of IMBG visibility in Ukraine and in ERA also are planned.
- Everyday management of the rather large international project consortium, created for IMBG NASU benefit in boosting its innovations.

BIONANOSSENS further exploits the findings of a SWOT analysis, which was conducted for IMBG as part of the previous EC **COMBIOM project** #294932 (FP7).

Also, a new SWOT analysis for IMBG will be performed as part of the BIONANOSSENS work plan.

All activities are carried out against the state-of-the-art standards in managing EU funded R&I projects – including Responsible Research and Innovation, gender balance, open access (data management, Intellectual Property management), exploitation and commercialisation orientation, and ethics.

BIONANOSSENS Project Coordinator:
Vice-Director of IMBG NAS of Ukraine
Corresponding Academician of NAS of Ukraine,
Professor Sergiy V. Dzyadevych, DSci dzyad@yahoo.com

BIONANOSSENS Project Manager:
Scientific Secretary of IMBG NAS of Ukraine
Yanina R. Mishchuk, PhD mishchuk@imbg.org.ua



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 у середині 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 Microsystems 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 conclusions providing the received results essence and their novelty understanding. The

authors should avoid the new terms and narrowprofile 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 present 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 conclusions. 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'ютерна верстка – В. Вітвицька

Підписано до друку 22.12.2021 р. Формат 60×84/8.
Ум.-друк. арк. 7,3. Тираж 50 прим.
Зам. № 2406.

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