

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

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

СЕНСОРНА ЕЛЕКТРОНІКА І МІКРОСИСТЕМНІ ТЕХНОЛОГІЇ 2025 – Т. 22, № 4

Науково-технічний журнал

Заснований 13.11.2003 року
Виходить 4 рази на рік

УДК 681.586

Засновник Одеський національний
університет імені І. І. Мечникова

За підтримки Українського фізичного
товариства і Академії наук вищої школи
України

Ідентифікатор медіа: R30-03678
(zareestrovano Natsionalnoyu Radoyu
Ukrayini z pytany tel'ebachennya
i radiomovlennya vid 28.03.2024 za № 1050)

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

Журнал реферується українським рефера-
тивним журналом «Джерело» та індексується
у міжнародних базах Index Copernicus Inter-
national Journals Master List, Directory of Re-
search Journal Indexing, General Impact Factor,
Crossref і EBSCO

Видається за рішенням Вченої ради
Одеського національного університету
імені І. І. Мечникова
Протокол № 5 від 23.12.2025 р.

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

SENSOR ELECTRONICS AND MICROSYSTEM TECHNOLOGIES 2025 – VOL. 22, No. 4

Scientific and Technical Journal

Established on 13.11.2003
Published 4 times a year

UDC 681.586

Founded by Odesa I. I. Mechnikov
National University

With the support of the Ukrainian Physical
Society and Higher School Academy of Sciences
of Ukraine

The Media Identifier: R30-03678
(registered by the National Council on
Television and Radio Broadcasting of Ukraine
as of 28.03.2024, No.1050)

The journal is included in the Category B
of the List of Specialist Scientific Publications
of Ukraine in physical and mathematical,
engineering and biological sciences

The journal is abstracted in the Ukrainian
journal of abstracts “Dzherelo” and indexed
in international databases Index Copernicus
International Journals Master List, Directory of
Research Journal Indexing, General Impact
Factor, Crossref and EBSCO

Published as per the resolution of the Academic
Council of Odesa I. I. Mechnikov National
University
Minutes No. 5 dated 23.12.2025

Editorial Board address:
2 Zmiiienka Vsevoloda St, ISEPTC,
Odesa I. I. Mechnikov National University,
Odesa, 65082, Ukraine
Tel/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)
В. Г. Вербицький (Київ, Україна)
Б. М. Галкін (Одеса, Україна)
Ю. О. Гунченко (Одеса, Україна)
Н. Жаффрезік-Рено (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)
С. В. Ленков (Київ, Україна)
Є. В. Малахов (Одеса, Україна)
А. Медвідь (Ріга, Латвія)
К. М. Музыка (Харків, Україна)
А. С. Опанасюк (Суми, Україна)
С. М. Рябченко (Київ, Україна)
Ю. О. Сеті (Львів, Україна)
В. А. Скришевський (Київ, Україна)
М. Ф. Стародуб (Київ, Україна)
М. В. Стріха (Київ, 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)
V. G. Verbitsky (Kyiv, Ukraine)
B. M. Galkin (Odesa, Ukraine)
Yu. O. Gunchenko (Odesa, Ukraine)
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)
S. V. Lenkov (Kyiv, Ukraine)
E. V. Malakhov (Odesa, Ukraine)
Arturs Medvids (Riga, Latvia)
K. M. Muzyka (Kharkiv, Ukraine)
A. S. Opanasyuk (Sumy, Ukraine)
S. M. Ryabchenko (Kyiv, Ukraine)
Yu. O. Seti (Lviv, Ukraine)
V. A. Skryshevsky (Kyiv, Ukraine)
N. F. Starodub (Kyiv, Ukraine)
M. V. Strikha (Kyiv, Ukraine)
A. Chaundhri (Chandigarh, India)
E. M. Sheregii (Rzeszow, Poland)

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

ЗМІСТ CONTENTS

Проектування і математичне моделювання сенсорів

Sensors design and mathematical modeling

V. M. Press, R. M. Balabai, V. B. Nikolenko
TRIBOELECTRIC NANOGENERATOR
BASED ON CRUMPLED GOLD FILMS:
FIRST PRINCIPLES CALCULATIONS ..4

B. M. Пресс, Р. М. Балабай, В. Б. Ніколенко
ТРИБОЕЛЕКТРИЧНИЙ
НАНОГЕНЕРАТОР НА ОСНОВІ
ЗІМ'ЯТИХ ЗОЛОТИХ ПЛІВОК:
РОЗРАХУНКИ З ПЕРШИХ ПРИНЦИПІВ

Оптичні, оптоелектронні і радіаційні сенсори

Optical and optoelectronic and radiation sensors

I. S. Virt, I. V. Padalka
DEVELOPMENT AND MODELING OF
A UV-PHOTORESISTANT MODULE
BASED ON THIN-FILM ZINC OXIDE . 15

I. С. Вірт, І. В. Падалка
РОЗРОБКА ТА МОДЕЛЮВАННЯ УФ-
ФОТОРЕЗИСТИВНОГО МОДУЛЯ НА
ОСНОВІ ТОНКОПЛІВКОВОГО ОКСИ-
ДУ ЦИНКУ

*O. G. Golenkov, A. V. Shevchik-Shekera, V.
V. Zabudsky, I. O. Lysiuk, Z. F. Tsybrii, A. S.
Stanislavskiy, S. V. Korinets, A. Yu. Shekera*
OPTICAL PROBE FOR DETERMINING
THE PHOTOSENSITIVITY SURFACE
UNIFORMITY OF DETECTORS
IN THE IR RANGE 30

*О. Г. Голенков, А. В. Шевчик-Шекера, В. В.
Забудський, І. О. Лисюк, З. Ф. Цибрій, А.
С. Станіславський, С. В. Корінець, А. Ю.
Шекера*
ОПТИЧНИЙ ЗОНД ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ
ПОВЕРХНЕВОЇ ОДНОРІДНОСТІ ФОТО-
ЧУТЛИВОСТІ ДЕТЕКТОРІВ В ІЧ ДІА-
ПАЗОНІ

S. F. Huseynova, K. E. Berkov
LUMINESCENT SENSOR BASED
ON COLLOIDAL ZINC OXIDE
NANOCRYSTALS 40

С. Ф. Гусейнова, К. Є. Берков
ЛЮМІНЕСЦЕНТНИЙ СЕНСОР НА
ОСНОВІ КОЛОЇДНИХ НАНОКРИСТА-
ЛІВ ОКСИДУ ЦИНКУ

Акустоелектронні сенсори Acoustoelectronic sensors

Ya. I. Lepikh, P. O. Snigur
DESIGN AND TECHNOLOGY
SOLUTIONS FOR
ACOUSTOELECTRONIC DEVICES
FOR PHYSICAL QUANTITIES BASED
ON SURFACE ACOUSTIC WAVES 44

Я. І. Леніх, П. О. Снігур
КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ
РІШЕННЯ АКУСТОЕЛЕКТРОННИХ
ПРИСТРОЇВ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН
НА ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ
ХВИЛЯХ

Біосенсори Biosensors

*S. Marchenko, T. Velychko, O. Soldatkina,
O. Soldatkin, B. Akata Kurç, S. Dzyadevych*
A NEW CONDUCTOMETRIC
BIOSENSOR BASED ON
RECOMBINANT UREASE ADSORBED
ON SILICALITE..... 50

*С. Марченко, Т. Величко, О. Солдаткіна,
О. Солдаткін, Б. Аката Курч, С. Дзядевч*
НОВИЙ КОНДУКТОМЕТРИЧНИЙ БІО-
СЕНСОР НА ОСНОВІ АДСОРБОВАНОЇ
НА СИЛІКАЛІТІ РЕКОМБІНАНТНОЇ
УРЕАЗИ

**Інформація для авторів. Вимоги
до оформлення статей у журнал..... 61**

**Information for authors. Paper preparation
requirements..... 64**

ПРОЕКТУВАННЯ І МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СЕНСОРІВ

SENSORS DESIGN AND MATHEMATICAL MODELING

УДК 538.9

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2025.4.347717>

ТРИБОЕЛЕКТРИЧНИЙ НАНОГЕНЕРАТОР НА ОСНОВІ ЗІМ'ЯТИХ ЗОЛОТИХ ПЛІВОК: РОЗРАХУНКИ З ПЕРШИХ ПРИНЦИПІВ

В. М. Пресс, <https://orcid.org/0009-0008-6876-8370>

Р. М. Балабай, <https://orcid.org/0000-0002-2618-7796>

В. Б. Ніколенко, <https://orcid.org/0009-0003-1022-0189>

Криворізький державний педагогічний університет,
просп. Університетський, 54, м. Кривий Ріг, 50086, Україна
e-mail: vladimpress@gmail.com, balabai@i.ua, vv.nikolenko913@gmail.com

Анотація. У статті проведено чисельне моделювання просторових розподілів густини валентних електронів та кулонівського потенціалу у поперечному напрямку трибоелектричного контакту силікону із зім'ятими золотими плівками. Визначено локальні електричні заряди в околі атомів Au, задіяних у контакті, та проаналізовано їхню залежність від морфології поверхні й сили взаємодії. Показано, що зменшення зовнішнього стискального зусилля силікону, еквівалентне віддаленню силікону від пласкої плівки золота, призводить до вирівнювання зарядових станів контактуючих атомів і більш однорідного розподілу заряду на поверхні золотої плівки, при цьому різниця потенціалів на межі контакту зростає. Аналіз впливу ступеня зім'ятості структури свідчить, що збільшення нерівностей у золотих плівках зумовлює підвищення локальних зарядів на атомах Au та посилює різницю кулонівських потенціалів на трибоелектричному контакті.

Ключові слова: трибоелектричний наногенератор, зім'ята золота плівка, функціонал електронної густини, псевдопотенціал із перших принципів, розподіл густини валентних електронів, кулонівський потенціал

Вступ

Швидко розвивається портативна електроніка для стеження за здоров'ям, захисту навколишнього середовища та моніторингу інфраструктури. Забезпечення живлення таких пристроїв залишається викликом через обмежені можливості сучасних акумуляторів. Тому

створення легких та стійких джерел живлення досі є актуальною проблемою. Останнім часом трибоелектричні наногенератори (ТЕНГ), які базуються на явищах трибоелектризації та електростатичній індукції, продемонстрували просту, економічно ефективну та універсальну технологію збору енергії [1]. Вони є перспек-

тивними кандидатами для реалізації різних автономних систем. На сьогодні розроблено низьку стратегій для підвищення виходу ТЕНГ, зокрема модифікацію поверхні, оптимізацію складу матеріалів, інжекцію носіїв заряду, удосконалення архітектури тощо. Однак більшість із цих підходів мають фінансові та технологічні обмеження у практичному застосуванні. Нещодавно дослідники [2] продемонстрували простий та економічно ефективний метод досягнення більшої вихідної потужності завдяки використанню структур і пристроїв із малими розмірами на основі зім'ятих шарів графену. Проте максимальна потужність і термін служби цих пристроїв були обмежені через ненадійність графену. Подібний підхід було застосовано і в роботі [3], де використання золотих наночастинок дозволило покращити стабільність та електричні характеристики гнучкого наногенератора.

Дослідники [4-5] відзначають, що структурні вібрації є поширеним видом механічного руху, характерним для транспортних засобів, залізниць, будівель, мостів та промислових об'єктів, і становлять універсальне джерело для збору енергії. У літературі [6-7] продемонстровано різні типи ТЕНГ для збору енергії від структурних вібрацій та їхніх застосувань, зокрема вільно-фіксований ТЕНГ для збору енергії та моніторингу коліс потяга, багаторе-

жимний ТЕНГ для збору енергії на стиках вантажних вагонів і саможивленого моніторингу вантажних поїздів, а також саможивлений вібраційний ТЕНГ на основі електроспінених нанопірних структур для контролю натягу залізничних скріплень [8]. Водночас енергія рухів людини також розглядається як важливе джерело для носимих і біомедичних застосувань збору енергії [9-11].

У подальших своїх дослідженнях автори [12] запропонували гнучкий трибоелектричний наногенератор на основі зім'ятих золотих (Au) плівок. Введення зім'ятої морфології в тонку плівку золота замість складного літографічного процесу дозволило суттєво підвищити ефективність. ТЕНГ на основі трибоелектричного контакту площею у $1,5 \text{ см}^2$, утвореного зім'ятою золотою плівкою з шаром полідиметилсилоксану, за стискального зусилля $\sim 20 \text{ Н}$ генерував вихідну напругу $100,2 \text{ В}$ і густину струму $9,14 \text{ мкА/см}^2$, що у 7 разів перевищувало напругу та у 6 разів – густину струму порівняно з ТЕНГ на основі плоских золотих плівок.

Для оцінки впливу ступеня зім'ятості у структурі золотих плівок та стискального зусилля (рис. 1) на вихідну потужність ТЕНГ нами проведено чисельні дослідження методами теорії функціоналу густини та першопринципного псевдопотенціалу, реалізованого за допомогою власного програмного коду [13].

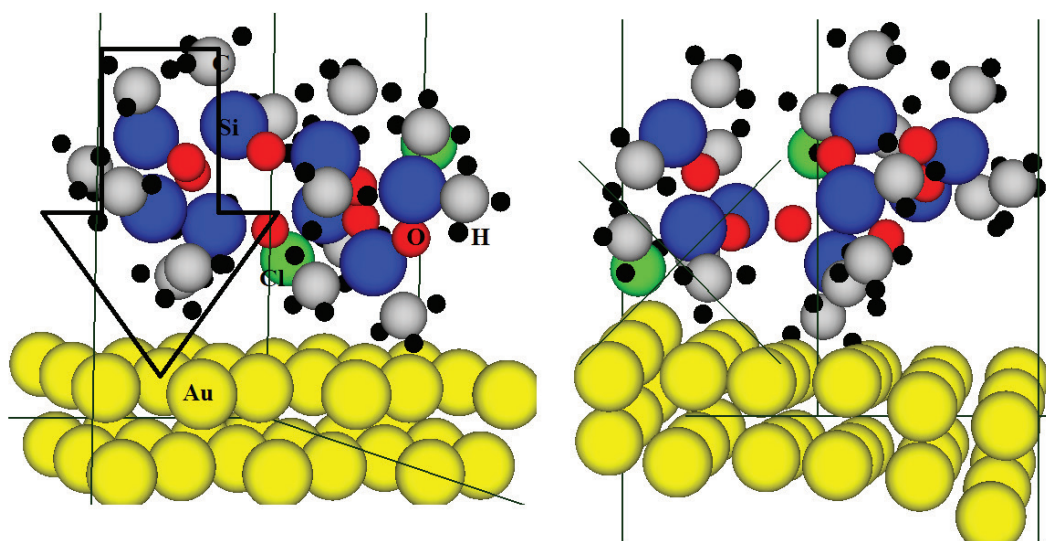


Рис. 1. Зовнішня сила забезпечує трибоелектричний контакт плоскої (зліва) та зім'ятої (справа) золотої плівки із шаром силікону (полідиметилсилоксан). На рисунку подано одиничні комірки суперґратки, які під час трансляції формують нескінченну двошарову плівку золота.

Обчислювальні методи і моделі

Усі розрахунки проведено з використанням авторського програмного коду КДПУ. Основні стани електронно-ядерних систем визначено шляхом самоузгодженого розв'язання одночастинкових рівнянь Кона-Шема:

$$\left\{ -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + \frac{\partial U}{\partial n(\vec{r})} \right\} \psi_i(\vec{r}) = \varepsilon_i \psi_i(\vec{r}). \quad (1)$$

Під час розв'язання цих рівнянь застосовано формалізм псевдопотенціалу, відповідно до якого тверде тіло розглядається як система валентних електронів та іонних остовів. У псевдопотенціальному наближенні оператор псевдопотенціалу V_{PS} , що описує взаємодію валентних електронів з остовом, є малим, а відповідна псевдохвильова функція відзначається гладкістю. У роботі використано *ab initio* псевдопотенціал Бечелета-Хемена-Шльотера. Повний кристалічний потенціал формується як сума іонних псевдопотенціалів, що не перекриваються і пов'язані з іонами (ядро + остовні електрони), розташованими в положеннях $\vec{R}_S$, які періодично повторюються для кристалів ($\vec{p}$):

$$V_{crystal}(\vec{r}) \rightarrow V_{PS}(\vec{r}) = \sum_{\vec{p}} \sum_S \bar{V}_S^{PS}(\vec{r} - \vec{p} - \vec{R}_S). \quad (2)$$

Для неперіодичних систем, таких як тонка плівка або кластер, проблему відсутності періодичності можна обійти за допомогою методу суперґратки. Наприклад, кластер періодично

повторюється в просторі, але відстань між кожним кластером і його періодичними зображеннями настільки велика, що їх взаємодія незначна. Повсюдна періодичність кристалічної (або штучної) ґратки створює періодичний потенціал і, відповідно до теореми Блоха, накладає таку саму періодичність на густину. Потенціал Кона-Шема періодичної системи демонструє таку ж періодичність, що й ґратка, а орбіталі Кона-Шема можна записати у формі Блоха:

$$\psi(\vec{r}) \equiv \psi_i(\vec{r}, \vec{k}) = \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r}) u_i(\vec{r}, \vec{k}), \quad (3)$$

де $\vec{k}$ є вектором із першої зони Бриллюена. Функція $u_i(\vec{r}, \vec{k})$ має періодичність у просторі. Індекс «i» проходить по всіх станах. Періодичні функції можуть бути розкладені за базисом плоских хвиль. Це обґрунтовує використання плоских хвиль як загального базисного набору для розкладення періодичної частини орбіталей. Оскільки плоскі хвилі утворюють повний і ортонормований набір функцій, їх можна використовувати для розкладення орбіталей відповідно до:

$$\Psi_j(\vec{k}, \vec{r}) = \frac{1}{\sqrt{N_0} \sqrt{\Omega}} \sum_{\vec{G}} b_j(\vec{k} + \vec{G}) \exp(i(\vec{k} + \vec{G}) \cdot \vec{r}) \quad (4)$$

де $\vec{G}$ є вектором в оберненому просторі, а Ω – об'ємом одиничних комірок, з яких складається періодичний кристал або штучна суперґратка під час відтворення неперіодичних об'єктів.

Рівняння (1) після перетворення Фур'є у обернений простір має вигляд:

$$\sum_{\vec{G}} \left[\left\{ \frac{\hbar^2}{2m} (\vec{k} + \vec{G})^2 - \varepsilon_j \right\} \delta_{\vec{G}, \vec{G}'} + V_{KS}(\vec{k} + \vec{G}, \vec{k} + \vec{G}') \right] b_j(\vec{k} + \vec{G}) = 0, \quad (5)$$

де V_{KS} є потенціалом Кона-Шема:

$$V_{KS}(\vec{k} + \vec{G}, \vec{k} + \vec{G}') = V_{PS}(\vec{k} + \vec{G}, \vec{k} + \vec{G}') + V_H(\vec{G}' - \vec{G}) + V_{XC}(\vec{G}' - \vec{G}), \quad (6)$$

де V_{XC} є обмінно-кореляційним потенціалом. Для його розрахунку використано наближення Сіперлі-Олде, параметризоване Пердью та Зунге.

Основним значенням у формалізмі функціонала електронної густини є густина заряду. Вона оцінюється із самоузгодженого

розв'язку рівнянь (1), який необхідно виконати в усіх точках неприводимої частини зони Бриллюена:

$$\rho(\vec{G}) = \frac{2}{N_T} \sum_{\vec{k}} \sum_j \sum_{\alpha \in T} \sum_{\vec{G}'} b_j^*(\vec{k} + \vec{G}' + \alpha \vec{G}) b_j(\vec{k} + \vec{G}'), \quad (7)$$

де індекс j пробігає всі зайняті стани, $\vec{k}$ – вектором із першої зони Бриллюена, N_T – числом операторів α в точковій групі T атомного базису, а фактор 2 враховує спінове виродження.

Інтеграл по зоні Бриллюена суперґратки апроксимовано підсумовуванням по особливих точках зони. Задовільну точність можна досягати, замінюючи підсумовування за кінцевим числом спеціальних точок однією точкою із зони Бриллюена – Γ -точкою, що особливо актуально для штучних періодичних систем.

Кулонівський потенціал вздовж заданого напрямку розраховано за формулою, яка в оберненому просторі має вигляд:

$$V_h(\vec{G}) = \frac{4\pi e^2 \rho(\vec{G})}{G^2}, \quad (8)$$

де $\rho(\vec{G})$ – фур'є-компонента електронної густини (7).

Для оцінки перерозподілу заряду електронів між атомами розраховувався вираз в околі атома α в об'ємі V :

$$q_\alpha = Z_\alpha - \int_V n(r) d^3r. \quad (9)$$

Розрахунки проведено за таких умов: підсумовування по зоні Бриллюена змінено розрахунком в одній точці (Γ -точка). Кількість плоских хвиль у розкладі хвильової функції становила приблизно 20-25 хвиль, що приходяться на один атом базису. Атомний базис не оптимізовано.

Для вивчення трибоелектризації на контакті золото-силікон, зумовленої ступенем зім'ятості у структурі золотих плівок та зусиллям тиску, створено атомні модельні об'єкти, що відтворюють кристалографічний простір нескінченної плівки золота з двох атомних шарів (36 атомів у базисі), та фрагмента силікону (полідиметилсилоксан) (81 атом у базисі, див. рис. 1). Стискальне зусилля враховували у розрахунку шляхом збільшення відстані між поверхнею плівки та фрагментом полімеру від початкового нульового значення, коли координати Z відповідних атомів плівки та силікону збігалися (максимальне зусилля тиску). Деформацію у структурі золотих плівок моделювали шляхом застосування до координат атомів плівки та фрагмента силікону матричних операцій одночасного вигину відносно осей X та Y ; на початковому етапі плівка мала пласку форму (кут вигину 0°).

Результати та обговорення

Розраховано та обговорено просторові розподіли густини валентних електронів і кулонівського потенціалу в поперечному напрямку трибоелектричного контакту. Обчислено значення електричних зарядів у околі атомних ядер Au, задіяних у контакті.

Результати наведено в таблицях 1-2 та на рисунках 2-8.

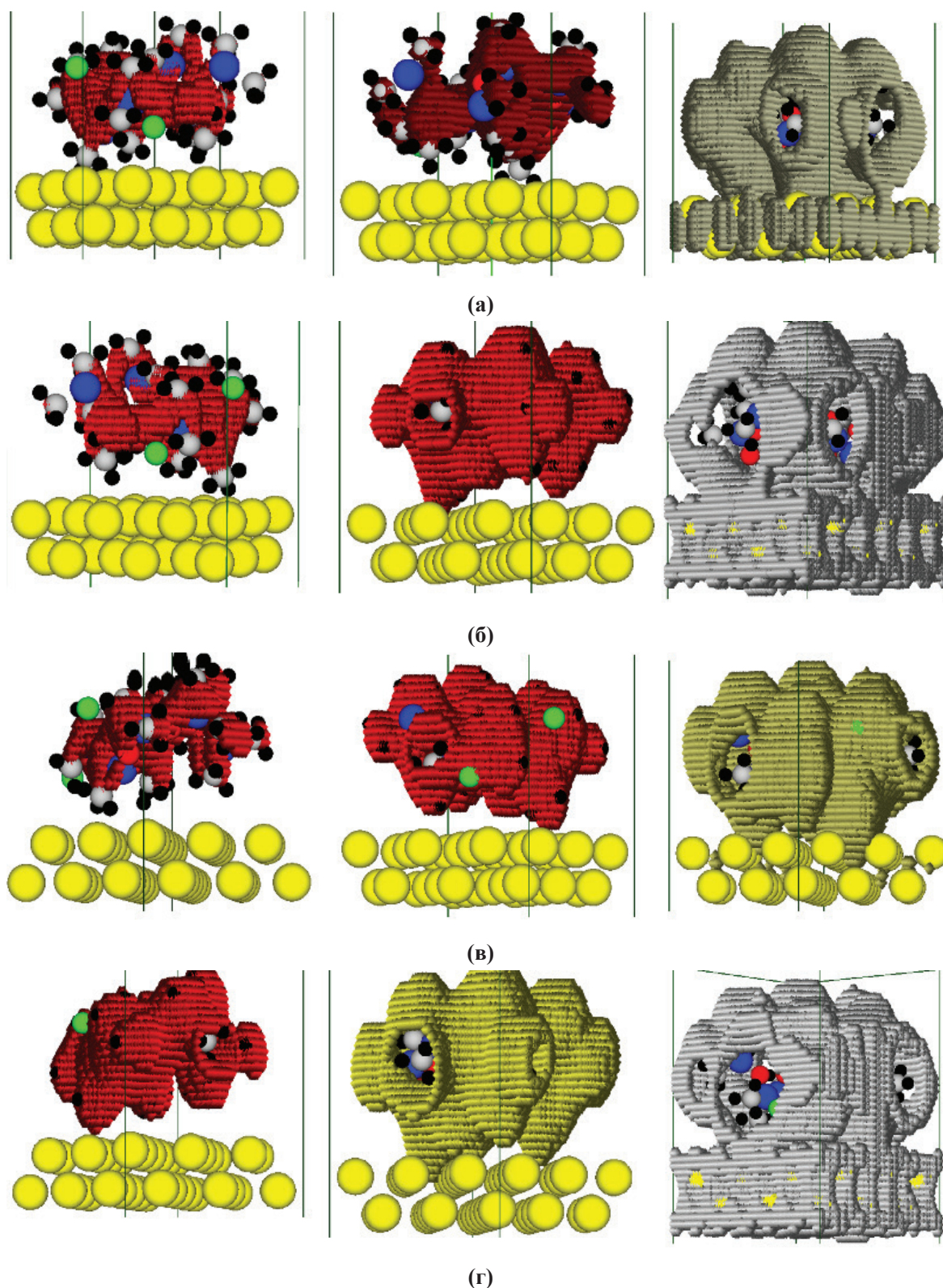


Рис. 2. Вид на просторові розподіли густини валентних електронів у межах одиничної комірки трибоелектричного контакту для різних ізозначень густини, починаючи від максимального та відстаней силікону від плівки (а – перший рядок розподілів за відстані 0 Å, другий, третій – за відстані 0.5 Å; б – за відстані – 1.0 Å; в – за відстані – 1.5 Å; г – за відстані – 2.0 Å.

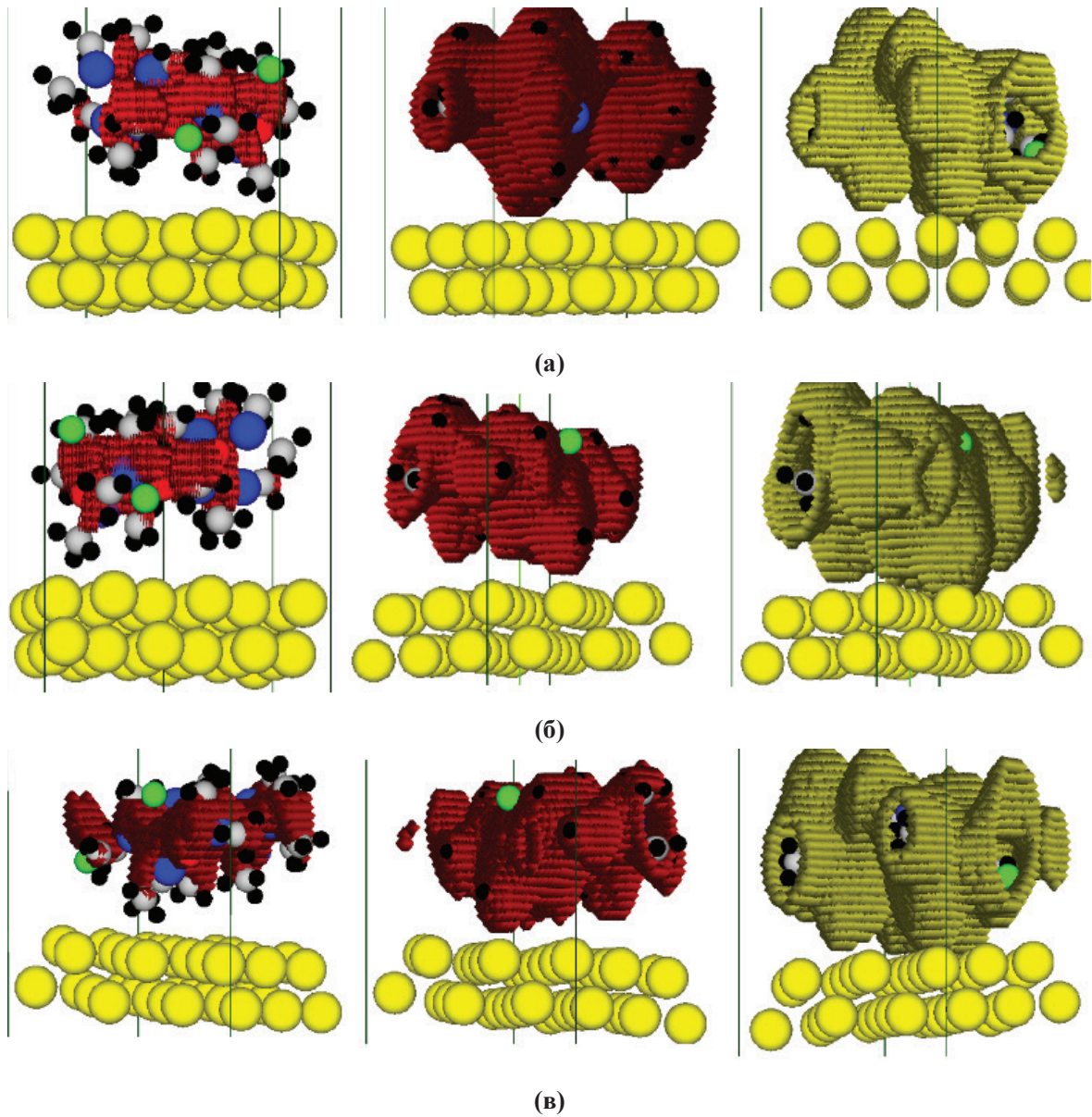


Рис. 3. Вид просторових розподілів густини валентних електронів у межах однієї комірки трибоелектричного контакту для різних ізозначень густини, починаючи від максимального та ступеню зім'ятості у структурі золотих плівок (а – 0.1° ; б – 0.2° ; в – 0.4°). Відстань силікону від плівки золота $2.0 \text{ \AA}$.

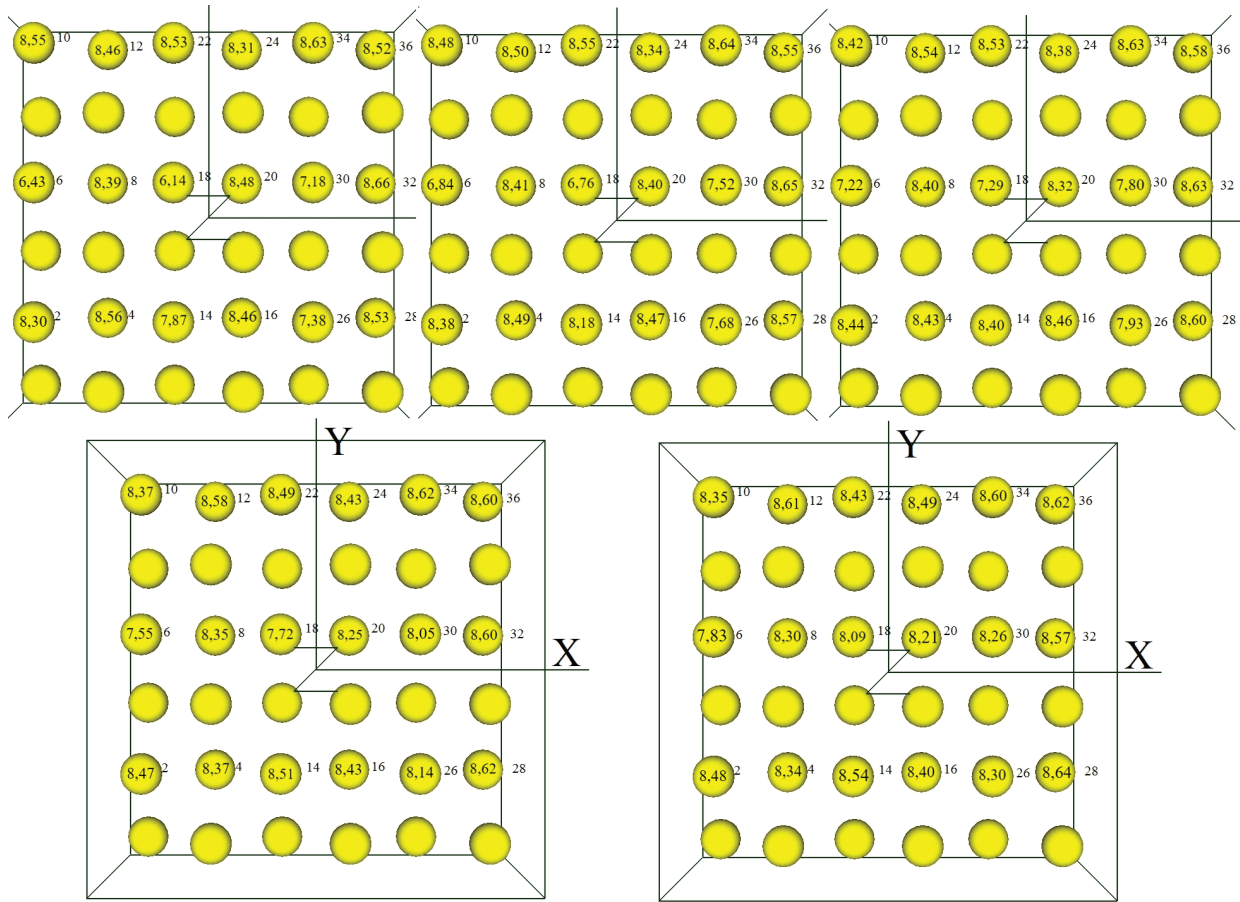


Рис 4. Зображено атомний шар пласкої плівки золота, що контактує із силіконом на різних відстанях (0 Å, 0.5 Å, 1.0 Å, 1.5 Å, 2.0 Å – зліва направо), у межах одиничної комірки з позначенням електричних зарядів (числа в середині кіл в одиницях заряду електрона, справа від кіл позначається номер атома в межах базису), розрахованих за формулою (8) в околі радіусом 1.323 Å. Відповідні дані наведено у Табл. 1.

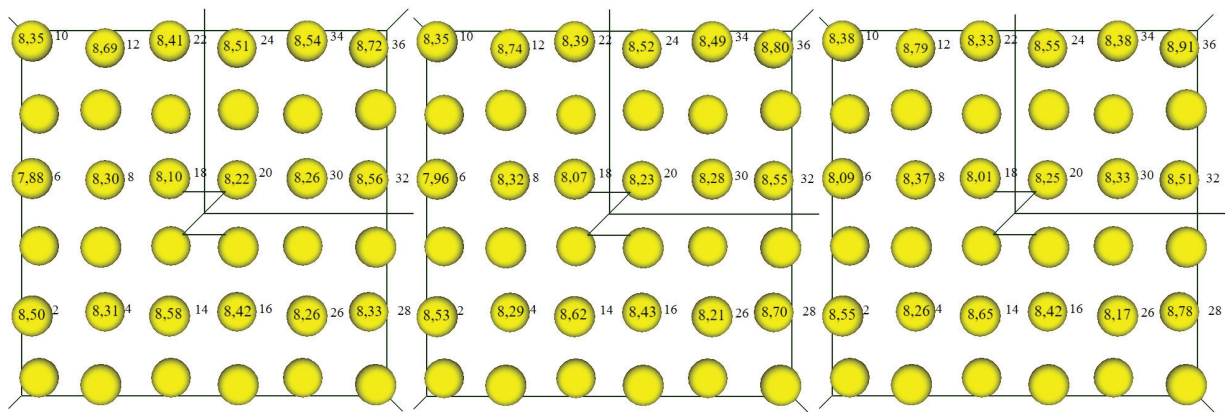


Рис 5. Зображено атомний шар пласкої плівки золота, що контактує із силіконом, за різних ступенів зім'ятості у структурі золотих плівок (а – 0.1°; б – 0.2°; в – 0.4° – зліва направо) на відстані 2.0 Å, у межах одиничної комірки з позначенням електричних зарядів (числа в середині кіл в одиницях заряду електрона, справа від кіл позначається номер атома в межах базису), розрахованих за формулою (8) в околі радіусом 1.323 Å. Відповідні дані наведено у Табл. 2.

Таблиця 1

Заряди в околі радіусом 1.323 Å атомів золота та параметри кулонівських потенціалів (див. рис.5) у пласкій плівці золота, що контактує із силіконом на різних відстанях.

№ атому	Заряд, ес					ΔV , ат. од.				
	0 Å	0.5Å	1.0Å	1.5Å	2.0 Å	0 Å	0.5Å	1.0Å	1.5Å	2.0 Å
2	8,307	8,383	8,441	8,473	8,489	42,746	45,439	48,219	51,070	54,093
4	8,561	8,499	8,436	8,379	8,340	46,293	48,824	51,475	54,186	57,085
6	6,439	6,848	7,226	7,557	7,831	44,547	47,189	49,959	52,817	55,855
8	8,393	8,419	8,402	8,354	8,303	49,371	51,957	54,653	57,455	60,471
10	8,551	8,485	8,424	8,376	8,359	40,715	43,380	46,131	48,956	51,957
12	8,467	8,505	8,546	8,584	8,617	44,184	46,889	49,685	52,529	55,544
14	7,877	8,189	8,408	8,511	8,547	49,009	51,545	54,244	57,201	60,352
16	8,460	8,479	8,469	8,439	8,407	49,804	52,585	55,439	58,372	61,506
18	6,142	6,765	7,293	7,727	8,090	51,068	53,704	56,434	59,280	62,363
20	8,489	8,402	8,326	8,259	8,210	50,666	53,242	55,922	58,759	61,928
22	8,536	8,555	8,533	8,490	8,437	47,007	49,767	52,619	55,534	58,614
24	8,314	8,343	8,384	8,432	8,492	46,597	49,137	51,802	54,500	57,368
26	7,385	7,683	7,936	8,142	8,307	47,861	50,545	53,346	56,238	59,305
28	8,537	8,570	8,603	8,623	8,640	43,995	46,666	49,443	52,302	55,290
30	7,184	7,520	7,804	8,052	8,263	48,393	50,918	53,547	56,256	59,172
32	8,665	8,658	8,637	8,606	8,572	42,734	45,437	48,225	51,100	54,178
34	8,637	8,641	8,634	8,620	8,602	43,059	45,590	48,239	50,952	53,838
36	8,523	8,553	8,583	8,606	8,628	38,908	41,625	44,420	47,297	50,356

Таблиця 2

Заряди в околі атомів золота радіусом 1.323 Å та параметри кулонівських потенціалів (див. рис. 5) у зім'ятій плівці золота, що контактує із силіконом на відстані 2.0 Å, за різних ступенів зім'ятості у структурі золотих плівок.

№, атому	Заряд, ес				ΔV , ат. од.			
	0.0°	0.1°	0.2°	0.4°	0.0°	0.1°	0.2°	0.4°
2	8,489	8,509	8,532	8,555	54,093	54,545	54,873	55,139
4	8,340	8,316	8,297	8,269	57,085	57,528	58,548	59,387
6	7,831	7,888	7,963	8,094	55,855	55,290	54,688	54,338
8	8,303	8,304	8,320	8,374	60,471	60,116	59,633	58,016
10	8,359	8,350	8,353	8,381	51,957	52,038	52,011	51,464
12	8,617	8,692	8,749	8,795	55,544	55,837	55,929	55,318
14	8,547	8,586	8,621	8,657	60,352	60,955	61,265	61,027
16	8,407	8,424	8,434	8,423	61,506	61,596	61,465	60,625
18	8,090	8,100	8,071	8,016	62,363	62,160	61,814	60,645
20	8,210	8,225	8,235	8,253	61,928	61,993	61,904	61,079
22	8,437	8,412	8,396	8,332	58,614	58,943	59,008	58,372
24	8,492	8,515	8,524	8,557	57,368	58,072	58,969	59,653
26	8,307	8,265	8,216	8,179	59,305	59,260	59,082	58,085
28	8,640	8,336	8,704	8,780	55,290	55,107	54,804	53,777
30	8,263	8,266	8,284	8,332	59,172	59,240	59,564	59,333
32	8,572	8,565	8,557	8,515	54,178	54,370	54,618	55,023
34	8,602	8,545	8,493	8,389	53,838	53,705	53,482	54,492
36	8,628	8,720	8,805	8,912	50,356	50,840	51,338	52,414

У табл. 1, 2 наведено характеристики кулонівських потенціалів, обчислених за формулою (9) у поперечних напрямках трибологічного контакту, що проходять через атоми

плівки золота, для яких обчислювалися заряди. Напрямки обчислення потенціалів та їхнє представлення наводяться на рис. 6.

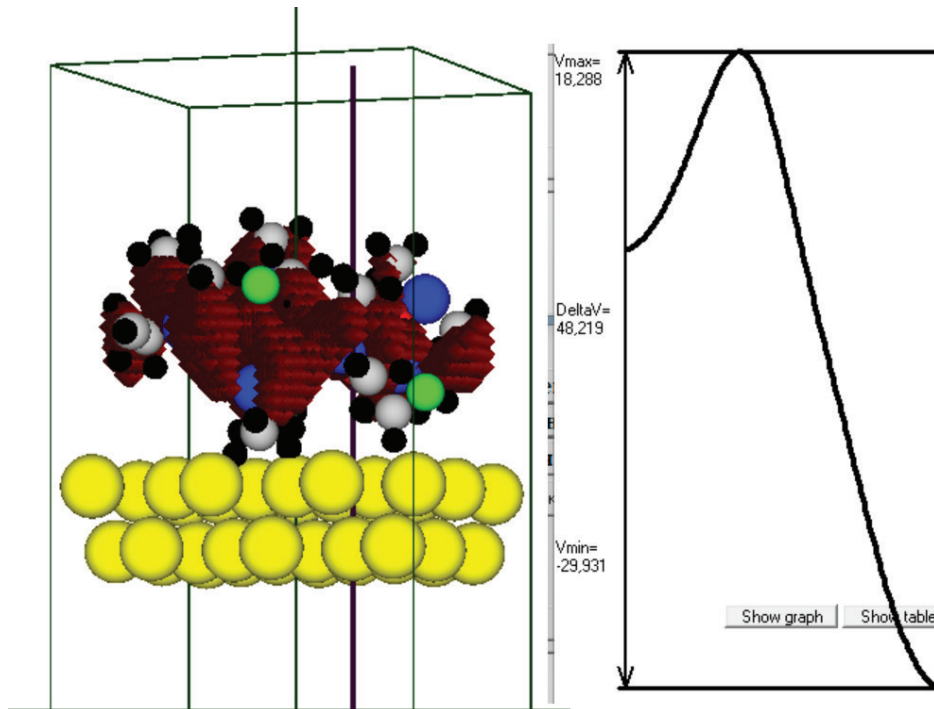


Рис. 6. Одинична комірка з атомним базисом, що відтворює нескінченну плівку золота та фрагменти силікону на її поверхні. Жирна лінія позначає поперечний напрям контакту, обраний для обчислення кулонівського потенціалу (зліва). Справа розподіл кулонівського потенціалу вздовж визначеного напрямку. Параметр кривої ΔV відображає різницю між максимальним та мінімальним значеннями в межах розподілу потенціалу (справа).

Аналіз отриманих результатів чисельних експериментів показує їхню узгодженість з експериментальними даними авторів [12]. Порівняння електричних зарядів на атомах золота показує, що послаблення зовнішнього стискального зусилля силікону до плівки (аналог віддалення силікону від плівки) призводить до вирівнювання зарядових станів атомів, що контактують (рівномірне зарядження поверхні плівки золота), а створювана різниця потенціалів на контакті збільшується. Збільшення ступеня зім'ятості структури золотих плівок та силікону підвищує заряди на атомах золота, що контактує, та підсилює різницю кулонівських потенціалів на контакті.

Отримані результати демонструють ключову роль морфології поверхні у формуванні електронних властивостей трибоелектричних

наногенераторів і підтверджують перспективність використання зім'ятих золотих плівок для підвищення ефективності пристроїв.

Висновки

Проведено чисельне дослідження впливу морфології золотих плівок та зовнішнього стискального зусилля на електронні характеристики трибоелектричного контакту золото-силікон. Розраховано просторові розподіли густини валентних електронів та кулонівського потенціалу, визначено локальні заряди в околі атомів Au і проаналізовано їхню залежність від деформації плівки та сили взаємодії з полімером.

Показано, що зменшення тиску сприяє вирівнюванню зарядових станів атомів золота та формуванню більш однорідного заряджен-

ня поверхні, що супроводжується зростанням різниці потенціалів на межі контакту.

Встановлено, що збільшення ступеня зім'ятості у структурі золотих плівок та силікону призводить до зростання локальних зарядів на атомах Au і підсилює кулонівську різницю потенціалів, що забезпечує підвищення трибоелектричного ефекту.

Отримані результати узгоджуються з експериментальними даними, що підкреслює їхню достовірність та підтверджує перспективність використання зім'ятих золотих плівок для підвищення ефективності трибоелектричних наногенераторів.

Список використаної літератури

- [1]. Z. Shi, Y. Zhang, J. Gu, B. Liu, H. Fu, H. Liang, J. Ji. Triboelectric nanogenerators: state of the art // *Sensors*, 24(13), 4298 (2024). DOI: <https://doi.org/10.3390/s24134298>
- [2]. H. Chen, Y. Xu, L. Bai, Y. Jiang, J. Zhang, C. Zhao, T. Li, H. Yu, G. Song, N. Zhang, Q. Gan. Crumpled graphene triboelectric nanogenerators: smaller devices with higher output performance // *Adv. Mater. Technol.*, 2(6), 1700044 (2017). DOI: <https://doi.org/10.1002/admt.201700044>
- [3]. S. Kumar, A. Singh, R. Kumar, S. Singh. Structural and electrical characterization of gold nanoparticles-based flexible triboelectric nanogenerator // *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 34, 1-12 (2023). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10854-022-09715-3>
- [4]. D. Choi, Y. Lee, Z.-H. Lin, S. Cho, M. Kim, C.K. Ao, S. Soh, C. Sohn, C.K. Jeong, J. Lee, et al. Recent advances in triboelectric nanogenerators: from technological progress to commercial applications // *ACS Nano*, 17(12), 11087–11219 (2023). DOI: <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c12458>
- [5]. J. Chen, Z. L. Wang. Reviving vibration energy harvesting and self-powered sensing by a triboelectric nanogenerator // *Joule*, 1(3), 480-521 (2017). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.09.004>
- [6]. L. Jin, S. L. Zhang, S. Xu, H. Guo, W. Yang, Z. L. Wang. Free-fixed rotational triboelectric nanogenerator for self-powered real-time wheel monitoring // *Advanced Materials Technologies*, 6(3), 2000918 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1002/admt.202000918>
- [7]. Y. Du, Q. Tang, W. He, W. Liu, Z. Wang, H. Wu, G. Li, H. Guo, Z. Li, Y. Peng, et al. Harvesting ambient mechanical energy by multiple mode triboelectric nanogenerator with charge excitation for self-powered freight train monitoring // *Nano Energy*, 90, 106543 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106543>
- [8]. Y. Meng, J. Yang, S. Liu, W. Xu, G. Chen, Z. Niu, M. Wang, T. Deng, Y. Qin, M. Han, X. Li. Nano-fiber based self-powered flexible vibration sensor for rail fasteners tightness safety detection // *Nano Energy*, 102, 107667 (2022). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107667>
- [9]. Y. C. Lai, Y. C. Hsiao, H. M. Wu, Z. L. Wang. Waterproof fabric-based multifunctional triboelectric nanogenerator for universally harvesting energy from raindrops, wind, and human motions and as self-powered sensors // *Advanced Science*, 6(5), 1801883 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1002/adv.201801883>
- [10]. L. Wang, W. Liu, Z. Yan, F. Wang, X. Wang. Stretchable and shape-adaptable triboelectric nanogenerator based on biocompatible liquid electrolyte for biomechanical energy harvesting and wearable human-machine interaction // *Advanced Functional Materials*, 31(7), 2007221 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.202007221>
- [11]. H. Wang, M. Han, Y. Song, H. Zhang. Design, manufacturing and applications of wearable triboelectric nanogenerators // *Nano Energy*, 81, 105627 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105627>
- [12]. H. Chen, L. Bai, T. Li, C. Zhao, J. Zhang, N. Zhang, G. Song, Q. Gan, Y. Xu. Wearable and robust triboelectric nanogenerator based on crumpled gold films // *Nano Energy*, 46, pp. 73-80 (2018). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.01.032>
- [13]. V. M. Press, R. M. Balabai. Tribovoltaic effect at the water-silicon interface // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 769(7-8), pp. 738-745 (2025). DOI: <https://doi.org/10.1080/15421406.2025.2504038>

Стаття надійшла до редакції 12.10.2025 р.

UDC 538.9

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2025.4.347717>

TRIBOELECTRIC NANOGENERATOR BASED ON CRUMPLED GOLD FILMS: FIRST PRINCIPLES CALCULATIONS

V. M. Press, R. M. Balabai, V. B. Nikolenko

Kyryvyi Rih State Pedagogical University,
54 Universytetskyi Ave, Kyryvyi Rih, 50086, Ukraine
e-mail: vladimpress@gmail.com, balabai@i.ua, vv.nikolenko913@gmail.com

Abstract. The article presents a numerical simulation of the spatial distributions of the valence electron density and the Coulomb potential in the transverse direction of the triboelectric contact of silicon with crumpled gold films. The local electric charges in the vicinity of the Au atoms involved in the contact are determined, and their dependence on the surface morphology and interaction force is analyzed. It is shown that a decrease in the external compressive force of silicon, equivalent to the distance of silicon from a flat gold film, leads to the alignment of the charge states of the contacting atoms and a more uniform charge distribution on the surface of the gold film, while the potential difference at the contact boundary increases. Analysis of the influence of the degree of crumpling of the structure shows that an increase in the irregularities in the gold films leads to an increase in the local charges on the Au atoms and increases the difference in the Coulomb potentials at the triboelectric contact.

Keywords: triboelectric nanogenerator, crumpled gold film, electron density functional, first-principles pseudopotential, valence electron density distribution, Coulomb potential

ОПТИЧНІ, ОПТОЕЛЕКТРОННІ І РАДІАЦІЙНІ СЕНСОРИ

OPTICAL AND OPTOELECTRONIC AND RADIATION SENSORS

PACS 07.07.Df, 42.70.Qs

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2025.4.339704>

РОЗРОБКА ТА МОДЕЛЮВАННЯ УФ-ФОТОРЕЗИСТИВНОГО МОДУЛЯ НА ОСНОВІ ТОНКОПЛІВКОВОГО ОКСИДУ ЦИНКУ

I. С. Вірт, <https://orcid.org/0000-0001-7200-6055>

I. В. Падалка, <https://orcid.org/0009-0007-4071-5878>

Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка,
факультет фізики, математики, економіки та інноваційних технологій,
вул. Івана Франка, 24, м. Дрогобич, 82100, Україна,
e-mail: isvirt@dspu.edu.ua, ivan.padalka@dspu.edu.ua

Анотація. У статті описано фотоелектричні властивості змодельованого формуючого і підсилювального каскадів у фотоприймачі, який виявляє ультрафіолетове випромінювання. Створено модуль, що містить монолітний сенсорний індикаторний пристрій на основі базового фоторезистора з оксиду цинку та трансїмпедансного підсилювача (*transimpedance amplifier (TIA)*). На основі отриманих результатів запропоновано та протестовано простий детектор випромінювання з двокаскадним диференціальним підсилювачем. За напруги зміщення 4 В була отримана чутливість фотомодуля $5 \cdot 10^4$ В/Вт. Порівняно шум каскадів у режимах темного струму та при освітленні стандартним промисловим світлодіодом і проаналізовано смугу пропускання сигналу.

Ключові слова: детекція випромінювання, фоторезистор, УФ-сенсори, трансїмпедансний підсилювач, оксид цинку

Вступ

У даний час одним зі способів реєстрації оптичних сигналів є використання фотоелектричних (ФЕ) елементів. Напівпровідникові фотодетектори випромінювання переважно використовують спеціальну схему формування сигналу, що забезпечує необхідні параметри системи детектування. Монолітна інтеграція ультрафіолетового (УФ) датчика у якості фото-

резистора зменшує займану площу порівняно з гібридною комбінацією дискретних компонентів [1,2]. Виявлення ультрафіолетового (УФ) світла стає дедалі важливішим, оскільки УФ-сенсори знаходять застосування в багатьох галузях [3,4]. Для різних прикладних завдань важливо ретельно контролювати УФ-випромінювання. Фотоприймачі є ключовими елементами в різних методах виявлення випромінювання. Їх використовують у медицині,

науці, промисловості та системах безпеки. УФ-сенсори також корисні для виявлення полум'я, у біомедичній спектроскопії та військових цілях. Пристрої різних конструкцій вимірюють інтенсивність випромінювання, тривалість світлового впливу, кількість частинок та інші параметри. Часто застосовуються твердотільні детектори [5]. Однак, у більшості випадків необхідно правильно формувати сигнал, щоб підготувати його для подальшої обробки цифровою схемою (наприклад, аналого-цифровим перетворювачем або компаратором).

У наш час тактичні сенсорні системи робототехніки стають все більш важливими через вимогу до безпеки зіткнень та реактивного керування в неструктурованих середовищах. На основі показань існують три основні класи датчиків, які можуть вимірювати принцип роботи тактичних сенсорних елементів, а саме оптичні, ємнісні та резистивні ефекти. Резистивні датчики є одними з найпоширеніших через їх відносно невисоку дешевизну у виробництві та легкість інтерфейсу зі схемою формування сигналу. Фотоелектричний модуль працює як замкнута система, використовуючи принцип моста Вітстона разом зі світлозалежним резистором (*LDR*). Оксид цинку – це матеріал, який добре підходить для цього, оскільки має велику ширину забороненої зони оптимальну для абсорбції УФ-випромінювання, високу квантову ефективність та порівняно високу рухливість електронів. На його основі на даний час створено та протестовано значна кількість фотодетекторів (ФД) УФ-випромінювання [6,7].

Проектування та технологія пристрою

У даній статті пропонується застосування диференціального підсилювача *TIA* з низьким рівнем шуму, низькою вартістю, високою чутливістю та простою структурою. *TIA* використовує лише один ОП для диференціального посилення, що ефективно усуває постійне зміщення та зменшує як внутрішній, так і зовнішній шум [8,9]. Ця особливість робить *TIA* надзвичайно придатним для виявлення високочастотних слабких оптичних сигналів. *TIA* здатні перетворювати сигнали вхідного

струму на сигнали вихідної напруги та часто використовуються як схеми передпідсилювачів для фотодіодів (ФД), інерціальної навігації, систем контролю орієнтації та позиціонування, що широко використовуються в аерокосмічній, авіаційній, навігаційній, картографічній та інших інженерних галузях. Перетворювачі струму в напругу *TIA* зазвичай використовують з однопиксельними детекторами видимого та інфрачервоного випромінювання, тоді як підсилювачі заряду зазвичай працюють як схеми зчитування в матрицях детекторів [10-12]. Більшість досліджень *TIA* зосереджені на низьких частотах (до 100 МГц). У системі з закритим циклом для визначення характеристик випромінювання використовується різноманітна активна сенсорика, така як *LDR*. У літературі описано багато систем сучасних пристроїв, призначених для відстеження розташування об'єктів в реальному часі – трекерів. Трекери, наприклад *GPS (Global Positioning System)*, різняться залежно від використовуваних методів відстеження, таких як методи на основі датчиків, на основі геометричних рівнянь, на основі штучного інтелекту, тощо [13-16]. Трекери на основі датчиків є найбільш запропонованими системами завдяки своїй простоті та співвідношенню ефективності/ціна. Вони широко використовують світлові датчики, такі як фоторезистори (*LDR*), фотодіоди, сонячні елементи, пірометри для відстеження руху джерел випромінювання [17]. Найпоширенішими датчиками є *LDR* через їхню просту схему та дуже низьку ціну. З цих причин багато досліджень використовують цей тип датчиків у своїх системах [18].

У цьому дослідженні ми пропонували та протестували застосування монолітного *LDR*-резистора на основі оксиду цинку. Тонкі плівки оксиду цинку були отримані методом імпульсного лазерного осадження (*Pulsed Laser Deposition (PLD)*) за підібраними технологічними умовами лазерної абляції відповідних мішеней. Спресовані мішені оксиду цинку, леговані нікелем (*Ni 0,1%*), випаровували за допомогою *Nd:YAG* лазера на комерційні підкладки Al_2O_3 (орієнтація підкладки

у с-площині), нагріті до 250 °С. Параметри лазера: довжина хвилі $\lambda \approx 1064$ нм; енергія в імпульсі $E_{max} \approx 0,4$ Дж; тривалість імпульсу $\delta t \approx 20$ нс, частота повторення імпульсів $f \approx 3$ Гц. Використовували дози росту (від 1000 до 1500 імпульсів). Отримано плівки з мозаїчною монокристалічною структурою товщиною близько 300 нм. Свіжовирощені плівки відпалювали при температурі 300 °С протягом 20 хвилин в атмосфері кисню. Струмоведучі контакти виготовлено з допомогою срібної пасти. Розміри світочутливої ділянки тонкої плівки 1×1 мм². Структура пристрою LDR-резистора проілюстрована на рис. 1.

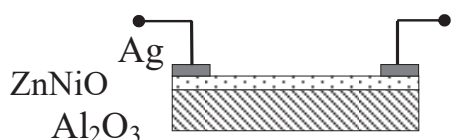


Рис. 1. Схема резистора LDR на основі тонкоплівкового оксиду цинку на підкладці Al_2O_3 .

У системі відстеження оптичного сигналу може бути застосована конструкція сканування *Dynamic Application Security Testing (DAST)*, що забезпечується схемою моста Вітстона (*Wheatstone bridge (VMWB)*) [19] використаного у даному дослідженні включаючи як функціональний елемент LDR. Даний підхід, заснований на сигналах струму, придатний для виявлення дуже малих коливань резистивних датчиків у конфігурації моста Вітстона. Використовуючи схему моста, вихід чутливої параметричної функції отримується від датчика електричного опору LDR – рис. 2. Це використовується для порівняння сигналу з деяким заданим значенням. LDR працює під зовнішнім зміщенням 10 В.

На основі фотодетектора LDR розроблений каскадний модуль індикатора датчика на операційних підсилювачах (ОП) LT118A який доповнено іншим типом операційного підсилювача – компаратором LT1716, що використовується для точного порівняння двох напруг.

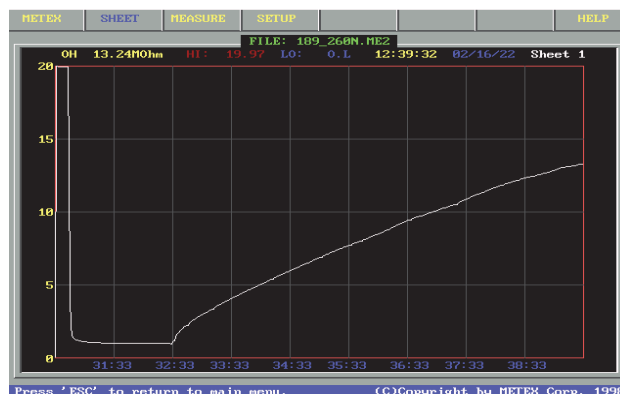


Рис. 2. Осцилограма зміни електричного опору резистора LDR при освітленні випромінюванням з довжиною хвилі 365 нм потоком $0,5$ мВ/см² (масштаби: по вертикалі- 1МОм, по горизонталі -60 с).

ОП-компаратор має три основні якості: (1) -високий вхідний опір: струм практично не надходить на входи; (2) -низький вихідний опір: вихід може працювати зі значним струмом; (3) – високий коефіцієнт посилення. Компаратор, як правило, використовується для визначення того, який із двох входів має вищу напругу [20,21]. LDR-сенсор має змінний електричний опір залежно від інтенсивності світла, і його опір зменшується зі збільшенням інтенсивності світла. Якщо виникає дисбаланс напруг, що генеруються в гілках моста Вітстона датчиком LDR, створюється різниця напруг через різницю резистивності. Напруга, що генерується на виході моста Вітстона, передається на операційні підсилювачі де посилюється. Вихідна напруга операційних підсилювачів схемою керування активує компаратор. Фоторезистор (LDR-сенсор) із оксиду цинку є надійним (не піддається деградації) і простим (підкоряється закону Ома) компонентом, опір якого зменшується при створенні носіїв заряду фотонами у його об'ємі [22]. Правда, фоторезистори менш чутливі, ніж інші подібні елементи, фотодіод і фототранзистор [23], але простіші у використанні. При заданому рівні освітлення фоторезистор працює так само, як звичайний лінійний резистор, і, таким чином, поводить себе однаково для струму незалежно від його напрямку.

Конструкція модуля та результати моделювання

2.1. Принципова електрична схема фотомодуля

Розроблене електричне коло являє собою систему із замкнутим контуром сенсорного індикаторного модуля, в ОП якої вихід чутливої параметричної функції отримується датчиком опору *LDR* з використанням схеми моста Вітстона. Сенсорний індикаторний модуль виявляє ультрафіолетове світло через *LDR*-резистор. *LDR*-резистор перетворює сигнали фотоструму на сигнали напруги через зовнішній каскад двох трансїмпедансних підсилювачів [24-26]. Трансїмпедансний підсилювач складено з типових операційних підсилювачів LT118A, під'єднаних у конфігурації інвертуючого підсилювача з негативним зворотним зв'язком. Принципова схема даного УФ-модуля, показана на рис. 3.

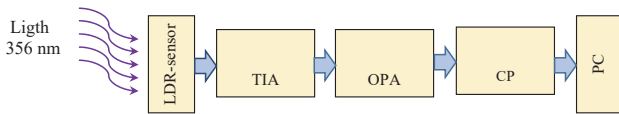


Рис. 3. Принципова електрична схема УФ-фотомодуля: *LDR-sensor* – фоторезистор оксиду цинку; *TIA* – трансїмпедансний підсилювач, *OPA* – операційний підсилювач; *CP* – компаратор; *PC* – табло реєстратора.

У даній конфігурації коефіцієнт посилення струму до напруги оцінюється опором зворотного зв'язку R_7 на низьких частотах. Цей метод використовується для забезпечення сигналу на виході датчиків опору, таких як світлозалежні датчики опору та фоторезистори тощо. Опір R_x лінійного датчика опору може бути наступним:

$$R_x = R_0(1 \pm kx), \quad (1)$$

де k – константа перетворення датчика, параметр x залежить від вимірюваної величини, а R_0 – номінальний опір сенсорного елемента ($x = 0$). Коли опір в інших частинах мосту дорівнює R_0 , вихідний сигнал мосту V_{outBr} дорівнює:

$$V_{outBr} = \varepsilon \cdot \frac{kx}{k_{Br}(1 + kx/2)}. \quad (2)$$

У рівнянні (2): ε – напруга джерела живлення мосту, а k_{Br} – константа мосту (повний міст $k_{Br}=4$, півміст $k_{Br}=2$). Рівняння (2) показує, що взагалі вихідна напруга мосту V_{outBr} буде нелінійною функцією. Оскільки відсоток зміни опору елемента досить високий ($k \cdot x \gg 1$), нелінійність є низька. Нелінійністю відносно робочого діапазону можна знехтувати, це забезпечує перевагу вимірювання на основі мосту. Через низький коефіцієнт послаблення живлення *PSRR* (*Power Supply Rejection Ratio*) дільника напруги, міст Вітстона використовується для взаємодії з датчиком *LDR*. Ця конструкція перспективна для розробки інтегрованої схеми зчитування *ROIC* (*Readout Integrated Circuit*) для резистивного детектування [27].

2.2. Методологія та архітектура конструкції

Конструкція модуля використовується для перетворення значення зміни опору датчика у значення напруги. У цій конфігурації V_{inpl} – напруга збудження, R_p , R_5 та R_8 – значення фіксованих резисторів мосту, а *LDR* елемент змінного мосту створює зміну вихідної напруги. Перший каскад підсилення – це диференціальні підсилювачі, які перетворюють вхідну напругу на струм з попереднім підсиленням. Другий каскад виконує дію оцифрування сигналу. Проектування обох каскадів складається з визначення специфікацій та умов зміщення. Функціональність операційного підсилювача, частотна характеристика розімкнутого контуру, напруга зміщення та діапазон напруг на вході *ICMR*, (*Input Common-Mode Range*) були проаналізовані на основі бажаних характеристик. Параметри кожного були розраховані на основі специфікацій операційних підсилювачів, таких як коефіцієнт посилення в розімкнутому контурі, струм, амплітуда вихідної напруги.

Схема модуля з підсилювачами напруги є типовою для фотосенсорів [28,29]. Залежно від типу детектора та його конкретних застосувань, фоторезистор є зміщений від джерела V_b . УФ-датчики у якості *LDR*, як правило, ємнісні. Дана ємність безпосередньо впливає на стабільність системи. Конденсатор зворотного

зв'язку C_f ввімкнуто паралельно до трансімпедансного резистора зворотнього зв'язку.

Для цілей моделювання у якості датчика *LDR* використано змінний ідеальний резистор опір якого змінювали від максимального значення 1 МОм до номінального значення резистивного датчика, яке становить 1 кОм. Це номінальне значення базується на реакції *LDR* від освітлення ультрафіолетовим світлом. Схема складена таким чином, щоб підвищити чутливість звичайної мостової схеми при вимірюванні поступової зміни опору резистивного датчика. Технічні характеристики даного УФ-модуля, зокрема вхідний та вихідний сигнали при освітленні густиною потужності 50 мкВ/см², показано на рис. 4. Зокрема, робочий діапазон УФ-модуля знаходиться на достатньо низькій частоті. Смуга пропускання схеми УФ-модуля в цій конструкції становила приблизно 1 кГц, що значно більше, ніж робоча частота струму – приблизно 1 Гц. Швидкість реакції *LDR*-резистора (як і типових фоторезисторів ультрафіолетового діапазону) становить порядку секунд [30]. Компаратор кінцевого каскаду (ОП LT1716) задає значення, який із двох входів дає вищу напругу. Значення компаратора було налаштовано таким чином, щоб керуючий сигнал вмикався після перевищення заданої інтенсивності ультрафіолетового світла.

Моделювання характеристик контуру двокаскадного підсилення

3.1. Використання моделювання LTSpice для УФ-модуля

Технології схем електронної промисловості часто використовують моделювання *LTSpice* для симуляції електронних кіл [31]. Використання диференціальних операційних підсилювачів у *LTSpice* відоме своєю високою точністю моделювання, простотою використання та значною розширюваністю. З оновленнями програмного забезпечення пакет *LTSpice* також пропонує такі функції, як аналіз перехідних процесів, аналіз змінного струму, аналіз шуму та *FFT*-аналіз. *LTSpice* інтегрує деякі *SPICE*-моделі схем диференціальних операційних

підсилювачів, що дозволяє безпосередньо використовувати їх для побудови схем та проведення схематичного моделювання, що робить його дуже придатним для моделювання цього типу пристроїв. Коефіцієнт зворотного зв'язку визначається співвідношенням опорів на двох гілках електричного кола. Практична схема була побудована таким чином, щоб мінімізувати вплив паразитних ємностей, які можуть суттєво впливати на вихідний шум. Програмне забезпечення *LTSpice* підтримує різноманітні типи вхідних сигналів, включаючи імпульсні сигнали, синусоїдальні сигнали, форми сигналів експоненціальної функції. *LTSpice* інтегрує різні функції аналізу моделювання, включаючи перехідні процеси, аналіз змінного струму, аналіз постійного струму та аналіз рівня шуму.

Побудована схема показана на рис. 4а, інтерфейс конфігурації параметрів моделювання показано на рис. 4б,с. На рис. 4а показано тестову схему для визначення напруги зміщення та розмаху вихідної напруги. На рис. 4б зображено фотосигнали вхідної напруги фотомодуля, пов'язані з оптичним імпульсним випромінюванням 1 Гц на довжині випромінювання 365 нм. Вертикальна вісь – це падіння напруги на змодельованому вході та виході схеми. Для отримання лінійних характеристик, подібних до характеристик оптопари, використовувано почергові кроки. Вузол V_{inpl} на вхідній стороні переміщується на вузли V_{ampf} , і в кінцевому на вузол V_{out} . Модель, представлена на рис. 4, використовується також для демонстрації базової роботи оптопари джерело освітлення – фотомодуль. На рис. 4с показано результат моделювання частотної характеристики розімкнутого контуру для двокаскадного підсилення. Коефіцієнт підсилення, отриманий з графіка першого каскаду, становить приблизно 35 дБ. З графіка двокаскадного підсилювача отриманий коефіцієнт підсилення розімкнутого контуру становить близько 75 дБ.

На основі моделювання на рис. 4с видно, що амплітуда вихідної напруги – від 0 В до 2,4 В. Номінал резистора *LDR* для моделювання калібрували з експериментальних даних для сенсора оксиду цинку (осцилограма рис. 2).

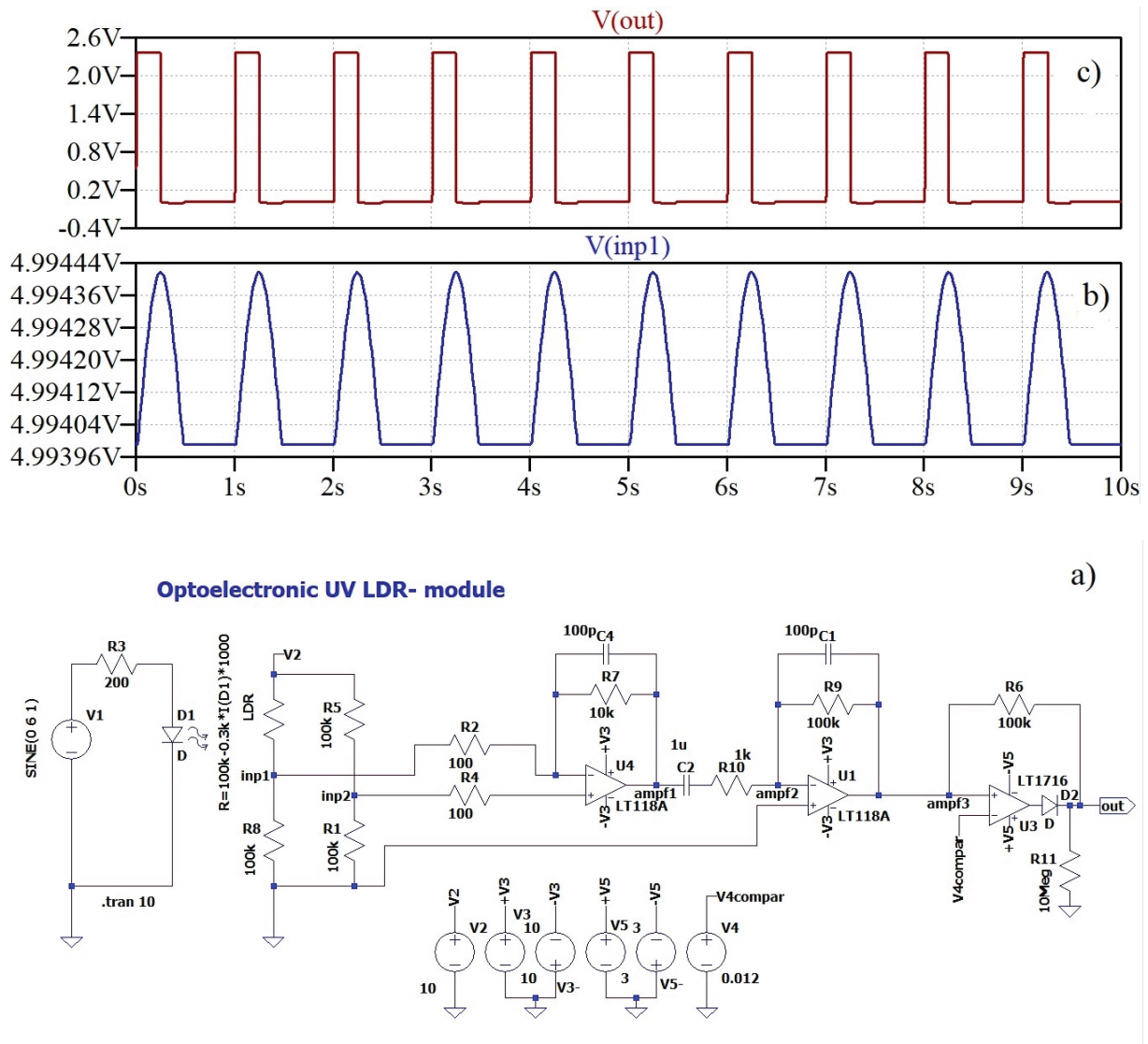


Рис. 4. Схема фоторезисторного модуля на основі тонкоплівкового оксиду цинку при симуляції освітленням LED – а); вхідний – б); вихідний – в) сигнали.

У припущенні, що заданий рівень інтенсивності УФ-випромінювання становить 50 мкВт/см^2 (10% від номінальної), то пов'язаний фотострум практично перетворюється на вихідну напругу (V_{out}), більшу за напругу ввімкнення компаратора. Більший коефіцієнт підсилення збільшує чутливість схеми. Коефіцієнт підсилення операційного підсилювача можна збільшити залежно від навантаження. Однак це впливає на стабільність роботи операційного підсилювача, і стабільного підсилення при цьому досягти проблематично. На основі цього моделювання створено файли «.asc».

3.2. Результати моделювання підсилювального каскаду

Для перевірки ефективності проекту та тестування продуктивності схеми, електричне коло керування фотомодуля піддається аналізу перехідних процесів, аналізу змінного струму та аналізу рівня вихідного шуму за допомогою *LTspice*. На складеній схемі виконано одночасно: аналіз перехідних процесів, аналіз змінного струму, аналіз постійного струму, поведінку шумів та варіацію властивостей фоторезистора. Величина трансімпедансного перетворення встановлюється значенням опору зворотного зв'язку (R_f). У всіх випадках

фоторезистор під'єднується до інвертуючого входу (in^-). Це впливає на полярність вихідного сигналу. Застосовано симетричне подвійне живлення операційного підсилювача. Малошумна опорна напруга з еталонних резисторів моста подана до неінвертуючого вузла (in^+). У разі забезпечення зміщення за допомогою неінвертуючого входу максимальна напруга, що виробляється на вхідних резисторах, залежить від умов живлення операційного підсилювача та співвідношення між величинами резистора R_{LDR} та опору зворотнього зв'язку. Динамічний діапазон виходу може бути обмежений у деяких випадках через відносно високу постійну складову на вихідному вузлі операційного підсилювача. Відповідна напруга зміщення на входах дорівнюватиме V_b , коли $R_{LDR} \gg R_p$, а операційний підсилювач працює

в динамічному діапазоні. Для роботи з короткими імпульсними сигналами слід враховувати обмеження смуги пропускання та відповідну компенсацію робочої частоти підсилювача, щоб не порушувати форму сигналу падаючого випромінювання (амплітуда, нахили). Фільтр високих частот у конфігурації напруги також може впливати на реєстрований сигнал, особливо на низьких частотах.

Аналіз перехідних процесів – Transient Analysis(.tran). Збір даних перехідних процесів встановлено на тривалість 10 секунд з початковою точкою зберігання 0 секунд та мінімальним кроком відображення 0,1 секунд. Оскільки джерело сигналу (рис. 5а) налаштовано як синусоїдальний сигнал частоти 1 Гц, період становить 1 секунда, що дозволяє відображати рівно 10 циклів. Таким чином, цей набір пара-

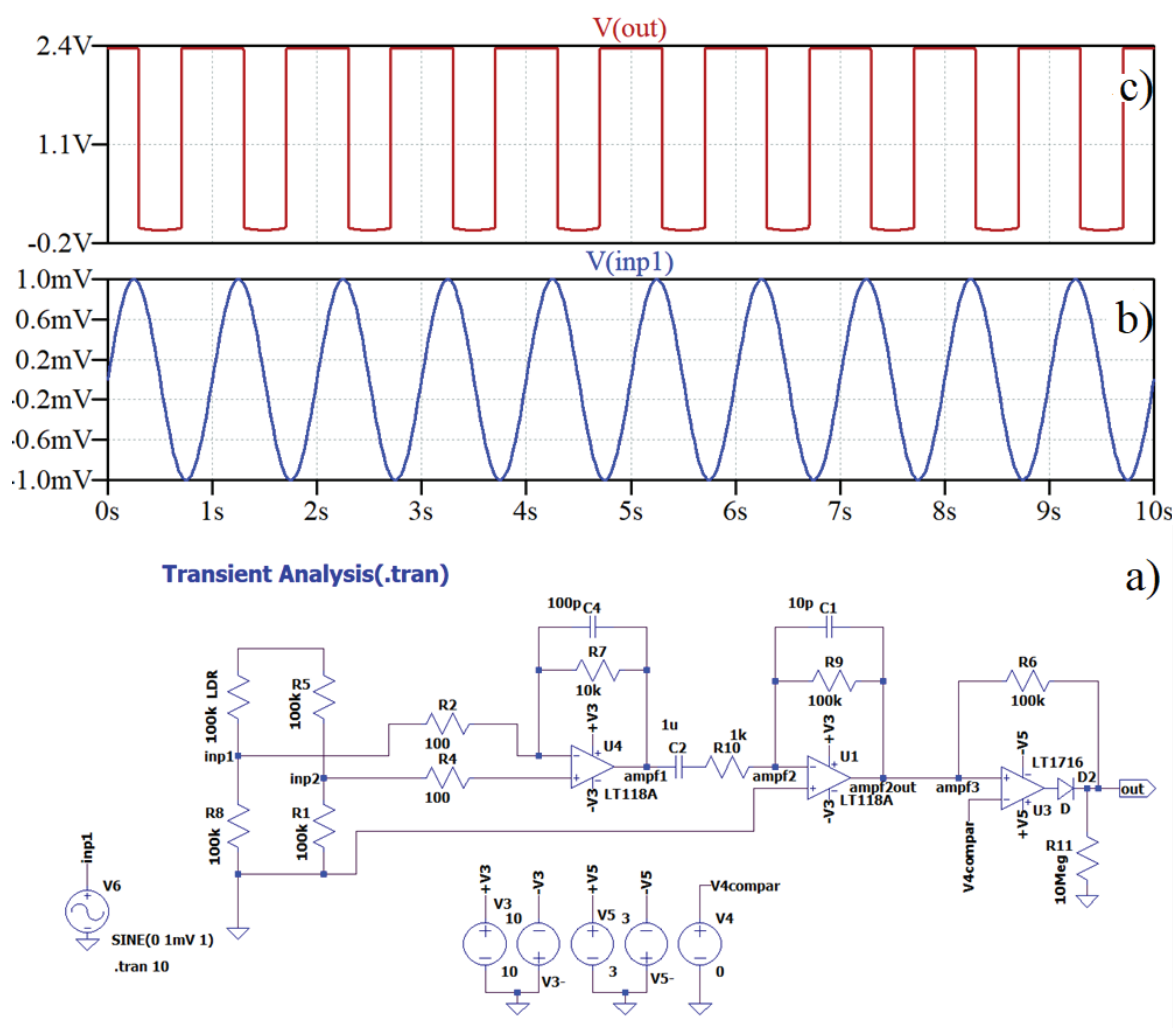


Рис. 5. Схема каскаду УФ-фотомодуля при симуляції перехідних процесів – а); вхідний – б); та вихідний – в) сигнали.

метрів моделювання повністю здатний імітувати вихід схеми фотомодуля під дією джерела сигналу частоти 1 Гц. Результати моделювання показано на рис. 5b,c. З залежностей (рис. 5b) видно, що вхід має постійне зміщення 0 В з амплітудою, яка коливається на 1 мВ відносно рівня 0 В. З рис. 5с видно, що вихід має постійне зміщення 0 В з прямокутною амплітудою, яка коливається на 2,4 В вище нуля. Результат диференціального виходу має амплітуду, що дорівнює $A_v H = 75$ дБ вхідного сигналу з вихідною синфазною напругою 2,4 В, що підтверджує ефективність схеми.

Передавальна функція постійного струму – Sweep Analysis(.dc): Передавальна функція постійного струму дає залежності підсилення струму (або напруги) у вибраних

діапазонах значень. Для схем з високим коефіцієнтом посилення потрібно визначити це значення з точністю до багатьох розрядів. На рис. 6а показано тестову схему *LTspice* для передавальної функції постійного струму з використанням стандартних номіналів резисторів. Аналіз передавальної функції *SPICE* розраховує коефіцієнт підсилення на низьких частотах та вхідний і вихідний опори кола. Для виконання аналізу передавальної функції постійного струму вказано джерело (у цьому випадку V_i) та вихід схеми (V_{out}). Щоб симулювати схему є розгортка постійного струму, для визначення значення зміщення V_i для $V_o = 1,0$ мВ. Результати тесту показано на рис. 6b,c. Якщо схема зміщена таким чином, що $V_o = V_{CC}/2 = 5$ В, ми отримуємо $V_{out} = 2,38$ В.

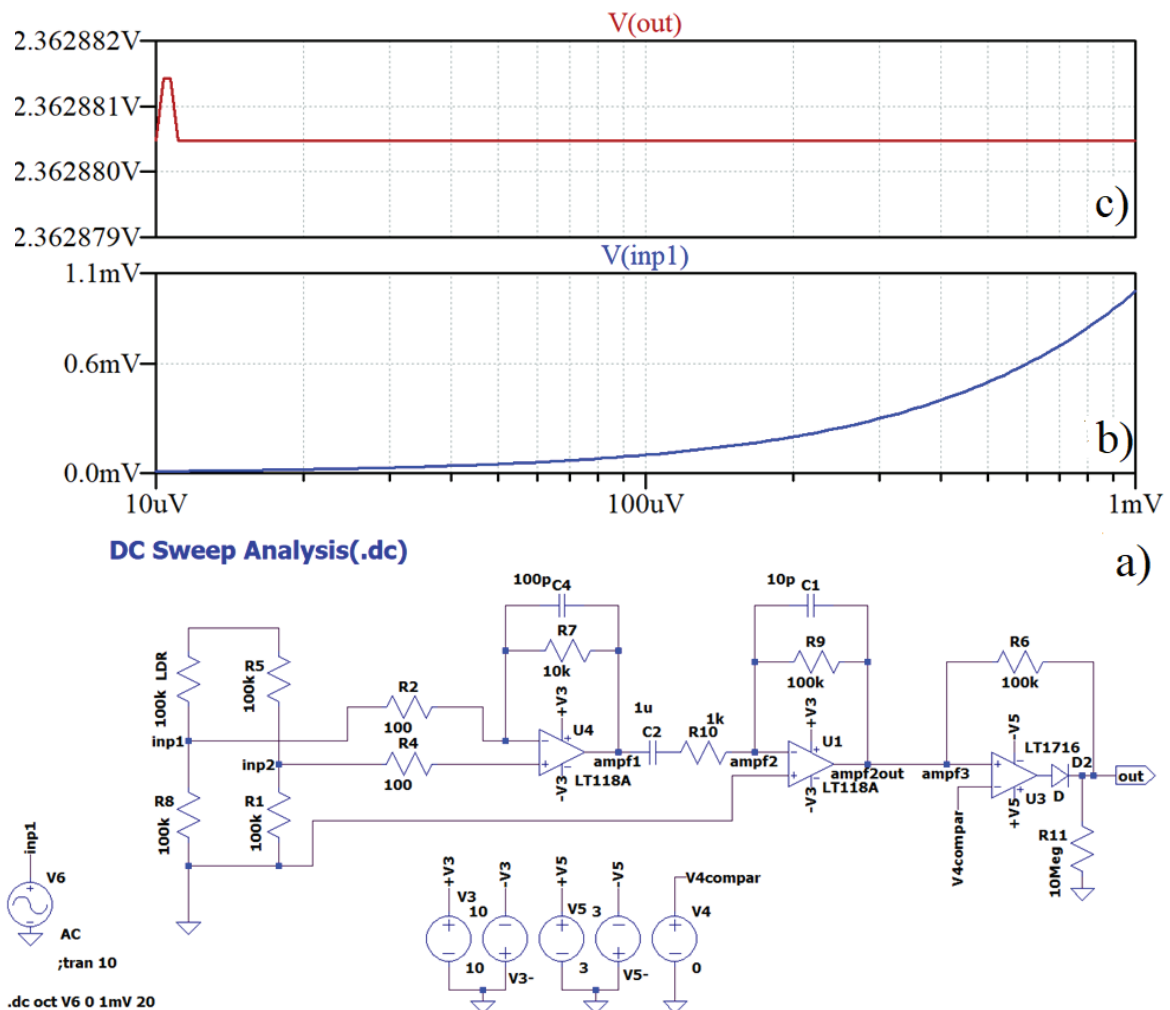


Рис. 6. Схема каскаду УФ-фотомодуля при симуляції перехідних процесів DC – а); розгортка вхідного – б); та вихідного – с) сигналів.

Аналіз змінного струму – LTspice-AC Analysis(.ac). Аналіз змінного струму стосується аналізу частотної характеристики схеми. LTspice пропонує чотири типи частот розгортки для аналізу змінного струму: декадна розгортка, октавна розгортка, лінійна розгортка та фіксовані частотні точки, що дуже зручно для аналізу схем у частотній області. На рис. 7а показано тестову схему LTspice для передавальної функції змінного струму з використанням стандартних значень компонентів. Для дослідження встановлено тип декадної розгортки зі 100 точками сканування на декаду, починаючи з частоти 10 мГц і закінчуючи 1 кГц. Результати тесту показано на рис. 7б,с. Змодельована передавальна функція змінного струму (виміряна при 1 дБ від коефіцієнта підсилення на

низькій частоті) становить 1,0 кГц, що входить у розрахункову цільову смугу пропускання 1 кГц. На залежностях коричнева лінія – результат моделювання аналізу змінного струму виходу фотомодуля. Коефіцієнт підсилення на низьких частотах 10 Гц становить 20 дБ. У режимі високого підсилення система підсилює $A_v H = 40$ дБ, тоді як смуга пропускання досягає $BWH = 1$ кГц. Таким чином, баланс підсилення та смуги пропускання може бути встановлений відповідно до застосування.

Параметричний аналіз – LTspice-Parametric Analysis(.step). Параметричний аналіз дозволяє виконувати інший тип аналізу з використанням діапазону значень компонентів (наприклад: робоча точка постійного струму, перехідні процеси, коливання). Даний аналіз

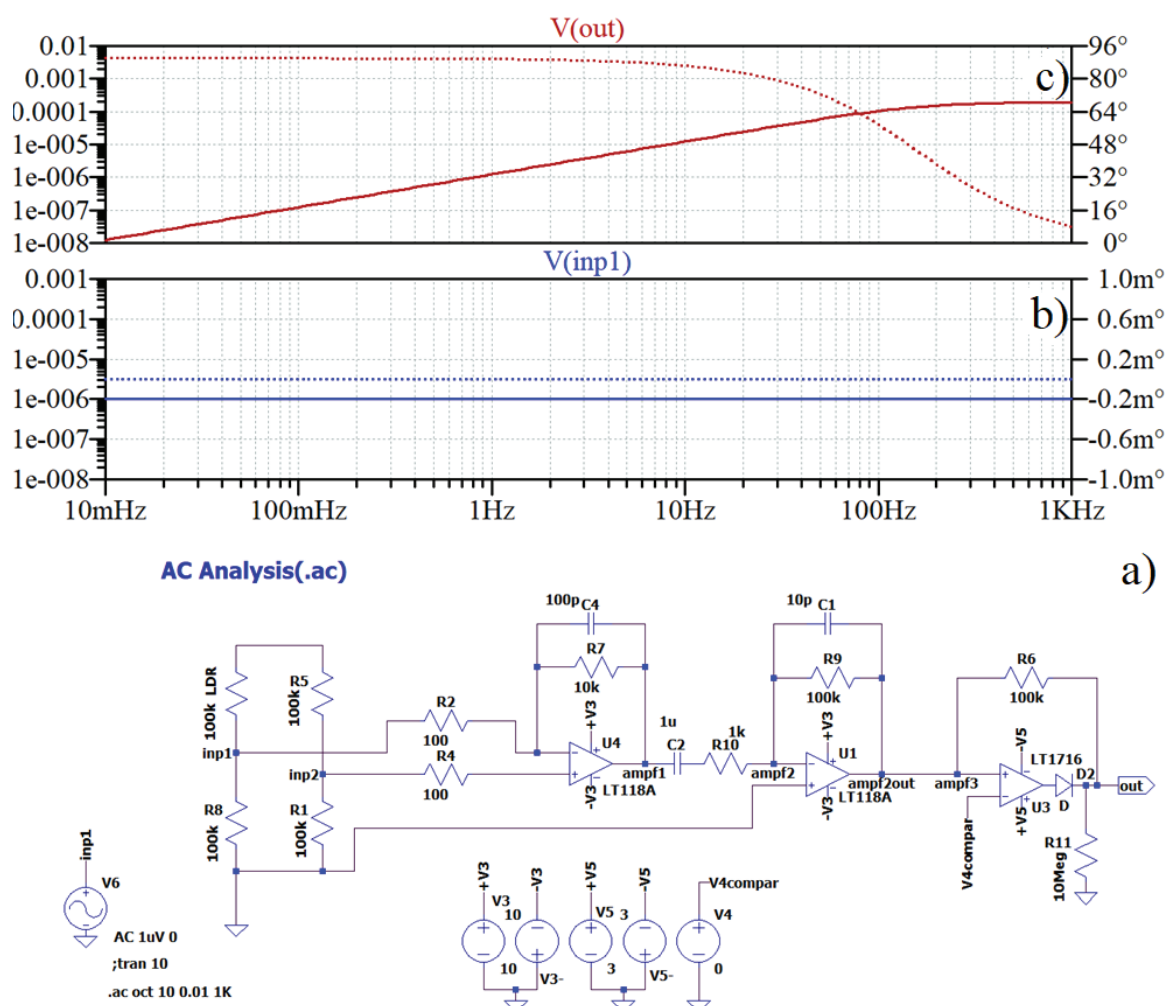


Рис. 7. Схема каскаду УФ-фотомодуля при симуляції змінного струму AC – а); частотна характеристика амплітуди вхідного – б); та вихідного – с) сигналів, (Штрихові лінії – відповідно величини їх фаз).

підходить для елементів електричного кола: резисторів, та будь-яких інших стандартних деталей (конденсаторів, індукторів). У досліджувальному колі використано аналіз при зміні характеристик фоторезистора *LDR* (рис. 8). Змінні параметри введено через налаштування «властивості резистора»— $\{R\}$ замість значення компонента (*step param R*). Варіація виконана у діапазоні 0,1 кОм до 100 кОм з кроком 10 кОм. При виконанні аналізу, а саме графічного, наприклад, аналізу підсилення гармонічного сигналу отримано графіки із серією ліній для кожного значення параметра дискретної форми. Залежності вказують розмиття сигналу при проміжному підсиленні (20%), та незначне розмиття дискретного сигналу (4%) на виході УФ-модуля. З цього випливає, що застосування

тонкоплівкового оксиду цинку у якості фоторезистора *LDR* може бути використане у досить широких межах.

Аналіз Монте-Карло – Monte Carlo Analysis(mc). Процедура Монте-Карло аналізує вплив помилок, спричинених деталями електронної схеми. Важливо виконувати аналіз Монте-Карло під час процесу проектування, оскільки не всі елементи, що використовуються, є такими ідеальними, як при симуляції схеми. Аналіз Монте – Карло виконаний одночасно з аналізом перехідних процесів, аналізом змінного струму, аналізом постійного струму тощо. Функція *mc(...)* пов'язана з генератором випадкових чисел з рівномірним розподілом між заданими межами. Для моделювання застосовано фіктивний ітератор. Ви-

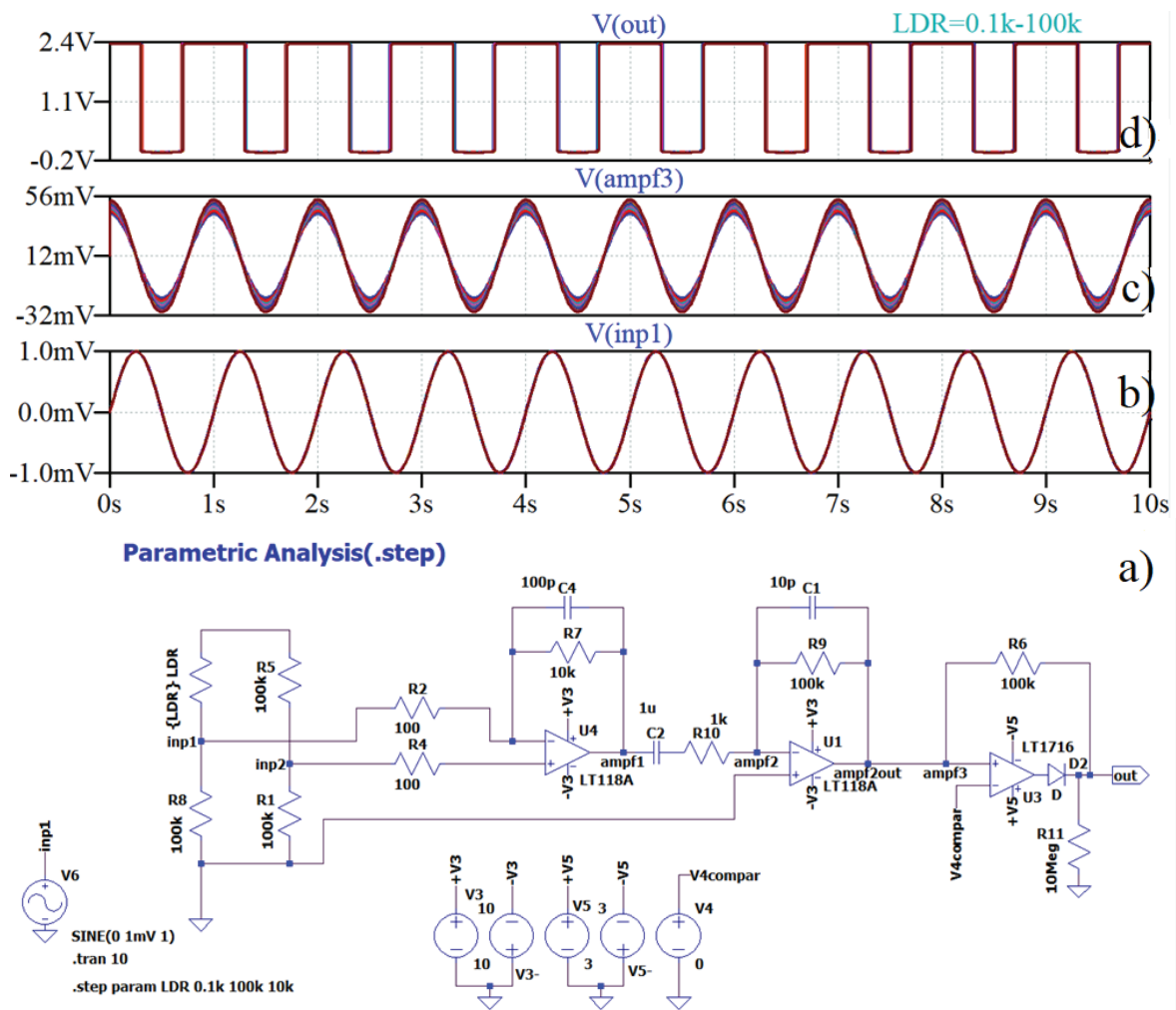


Рис. 8. Схема каскаду УФ-фотомодуля при симуляції параметричного аналізу фоторезистора *LDR* – а); вхідний – б); та вихідні – с), d) сигнали.

конання параметрів керовано функцією *.step param*. У схемі, на кожній ітерації, резистор має випадкове значення в межах встановленого діапазону, й з мінімально можливим та максимально можливим значеннями, тобто в діапазоні $[R(1-tolb), R(1+tolb)]$. У цьому аналізі активне навантаження на вході УФ-модуля змінюється навколо номінального значення з певними величинами. Як показано на рис. 9, було згенеровано та проаналізовано 10 випадкових значень вибірки з гаусовим розподілом $\pm 5\%$. Для виконання аналізу Монте-Карло введено випадкову функцію $\{mc(50k, 0,5)\}$ для значення опору 50 кОм і з похибкою 50%. Тобто значення фоторезистора LDR у режимі освітлення випадково змінювалися у діапазоні $25 \div 75$ кОм. Вихідний дискретний сигнал

УФ-модуля зазнавав незначного $\Delta V/V < 1\%$ розмиття.

Аналіз шуму – LTspice-Noise Analysis(noise). Враховуючи шум у конкретних електричних схемах, необхідно надати деяку інформацію про існуючі джерела. У таких пристроях, зокрема на резисторах моста є еквівалентні джерела шуму вхідної напруги (V_n) та еквівалентні джерела шуму вхідного струму на обох входах (i_n^- та i_n^+). Вплив цих джерел може залежати від номіналів резисторів, що існують у колі, включаючи опір або імпеданс джерела сигналу (фоторезистора). Крім того, кожен резистор також є джерелом теплового шуму ($4kTR$). Трансімпедансні підсилювачі можуть мати ширшу смугу пропускання з шумовими характеристиками, нижчими або

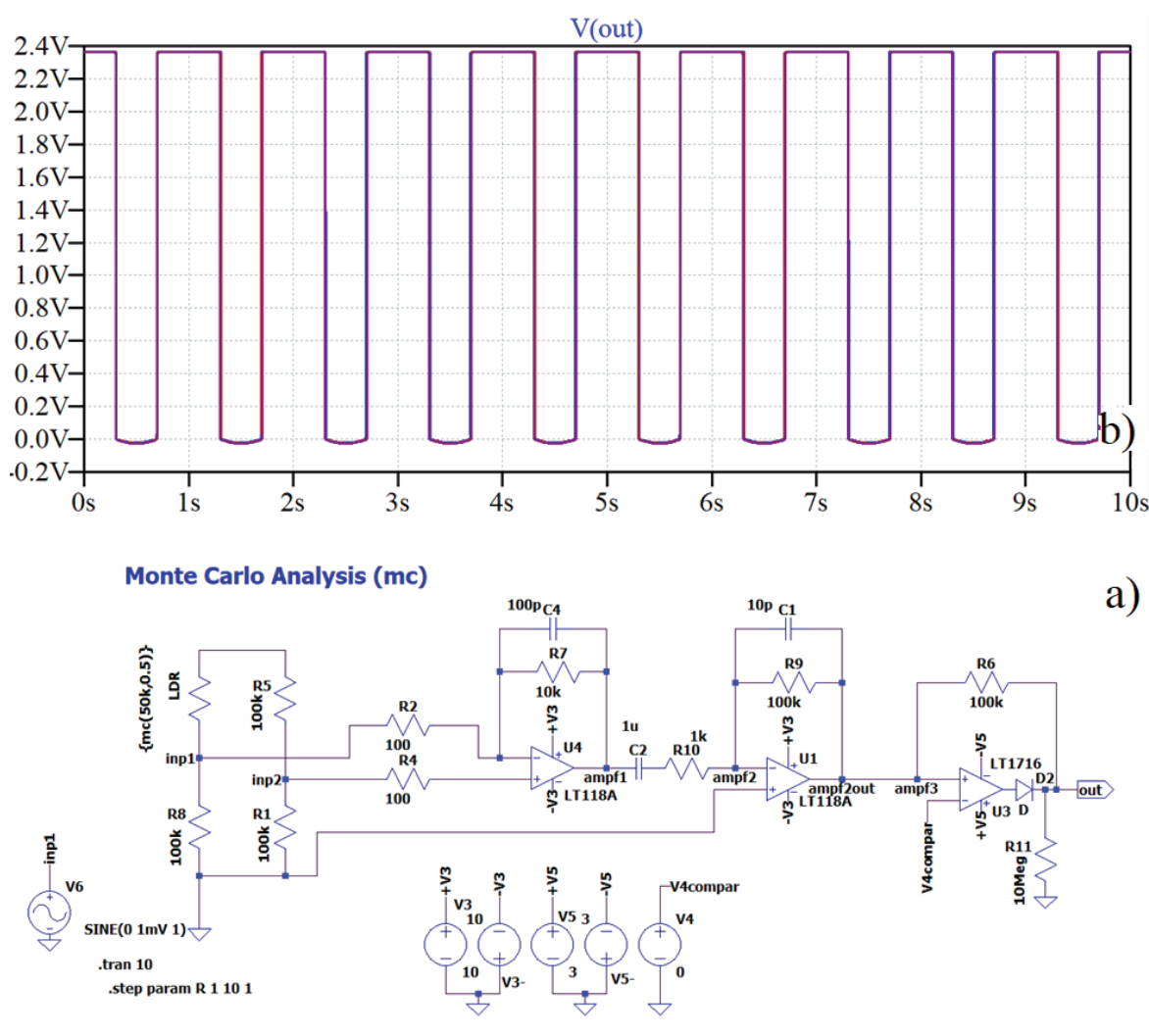


Рис. 9. Схема фоторезисторного УФ-модуля при аналізі Монте-Карло параметра фоторезистора LDR – а); вихідний сигнал – б).

порівнянними з підсилювачами напруги з високим входним імпедансом. На рис. 10а представлено схему аналізу еквівалентного шуму УФ-модуля.

Спектральні характеристики вольтового шуму характеризували у діапазоні частот $10^{-2} \div 10^3$ Гц. Величина густини шумової потужності S_U на виході УФ-модуля має мінімум

$S_U = 1,0 \cdot 10^{-14} \text{ В}^2 \cdot \text{с}$ на частоті 0,1 Гц і майже не залежить від освітлення. На робочій частоті УФ-модуля 1 Гц величина S_U дещо зростає $S_U = 1,5 \cdot 10^{-13} \text{ В}^2 \cdot \text{с}$, що спричинене напевно особливостями схеми. Слід зазначити, що теоретичний рівень теплового шуму $4kTR$ для резистора номіналом $R = 100 \text{ кОм}$ при кімнатній температурі знаходиться біля значення $S_U = 1,5 \cdot 10^{-13} \text{ В}^2 \cdot \text{с}$.

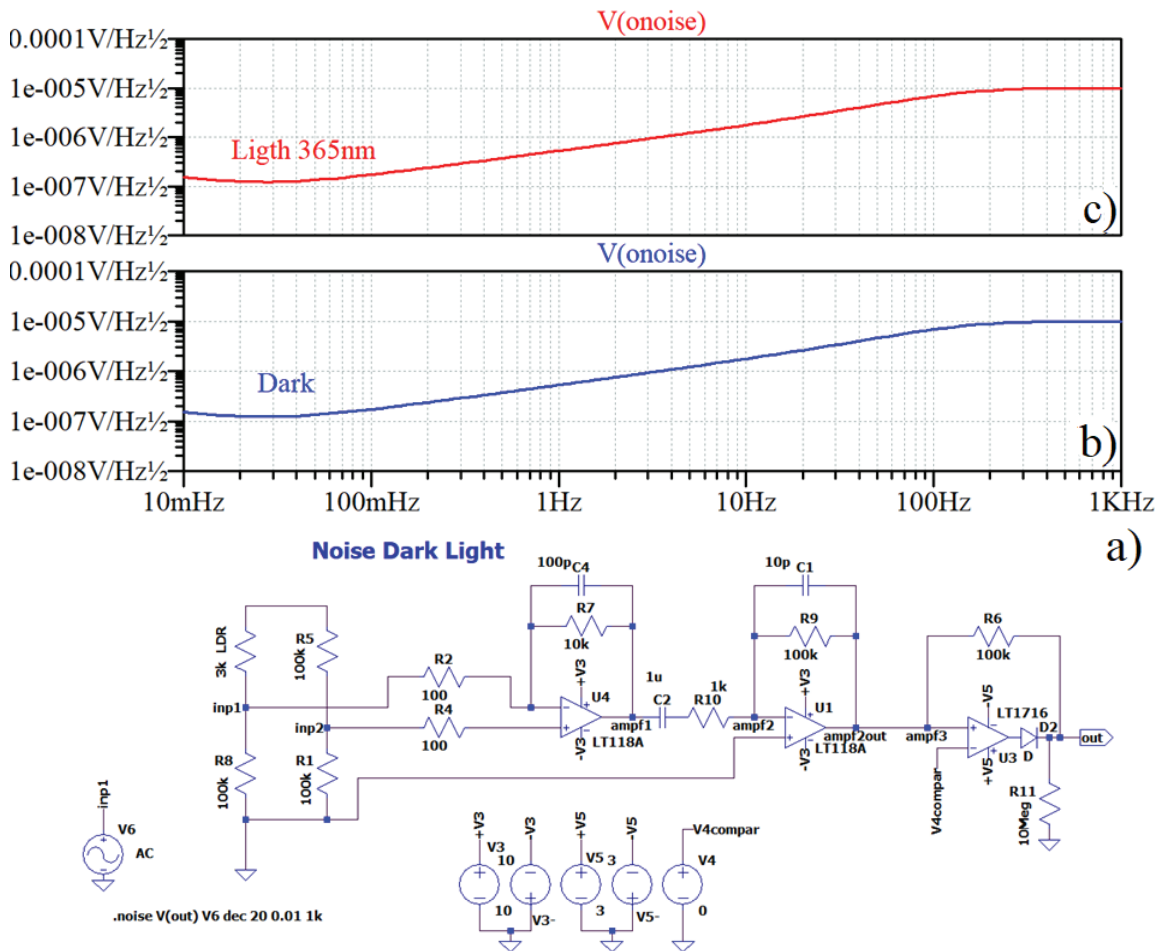


Рис. 10. Схема УФ-модуля при аналізі шумових характеристик – а); спектр темного шуму – б); спектр шуму при освітленні фоторезистора LDR – с).

3.3. Аналіз результатів моделювання УФ-модуля

У представленій схемі можна досягти задовільної лінійності параметрів для змін потужності падаючого випромінювання в діапазоні від мкВт до кількох мВт. Лінійність обмежена в нижній частині значенням параметра NEP якій характеризує фотодетектори, а у верхній – опором навантаження та напругою

живлення. Дані є результатами моделювання для звичайної схеми з повним мостом. Показано, що вищий коефіцієнт підсилення операційного підсилювача збільшує чутливість схеми для створення значної вихідної напруги сигналу. Для отримання достатнього коефіцієнта підсилення, необхідно використовувати резистори зворотнього зв'язку бажано високого номіналу R_f . Поряд зі збільшенням входного

опору каскаду, його тепловий струмовий шум зменшується. Параметри електричної схеми фотомодуля проведені за допомогою розрахунків на основі *Spice* співпадають між окремими алгоритмами моделювання. З результатів моделювання (V_{out} від характеристик тонкоплівкового фотодетектора) визначено чутливість схеми. Використовуючи даний симулятор, отримано $5,5 \cdot 10^{-7}$ В/√Гц і $6,5 \cdot 10^{-7}$ В/√Гц для коефіцієнта каскадного підсилення (перетворення) сигналу величин: 0 (у темноті) і $5 \cdot 10^4$ В/А (при освітленні УФ) відповідно. Часова роздільна здатність залежить від рівня шуму вихідного сигналу передпідсилювача, який головним чином залежить від базової лінії передпідсилювача та шуму послідовних каскадів.

Відношення сигнал/шум *Signal-to-Noise Ratio (SNR)* для частотної смуги 1 кГц (оцінюючи з часових та частотних характеристик на рис. 4 і рис. 10) при освітленні ультрафіолетом 365 нм становить приблизно 92 dB. Фоточутливість фоторезистивної структури визначається величиною фотоструму у мостовій схемі сенсора і досягає на вході підсилювальних каскадів 10^4 А/Вт. Фотострум витоку моста у підсилювальних каскадах трансформується у сигнал напруги і на виході фотомодуля досягає фоточутливості $5 \cdot 10^4$ В/Вт. Ці результати показують, що спроектований УФ-фотомодуль з цифровим виходом має досить високу чутливість та оптимальну здатність детектувати ультрафіолетове випромінювання.

Висновки

Проведено детальний інформаційний огляд щодо топологій *TIA*, розроблених для застосувань *LiDAR*, і відповідно було розроблено топологію фотомодуля *INV-TIA* шляхом випробування. Топологія *TIA* досягає покращеного балансу коефіцієнта посилення та смуги пропускання, покращуючи продуктивність фотоприймального пристрою. Розроблено та протестовано модуль УФ-датчика на основі оксиду цинку, що складається з інтегрованого *LDR*-резистора. Для детектування УФ-випромінювання сигнали фотоструму від УФ-світла були перетворені на сигнали напруги.

Інтегрована схема зчитування була розроблена з використанням моста Вітстона при застосуванні технології плівкового метал-оксидного фоторезистора. Крім того, було запропоновано двохступеневий каскад на основі диференціального *TIA* та основного операційного підсилювача для роботи детектора випромінювання. Вихідну потужність сигналу можна збільшити, використовуючи кілька каскадів. Дана схема продемонструвала хорошу продуктивність, особливо з точки зору споживання енергії та шуму. Під час проектування та тестування використовувалися інструменти моделювання *SPICE*. Отримані результати показують, що чутливість запропонованої схеми покращується від варіації темного опору фоторезистора. Це пов'язано з модифікацією мосту Вітстона шляхом використання підбору компонент. Покращення чутливості дозволяє інтегрувати будь-які резистивні датчики для отримання значної імпульсної вихідної напруги.

Чутливість в УФ-діапазоні була покращена завдяки:

- використанню тонкого шару плівки оксиду цинку,
- використанню та узгодженню кількох каскадів підсилення,
- балансуванню співвідношення резисторів у окремому каскаді для зниження шуму.

При освітленні довжиною хвилі 365 нм, відповідно за напруги зміщення 5 В, була отримана чутливість фотомодуля $5 \cdot 10^4$ В/Вт. Запропонована топологія має значну перевагу з максимальним коефіцієнтом посилення та смугою пропускання для детекторів ультрафіолетового діапазону; ці параметри досягають 92 dB та 1 кГц відповідно, при споживанні енергії 250 мкВт.

Розроблений пристрій може бути цінним для виробників *LDR*-резисторів на ультрафіолетову область спектру. Отримані результати можуть бути використані для вибору правильного підходу до проектування схем фотомодулів для конкретних застосувань та вимог детектування. На основі даного дослідження можна випробувати нові методи та за потреби покращити продуктивність фоторезистивних детекторів.

Список використаної літератури

- [1] X. Tang, X. Liu, C. Zhao, K. Niu, Z. Li, H. Li, B. Li, J. Wang High-temperature ultraviolet photodetector and amplifying integrated circuits based on AlGaIn/GaN heterostructure// Journal of Physics D: Applied Physics, 58(8), p.1-6 (2025).
- [2] Y. Zou, Y. Zhang, Y. Hu, and H. Gu Ultra-violet Detectors Based on Wide Bandgap Semiconductor Nanowire: A Review//Sensors, 18(2072), p.1-25 (2018).
- [3] A. Rogalski, Z. Bielecki, J. Mikołajczyk and J. Wojtas Ultraviolet Photodetectors: From Photocathodes to Low-Dimensional Solids// Sensors, 23(4452), p. 1-66 (2023).
- [4] S. Xu, J. Luo, H. Song, J. Tang Recent advances in monolithic integrated lead based optoelectronic devices//Frontiers of Optoelectronics, 18(13), p.1-15 (2025).
- [5] D. Renker, E. Lorenz Advances in solid state photon detectors//Journal of Instrumentation, 4(4), p. 1-54 (2009).
- [6] W. Ouyang, J. Chen, Z. Shi, X. Fang Self-powered UV photodetectors based on ZnO nanomaterials//Appl. Phys. Rev., 8(3), 031315 (2021).
- [7] R. Jalal, K. Ozel, A. Atilgan, A. Yildiz UV photodetectors based on W-doped ZnO thin films//Nanotechnology, 35(26), p.1-11 (2024).
- [8] Y. Al-Handarish, O. M. Omisore, T. Igbe, S. Han, H. Li, W. Du, J. Zhang, L. Wang A Survey of Tactile-Sensing Systems and Their Applications in Biomedical Engineering//Advances in Materials Science and Engineering, 2020(ID 4047937), p.1-17 (2020).
- [9] J. H. Chuah, D. Holburn Design of Low-Noise High-Gain CMOS Transimpedance Amplifier for Intelligent Sensing of Secondary Electrons//IEEE Sensors Journal, 15(10), p. 5997-6004 (2015).
- [10] Z. Li, J. Cheng, F. Liu, Q. Wang, W.-W. Wen, G. Huang, Z. Wu Research on the Technological Progress of CZT Array//Detectors Sensors, 24(725), p.1-42 (2024).
- [11] B. Ge, Y. Li, H. Yu, S. Yong, J. Shen, D. Xi, Q. Xie An ultra-low power 10-bit 40 MS/s Successive-Approximation-Register (SAR) Analog-to-Digital Converter (ADC) for single photon SiPM detector in X-ray applications//Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 1072(170214), p.1-6 (2025).
- [12] Y. Zhou, W. Zhang, T. Wu, W. Chen, S. Du, D. Hao High-precision vernier-type optoelectronic integrated chip design//Microelectronics Journal, 153(106400), p.1-11 (2024).
- [13] S. Shajari, K. Kuruvinashetti, A. Komeili, U. Sundararaj, Review The Emergence of AI-Based Wearable Sensors for Digital Health Technology: A Review// Sensors, 23(9498). p.1-36 (2023).
- [14] P. S. Girão, P. M. P. Ramos, O. Postolache, J. M. D. Pereira Tactile sensors for robotic applications//Measurement, 46(3), p 1257-1271, (2013).
- [15] P. Weiss The Global Positioning System (GPS): Creating Satellite Beacons in Space, Engineers Transformed Daily Life on Earth//Engineering, 7(3), p. 290–303 (2021).
- [16] Y. Boukdir, H. E. Omari Novel high precision low-cost dual axis sun tracker based on three light sensors//Heliyon, 8(12), p.1-11 (2022).
- [17] T. Zhou, J. Zhao, Y. He, B. Jiang, Y. Su A Readout Integrated Circuit (ROIC) employing self-adaptive background current compensation technique for Infrared Focal Plane Array (IRFPA)//Infrared Physics & Technology, 90(5), p. 122-132 (2018).
- [18] M. Choi, M. Lee, B. Lee, Y. T. Lee Multistage opto-neuromorphic process system based on commercial optoelectronic devices//Current Applied Physics, 20(10), p. 1125–1129, (2020).
- [19] S. Meti, K. B. Balavald, B. G. Sheeparmatti MEMS Piezoresistive Pressure Sensor: A Survey//Int. Journal of Engineering Research and Applications, 6(4), pp. 23-31 (2016).
- [20] P. Jinka, R. Tirumala Design of XOR-NMOS switch based kickback noise reduction technique for dynamic comparators//e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, 7(100416), p.1-7 (2024).
- [21] J. Gao, X. Yang, X. Shi, Z. Gao, K. Nie, J. Xu Two ramp reference voltages CDS

- scheme applied to low noise and high dynamic range PWM pixel//Microelectronics Journal, 135(105744), p.1-8 (2023).
- [22] R. Borgohain, S. Baruah Design and analysis of UV detector using ZnO nanorods on interdigitated electrodes//ADBU Journal of Engineering Technology, 4(1), p. 134-136 (2016).
- [23] Y.-C. Chiu, P.S. Yeh, T.-H. Wang, T.-C. Chou, C.-Y. Wu, J.-J. Zhang An Ultraviolet Sensor and Indicator Module Based on p-i-n Photodiodes//Sensors, 19(4938), p. 1-8 (2019).
- [24] H. Andrade, A. Maharry, T. Hirokawa, L. Valenzuela Analysis and monolithic implementation of differential transimpedance amplifier//Journal of Lightwave Technology, 38(16), p. 4409–4418 (2020).
- [25] J. Qin, Z. Yan, M. Huo, X. Ji, and K. Peng Design of low-noise photodetector with a bandwidth of 130 MHz based on transimpedance amplification circuit//Chinese Optics Letters, 14(12), pp. 1-8 (2016).
- [26] S. Park, S. Lee, B. Seo, D. Jung, S. Choi, S.-M. Park A Low-Noise CMOS Transimpedance-Limiting Amplifier for Dynamic Range Extension//Micromachines, 16(2), 153, p. 1-15 (2025).
- [27] K. Achtenberg, Z. Bieleck Comparative Analysis of the Selected Photoreceiver Input Stages in Terms of Noise//Sensors, 25(1359), p. 2-19 (2025).
- [28] B. Moeneclaey, J. Verbrugghe, J. Lambrecht, E. Mentovich, P. Bakopoulos, J. Bauwelinck Design and experimental verification of a transimpedance amplifier for 64-gb/s pam-4 optical links//J. Light. Technol. 36(2), p. 195–203 (2018).
- [29] H.-J. Kim, D.-Y. Lee, M.-J. Park Development and validation of a 64-channel ROIC prototype for SWIR line scan sensor applications//Integration, 98(102226), p.1-8 (2024).
- [30] Y. Nie, S. Jiao, S. Yang, J. Jing, S. Zhang, Z. Shi, H. Lu, D. Wang, S. Gao, X. Wang, Y. Zhang, Z. Fu, A. Li, J. Wang The excellent performance of β -Ga₂O₃ Schottky photodiode under forward bias and its application in solar-blind ultraviolet communication//Materials Today Physics, 33 (101032), p.1-10 (2023).
- [31] E. Süleyman, M. Atasoyu 45-nm CMOS Inverter Transimpedance Amplifier for LiDAR Applications//Journal of Brilliant Engineering, 3(4915), p.1-8 (2024).

Стаття надійшла до редакції 21.09.2025 р.

PACS 07.07.Df, 42.70.Qs

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2025.4.339704>

DEVELOPMENT AND MODELING OF A UV-PHOTORESISTANT MODULE BASED ON THIN-FILM ZINC OXIDE

I. S. Virt, I. V. Padalka

Drohobych Ivan Franko State Pedagogical University,
Faculty of Physics, Mathematics, Economics and Innovative Technologies,
24 Ivana Franka St, Drohobych, 82100, Ukraine,
e-mail: isvirt@dspu.edu.ua, ivan.padalka@dspu.edu.ua

Abstract. Article describes the photoelectric properties of the simulated forming and amplifying cascades in a photodetector that detects ultraviolet radiation. A module containing a monolithic sensor indicator device based on a basic zinc oxide photoresistor and a transimpedance amplifier (TIA) has been created. Based on the results obtained, a simple radiation detector with a two-stage differential amplifier was proposed and tested. At a bias voltage of 4 V, the sensitivity of the photomodule was obtained at $5 \cdot 10^4$ V/W. The noise of the cascades in the dark current modes and under illumination with a standard industrial LED was compared and the signal bandwidth was analyzed.

Keywords: radiation detection, photoresistor, UV-sensors, transimpedance amplifier, zinc oxide

PACS: 07.07.Df, 42.79.Ls, 85.60.Dw

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2025.4.343569>

ОПТИЧНИЙ ЗОНД ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ ОДНОРІДНОСТІ ФОТОЧУТЛИВОСТІ ДЕТЕКТОРІВ В ІЧ ДІАПАЗОНІ

О. Г. Голенков, <https://orcid.org/0000-0001-8009-7161>

А. В. Шевчик-Шекера, <https://orcid.org/0000-0002-4708-8535>

В. В. Забудський, <https://orcid.org/0000-0003-2033-8730>

І. О. Лисюк, <https://orcid.org/0000-0003-0369-5883>

З. Ф. Цибрій, <https://orcid.org/0000-0003-1718-5569>

А. С. Станіславський,

С. В. Корінець,

А. Ю. Шекера

Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України,
просп. Науки, 41, м. Київ, 03028, Україна, +38 (044)525 40 20,

e-mail: golenkov@isp.kiev.ua, shevchik-shekera@isp.kiev.ua, zv1968@yahoo.com, lysiuk@isp.kiev.ua,
tsybrii@isp.kiev.ua, anstan1939@gmail.com, vsekori@yahoo.com, andrii.shekera@isp.kiev.ua

Анотація. Запропоновано конструкцію оптичного зонда для вимірювання параметрів детекторів інфрачервоного діапазону, таких як, ефективна фоточутлива площа, однорідність фоточутливості по поверхні та коефіцієнт фотоелектричного зв'язку. Експериментально та теоретично оцінено діаметр плями оптичного зонда та проведено випробування оптичного зонда на прикладі визначення однорідності фоточутливості по поверхні InSb фотодіоду на довжині хвилі 4,3 мкм.

Ключові слова: оптичний зонд, інфрачервоний діапазон, ефективна фоточутлива площа, однорідність фоточутливості, коефіцієнт фотоелектричного зв'язку

ВСТУП

Незважаючи на тривалий період інтенсивних досліджень інфрачервоні (ІЧ) технології продовжують бути предметом вивчення для розширення сфери їх застосування в обороні та безпеці, контролі промислових процесів, моніторингу навколишнього середовища, дослідженні космосу, медицині та науці [1, 2]. Висока чутливість ІЧ-детекторів до теплового випромінювання забезпечує ефективне дистанційне виявлення, отримання зображень та класифікацію об'єктів в умовах обмеженої видимості у видимому діапазоні, зокрема через дим, туман чи в суцільній темряві, коли традиційні оптичні системи неефективні. А з впровадженням для обробки даних алгоритмів нейронних мереж значення систем на основі ІЧ-технологій лише зростає – від дистанційного неруйнівного контролю та діагностики до

автономного управління та виявлення загроз автоматизованими системами розпізнавання, що задіють, наприклад, в пошуково-рятувальних операціях з застосуванням безпілотних літальних апаратів [3].

Досягнення в галузі матеріалознавства, мікроелектроніки та обробки сигналів забезпечили можливість розроблення нових поколінь ІЧ-детекторів і матриць фокальних площин, які пропонують вищу просторову роздільну здатність, підвищену чутливість, розширений спектральний діапазон та швидке зчитування. Зокрема, стрімкий прогрес у створенні матриць для середнього та далекого ІЧ-діапазонів на основі таких матеріалів, як HgCdTe, InSb, InAs/GaSb, та технологій мікроболометрів, лежить в основі зростання як цивільного так і спеціалізованого ринків тепловізійних засобів та спектроскопії. Водночас, інноваційні рішення

ня сприяють мініатюризації розмірів пікселів, зменшенню споживання енергії пристрою в цілому та створенню мультиспектральних приладів, а також, стимулюють подальші дослідження в архітектурі та інженерії фоточутливих гетероструктур та проектуванні вдосконалених схем зчитування [4].

Зазвичай, окрім геометричних розмірів та робочих режимів роботи, ІЧ-детектори характеризуються за допомогою наступних параметрів: 1) фоточутливість, 2) питома виявляювальна здатність або потужність еквівалентна шуму, 3) спектральна характеристика чутливості. Проте важливим є, також, встановлення однорідності фоточутливості по поверхні зразка, визначення ефективної фоточутливої площі, а для багатоелементних приймачів ще і коефіцієнта фотоелектричного зв'язку, тобто вплив опромінення окремого фоточутливого елемента на його "сусідів", особливо при мінімізації розмірів пікселів [5-7]. Коефіцієнт фотоелектричного зв'язку впливає на якість зображення матричних приймачів випромінювання, а разом з ефективною фоточутливою площею визначає просторову роздільну здатність.

Метою даної роботи було розроблення конструкції та виготовлення прототипу оптичного зонда ІЧ діапазону для застосувань по визначенню ефективної фоточутливої площі та неоднорідності чутливості по поверхні детектора, коефіцієнту фотоелектричного зв'язку між сусідніми приймачами, а також тестування його функціональності на експериментальному зразку *InSb* фотодіоду. Запропонований оптичний зонд буде входити в загальний вимірювальний комплекс для визначення електричних та фотоелектричних параметрів одноелементних та багатоелементних ІЧ-детекторів.

ЗАГАЛЬНА КОНСТРУКЦІЯ ПРИСТРОЮ З ОПТИЧНИМ ЗОНДОМ У СКЛАДІ

Загальну схему експерименту з оптичним зондом наведено на рис. 1. Пристрій складається з оптичного зонда, оптичного кріостату, в якому змонтовано досліджуваний фотоприймальний модуль, трьохкоординатної системи прецизійного позиціювання, системи реєстрації, персонального комп'ютера з програмним забезпеченням.

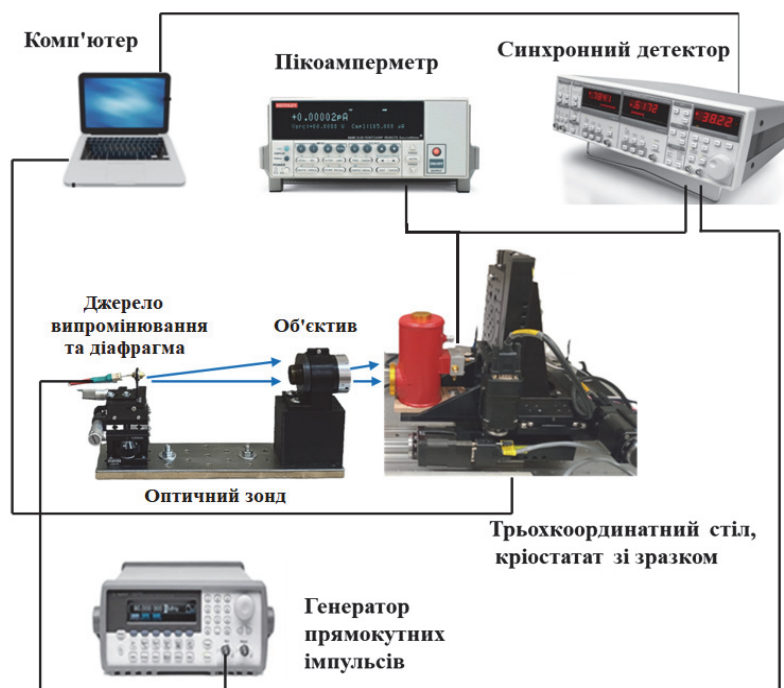


Рис. 1. Схема пристрою для визначення ефективної фоточутливої площі детектора, неоднорідності чутливості по площі детектора та коефіцієнта фотоелектричного зв'язку багатоелементних приймачів ІЧ випромінювання.

Генератор прямокутних імпульсів задає робочий режим джерела випромінювання та імпульс синхронізації для синхронного детектора. В експериментах з *InSb* фотодіодом частота модуляції складала 1250 Гц. Пікоамперметр з функцією джерела напруги використовувався для контролю вольт-амперних характеристик приймача випромінювання і вибору оптимальної робочої точки. Реєстрація фотоструму здійснювалась синхронним детектором.

Схему оптичного зонда наведено на рис. 2. Оптичний зонд включає наступні елементи: рефлекторний об'єктив, змінні діафрагми, змінні джерела випромінювання, фотоприймальний пристрій в кріостаті, що тестується.

До розмірів плями оптичного зонда в фокусі висуваються наступні вимоги, в залежності від параметру, що визначається. При вимірюванні ефективної фоточутливої площі та коефіцієнта фотоелектричного зв'язку максимальний розмір плями оптичного зонда на поверхні фоточутливого елементу, в межах якого сфокусовано не менш 90% падаючого випромінювання не повинен перевищувати величину ефективної фоточутливої площі. При вимірюванні неоднорідності чутливості по площі – не більше 0,2 розміру фоточутливого елементу, вздовж якого буде оцінюватись нерівномірність чутливості. Розподіл опромінення в плямі має бути центральносиметрич-

ним. Значення напруги (струму) фотосигналу при повному влучанні плями оптичного зонда на фоточутливу площу повинно бути більше в 100 разів, ніж напруга (струм) шуму і знаходитись в межах динамічного діапазону фотоприймального пристрою.

Нижче подано короткий опис об'єктива, джерел випромінювання та діафрагм, які були використані для даної роботи, або планується задіяти в майбутньому.

Об'єктив Ealing Beck 15x Reflecting Objective (по каталогу "Edmund Optics" – модель 15X/0.28NA Objective #66-576) – рефлекторний об'єктив, який складається з двох асферичних дзеркал, має 15-кратне збільшення, числову апертуру – 0,28, задню фокусну відстань – 160 мм та робочу відстань – 24,5 мм. Об'єктив оптимізований для спектрального діапазону 0,2 – 11 мкм, ступінь блокування випромінювання центральною частиною (obscuration) 18,9%, діаметр маленького дзеркала 7,3 мм. Світло від джерела випромінювання проходить крізь отвір у великому дзеркалі, падає на маленьке дзеркало, яке відбиває випромінювання, і фокусує його на приймальному пристрої. Згідно зі специфікацією, конструкція об'єктива забезпечує високу роздільну здатність, близьку до дифракційного обмеження, та компактні розміри.

Варіанти джерел випромінювання перелічені в таблиці 1, а параметри діафрагм в таблиці 2.

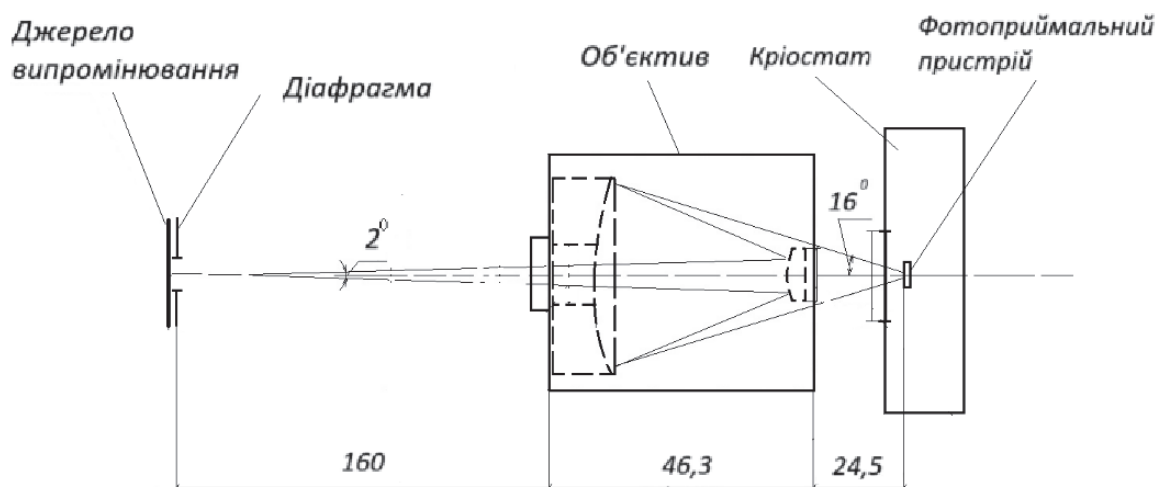


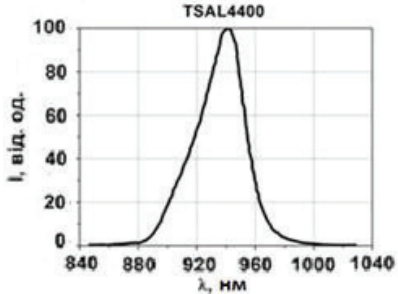
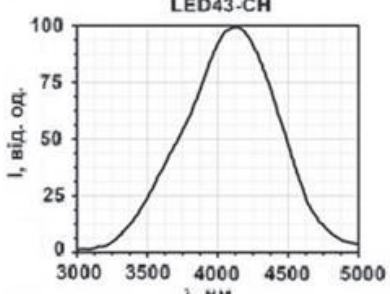
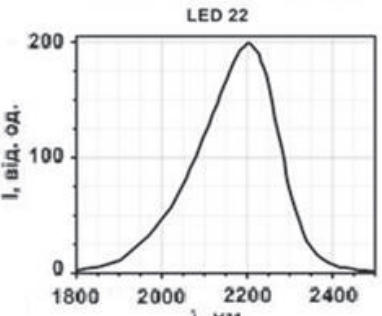
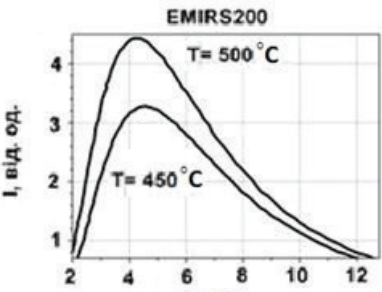
Рис. 2. Схема взаємодії оптичного зонда з приймачем випромінювання.

Для інтеграції джерел випромінювання в вимірну систему важливо знати частоту модуляції випромінювання f_m , потужність випромінювання P_0 , номінальні режими роботи

(струм I_0 та напруга U_0), а також довжину хвилі в максимумі випромінювання λ_{max} та спектр їх випромінювання.

Таблиця 1

Основні параметри джерел випромінювання

Джерело	f_m , Гц	P_0 , мВт	λ_{max} , нм	Спектр випромінювання
TSAL4400 "Vishay Semicond."	DC – 10^7	~ 7 $I_0 = 20$ мА	0,94	
LED43-CH "Roithner Laser Technic"	$500 - 2,5 \times 10^5$	$\sim 0,1$ $I_0 = 200$ мА	4,2	
LED 22 "Roithner Laser Technic"	$500 - 2,5 \times 10^5$	~ 1 $I_0 = 200$ мА	2,2	
EMIRS200_ AT01T_ BR080 "Axetris"	4 – 15	~ 35 (500 °C) $U_0 \sim 5$ В	4,2	
S1300-5MG "Roithner Laser Tch."	DC – $3,5 \times 10^8$	~ 5 $I_0 = 20$ мА	1,31	Лазерний діод, $\lambda_{max} = 1310 \pm 3$ нм

Таблиця 2

Перелік використовуваних діафрагм.

Назва	Опис
P10	Зовнішній діаметр 12,7 мм, діаметр отвору 10 мкм
P20	Зовнішній діаметр 12,7 мм, діаметр отвору 20 мкм
P75	Зовнішній діаметр 12,7 мм, діаметр отвору 75 мкм,
P130	Зовнішній діаметр 12,7 мм, діаметр отвору 130 мкм
P2000	Зовнішній діаметр 12,7 мм, діаметр отвору 2000 мкм

Випромінювачі мають наступні призначення.

Джерело TSAL4400 разом з CCD камерою використовується для юстування оптичної системи, визначення і контролю оптичних параметрів (фокусних відстаней) зонда, візуалізації та експериментальної оцінки розмірів плями оптичного зонда на довжині хвилі 0,94 мкм і для наступного розрахунку розмірів цієї плями при використанні джерел випромінювання з іншими довжинами хвиль.

Джерело LED43-CH використовується для безпосередніх вимірювань неоднорідності чутливості, ефективної чутливої площі та коефіцієнта фотоелектричного зв'язку на довжині хвилі 4,3 мкм. Джерело EMIRS200 використовується для тих же вимірювань чутливої площі та коефіцієнта взаємозв'язку, але для випромінювання близького до випромінювання чорного тіла в спектральному діапазоні 2-12 мкм (див. табл. 3 зі спектрами джерел випромінювання). Це може мати вплив на результати вимірювань, тому що глибина поглинання та, відповідно, генерація-рекомбінація фотозбуджених носіїв заряду залежить від довжини хвилі випромінювання. До джерела можна, також, застосувати оптичні фільтри та відокремити необхідний діапазон від широкого спектру EMIRS200 і проводити вимірювання саме в тому спектральному діапазоні, який відповідає конкретному типу фотоприймачів, наприклад для довгохвильових фотодіодів на основі HgCdTe.

Особливістю джерела LED 22 є приблизно в 2 рази менша довжина хвилі і більша величина оптичної потужності в порівнянні

з LED43-CH, що дає можливість зменшити пляму оптичного зонда (за рахунок вдвічі меншого дифракційного розмиття) та збільшити інтенсивність випромінювання. Джерело S1300-5MG має швидкий час включення і виключення оптичного потоку ($t \sim 0.7$ нс), що дає можливість вимірювати час життя нерівноважних носіїв заряду (для таких вимірювань він має суттєво перевищувати час t). Крім того, воно має більшу потужність випромінювання і призначене для потенційного використання з приймачами, що мають максимум спектральної чутливості в ближньому ІЧ-діапазоні.

В залежності від використаного джерела випромінювання та розміру діафрагми можна розрахувати розмір оптичної плями зонда. Для оцінки сумарного розміру світлової плями, коли одночасно впливають і геометричні (зменшення об'єктиву 1/15), і дифракційні фактори (диск Ейрі) використовується формула (1) [8]:

$$d_{total} = \sqrt{d_{geom}^2 + d_{diff}^2}, \quad (1)$$

$$d_{geom} = \frac{D_{dia}}{M}, \quad (2)$$

$$d_{diff} = 1.22 \cdot \frac{\lambda}{NA}, \quad (3)$$

де d_{total} – теоретичний розмір світлової плями в просторі зображення для ідеального об'єктива, D_{dia} – розмір діафрагми, d_{diff} – розмір плями Ейрі, $M = 15$ – збільшення об'єктива, λ – довжина хвилі випромінювача, NA – числова апертура об'єктива.

З результатів розрахунку, показаних в таблиці 3, випливає, що для середнього

Таблиця 3

**Розмір оптичної плями зонда в залежності
від використаного джерела випромінювання та розміру діафрагми**

Діафрагма D_{dia} , мкм	Без дифракції	Довжина хвилі випромінювання λ , мкм									
		0,94	1,3	2,2	2,8	3,4	3,8	4,3	8	9	10
		Діаметр плями оптичного зонда в фокусі d_{total} , мкм									
130	8,7	9,6	10,4	12,9	15,0	17,2	18,7	20,6	35,9	40,2	44,4
75	5	6,5	7,6	10,8	13,2	15,6	17,3	19,4	35,2	39,5	43,9
20	1,3	4,3	5,8	9,7	12,3	14,9	16,6	18,8	34,9	39,2	43,6
10	0,7	4,1	5,7	9,6	12,2	14,8	16,6	18,7	34,9	39,2	43,6

($\lambda = 4.3$ мкм) і, особливо, далекого ($\lambda = 10$ мкм) ІЧ-діапазону визначальний фактор формування розміру оптичної плями зонда в фокусі – є дифракційне обмеження (розмір плями Ейрі).

На довжині хвилі 0.94 мкм розмір оптичної плями був визначений експериментально. Ця операція проводилась при початковому юстуванні оптичного зонда. В експерименті використовувався випромінювач TSAL4400, діафрагма розміром 130 мкм та CCD камера яка розташовувалась в площині зображення і чутлива в видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах світла, має роздільну здатність 2592×1944 та розмір пікселя 2.2 мкм $\times$ 2.2 мкм.

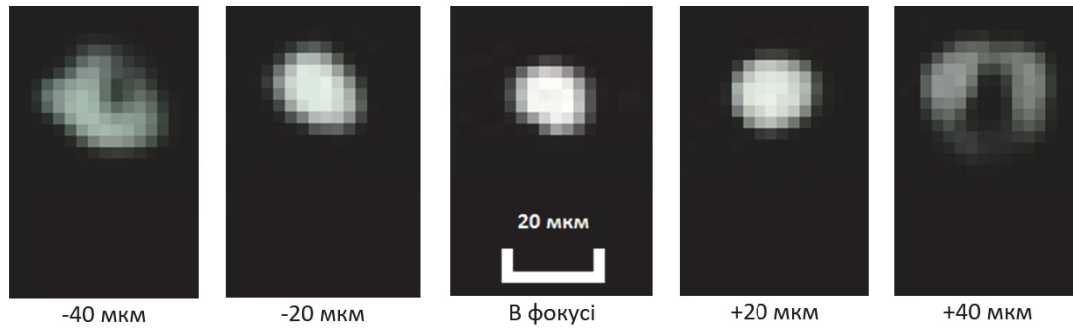
Всі компоненти оптичного зонда розміщувались на оптичній рейці згідно зі схемою наведеною на рис. 2. За допомогою програми Micro Capture Ver6.9.3 фіксувалось зображення оптичної плями в фокусі (рис. 3,а). Оскільки об'єкти та обрана оптична схема зонда розраховані на зменшення зображення діафрагми в площині зображення порівняно з площиною об'єкту в 15 разів та враховуючи дифракційне обмеження (вважаємо, що геометричне зображення та дифракційне розмиття підсумовуються як незалежні розмиття, за гаусівською апроксимацією) маємо отримати діаметр плями оптичного зонда ~ 9.6 мкм (таблиця 3). Для побудови профілю розподілу інтенсивності випромінювання та отримання значення діаметра плями оптичного зонда використовувалась програма Tour View. Ця програма призначена для роботи з цифровими камерами і

USB-мікроскопами деяких серій. Зняті CCD камерою зображення трансформувались до потрібного формату і по заданих напрямках формувались профілі розподілу інтенсивності випромінювання. Отримані цифрові дані експортувались у програму Microsoft Excel, де і будувались графіки, показані на рис. 3. З графіків випливає, що діаметр плями оптичного зонда (по рівню 0.5 від максимального сигналу, FWHM) дорівнює 14,7; 13,3; 13; 13; 13,8 мкм для положень -20 мкм, -10 мкм, 0 мкм, 10 мкм, 20 мкм, відповідно. На відстані ± 40 мкм від фокуса спостерігаємо порушення гаусівської форми плями оптичного зонда, що свідчить про важливість фокусування з точністю не гіршою ніж ± 20 мкм.

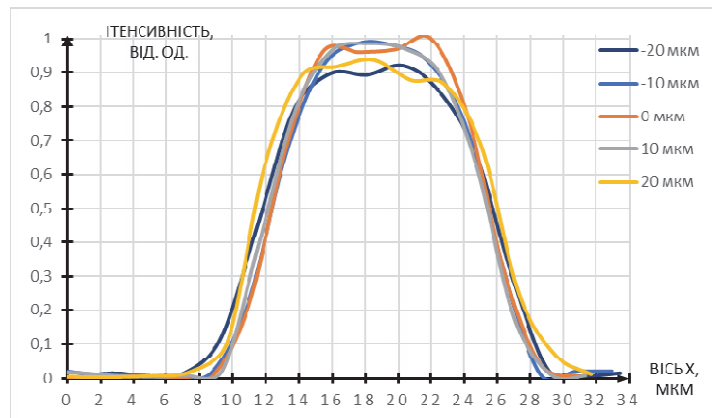
Експериментально визначений діаметр плями є більшим, ніж теоретично розрахований (13 мкм проти 9.6 мкм) що потребує подальшого вивчення. При більших довжинах хвиль, коли визначальним є вплив дифракційного розмиття, різниця між теоретичним та експериментальним значенням діаметра плями буде меншою.

РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ НЕОДНОРІДНОСТІ ФОТОЧУТЛИВОСТІ

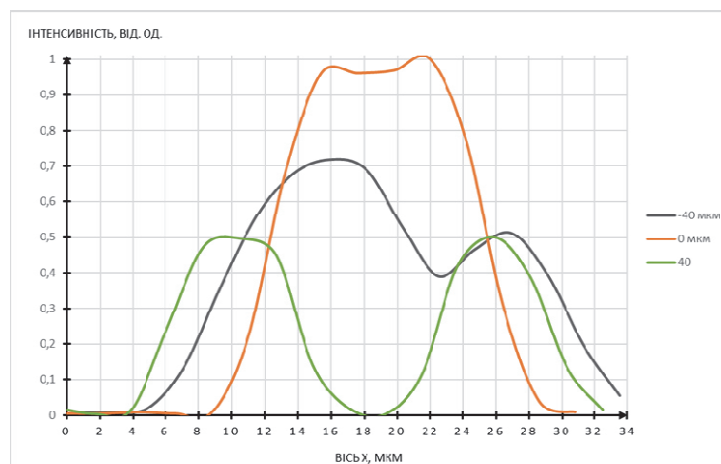
Неоднорідність фоточутливості вимірювалась на прикладі фотодіода InSb, розробленого та виготовленого в ІФН ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ [9]. Виміряне значення добутку диференційного опору на топологічну площу діода



а



б



в

Рис. 3. Фото (а) та розподіл інтенсивності випромінювання оптичного зонда в площині зображення (б, в). Довжина хвилі 0,94 мкм, діафрагма 130 мкм. Розмір пікселя камери 2,2 мкм. Графіки та фото наведені як для зображення в фокусі, так і на відстані ± 20 мкм та ± 40 мкм від нього.

$R_0 A_0$ виготовлених фотодіодів перевищувало $12 \text{ кОм} \cdot \text{см}^2$ при температурі 77K та знаходиться на рівні комерційно доступних фотодіодів *InSb*, вироблених компаніями «Teledyne Judson Technologies LLC» та «Hamamatsu Photonics K. K.». Топологічна площа діода $40 \times 230 \text{ мкм}^2$.

За допомогою оптичного зонда можливо експериментально визначити фактичну фото-

чутливу площу і порівняти її з проєктною, а крім того – виміряти неоднорідність чутливості по площі діода. На рис. 4 представлено експериментально отримане зображення розподілу фоточутливості при скануванні оптичним зондом на довжині хвилі 4,3 мкм по поверхні *InSb* фотодіода. Крок сканування 10 мкм. Розрахунковий діаметр оптичного зонда (табл. 3)

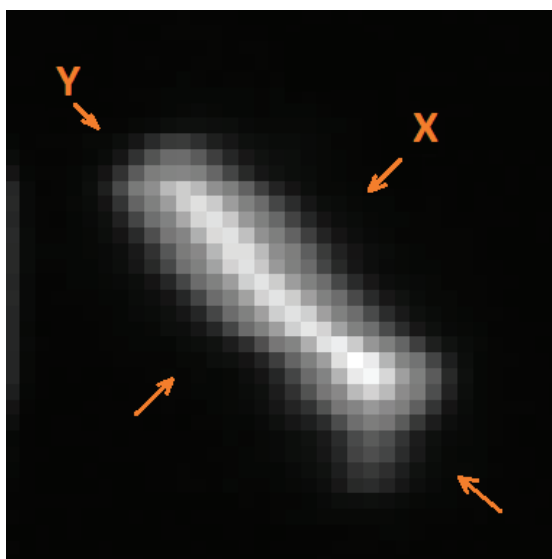


Рис. 4. Зображення розподілу фоточутливості при скануванні оптичним зондом на довжині хвилі 4,3 мкм по поверхні *InSb* фотодіода. Фотострум в максимумі 74 пА, відношення сигнал/шум >350. Крок сканування 10 мкм.

дорівнював ~21 мкм. На рис. 5. показані розподіли фоточутливості *InSb* фотодіода при скануванні оптичним зондом вздовж *X* (а) та *Y* (б) координати.

Неоднорідність фоточутливості δS у напрямку *Y* (рис. 5,б) дорівнювала 0,18 та розраховувалась за формулою

$$\delta S = (U_{\text{макс}} - U_{\text{мін}}) / U_{\text{ср}}, \quad (4)$$

де $U_{\text{макс}}$, $U_{\text{мін}}$, $U_{\text{ср}}$ – максимальне, мінімальне і середнє значення фотоструму відповідно вздовж топологічного розміру *Y* (рис. 5,б).

Ефективна фоточутлива площа $A_{\text{ефф}}$ визначається за формулою:

$$A_{\text{ефф}} = |X_2 - X_1| \cdot |Y_2 - Y_1|, \quad (5)$$

де X_2 , X_1 , Y_2 , Y_1 – границі чутливості фотодіода по рівню 0,5 від максимального значення вздовж напрямків *X* та *Y* відповідно. В наших експериментах $X_2 = 30$ мкм, $X_1 = -30$ мкм (рис. 5,а), $Y_2 = 120$ мкм, $Y_1 = -130$ мкм (рис. 5,б), тобто ефективна площа $A_{\text{ефф}} = 60 \times 250$ мкм². Якщо порівняти з проектними розмірами 40×230 мкм² фотодіода, то з'ясовується, що кожна границя зміщена на +10 мкм. Проте точність визначення границі чутливості визначається як діаметром плями оптичного зонда, так і кроком сканування. В нашому випадку крок сканування 10 мкм за великий по відношенню до топологічного розміру 40 мкм в напрямку *X*, і потребує істотного зменшення. В напрямку *Y* точність визначення розміру діода <9%. Зменшення кроку сканування передбачає збільшення часу на вимірювання. Мінімальний крок сканування, який дозволяє зробити наша система дорівнює 1 мкм.

ВИСНОВКИ

Розроблено оптичний зонд для визначення таких параметрів інфрачервоних детекторів як ефективна фоточутлива площа та однорідність фоточутливості по площі. Запропонована оптична схема забезпечує можливість роботи в широкому спектральному діапазоні (0,2–11 мкм) та адаптацію під різні типи

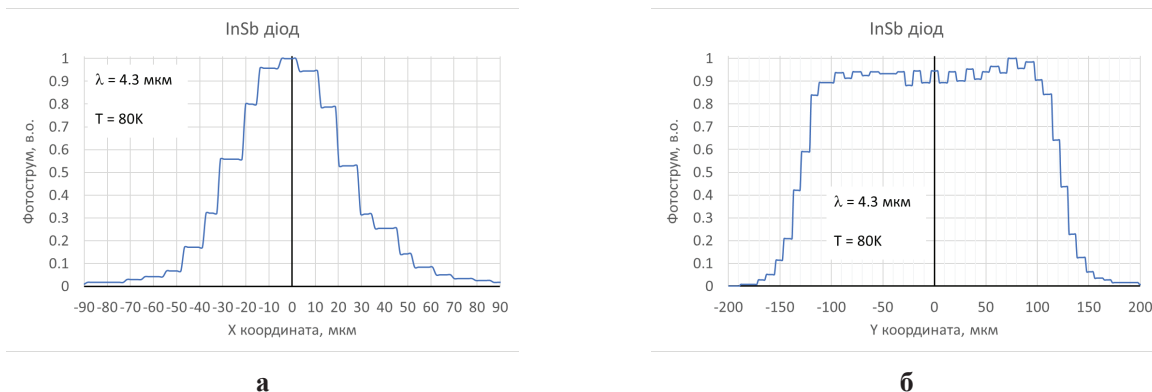


Рис. 5. Розподіл фоточутливості *InSb* фотодіода при скануванні оптичним зондом вздовж *X* (а) та *Y* (б) координати. Топологічні розміри діода 40×230 мкм². Діаметр плями оптичного зонда в фокусі <25 мкм.

фотоприймальних матеріалів (InSb, HgCdTe тощо). Експериментально визначене значення діаметра плями оптичного зонда на довжині хвилі 0,94 мкм (~13 мкм) добре узгоджується з розрахунковим (~9,6 мкм) з урахуванням неідеальності фокусування об'єктива. В середньому та далекому ІЧ-діапазонах ($\lambda = 3\text{--}5$ мкм, 8-12 мкм) визначальним фактором, що формує діаметр плями стає дифракційне обмеження. Запропонована методика дозволяє кількісно оцінювати просторову однорідність фоточутливості ІЧ-детекторів. На прикладі фотодіода InSb (40×230 мкм²) продемонстровано можливість візуалізації розподілу фоточутливості з просторовою роздільною здатністю 20–25 мкм і співвідношенням сигнал/шум понад 350. Розроблений зонд може бути використаний не лише для визначення фоточутливої площі та однорідності по ній фоточутливості, а й для вимірювань коефіцієнта фотоелектричного зв'язку між елементами багатоелементних ІЧ-матриць, що є важливим для подальшої оптимізації архітектури фокальних багатоелементних приймальних пристроїв. Отримані результати підтверджують дієвість створеного приладу, який може бути використаний у наукових дослідженнях і метрологічному забезпеченні розроблення та тестування ІЧ-фотодіодів і матричних приймачів у середньому та далекому інфрачервоному діапазоні.

ПОДЯКА

Створення прототипу приладу для визначення коефіцієнта фотоелектричного зв'язку та однорідності чутливості ІЧ фотодіодів, а також результати, опубліковані в статті, були підтримані Національним Фондом досліджень України в 2025 р., проєкт № 2025.06/0089.

Список використаної літератури

[1]. Rogalski A. *Infrared and Terahertz Detectors*, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2019. 1066 p.

[2]. Muhammad Imran Saleem, Aung Ko Ko Kyaw, Jaehyun Hu. *Infrared Photodetectors: Recent Advances and Challenges Toward Innovation for Image Sensing Applications. Advanced Optical Materials*. 2024. Vol. 12, 2401625. <https://doi.org/10.1002/adom.202401625>

[3]. Hutsul T., Khobzei M., Tkach V. et al. Review of approaches to the use of unmanned aerial vehicles, remote sensing and geographic information systems in humanitarian demining: Ukrainian case. *Heliyon*. 2024, 10, e29142. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29142>

[4]. Xiang Yu, Yun Ji, Xinyi Shen and Xiaoyun Le. Progress in Advanced Infrared Optoelectronic Sensors. *Nanomaterials*. 2024. Vol. 14, no.10, 845. <https://doi.org/10.3390/nano14100845>

[5]. Musca C. A., Dell J. M., Faraone L., Bajaj J., Pepper T., Spariosu K., Bruce, C. Analysis of crosstalk in HgCdTe p-on-n heterojunction photovoltaic infrared sensing arrays. *Journal of Electronic Materials*. 1999. Vol. 28, no. 6. P. 617–623. <https://doi.org/10.1007/s11664-999-0044-8>

[6]. Karp L., Musca C. A., Dell J. M., Faraone L. Characterisation of crosstalk in HgCdTe n-on-p photovoltaic infrared arrays. *Proceedings of the SPIE*. 2004, Vol. 5274. P. 183-193. <https://doi.org/10.1117/12.522217>

[7]. Yinghui S., Bo, Z., Meifang, Y., Qingjun, L., Yan, Z., Xin, W., Ning, D. Crosstalk of HgCdTe LWIR n-on-p diode arrays. *J. Semicond*. 2009. Vol. 30, no. 9, 094007. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/30/9/094007>

[8]. Bryan L. Olmstead et al, *Spectra-Physics Scanning Systems*, 2000. Method and apparatus for reading images without need for self-generated illumination source. US Patent 6042012.

[9]. Sapon S. V., Boltovets M. S., Kulbachynskyi O. A., Zabudsky V. V., Golenkov O. G., Korotyeyev V. V., Efremov A. A. Properties of InSb photodiodes fabricated by ion implantation. *SPQEO*. 2024, V. 27, no 3. P. 356-365. <https://doi.org/10.15407/spqeo27.03>

Стаття надійшла до редакції 15.11.2025 р.

PACS: 07.07.Df, 42.79.Ls, 85.60.Dw

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2025.4.343569>

OPTICAL PROBE FOR DETERMINING THE PHOTOSENSITIVITY SURFACE UNIFORMITY OF DETECTORS IN THE IR RANGE

*O. G. Golenkov, A. V. Shevchik-Shekera, V. V. Zabudsky, I. O. Lysiuk, Z. F. Tsybrii,
A. S. Stanislavskyi, S. V. Korinets, A. Yu. Shekera*

V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of the NAS of Ukraine,
41 Nauky Ave, Kyiv, 03680, Ukraine, +38 (044)525 40 20,

e-mail: golenkov@isp.kiev.ua, shevchik-shekera@isp.kiev.ua, zv1968@yahoo.com, lysiuk@isp.kiev.ua,
tsybrii@isp.kiev.ua, anstan1939@gmail.com, vsekori@yahoo.com, andrii.shekera@isp.kiev.ua

Abstract. The design of the optical probe is proposed for measuring the parameters of infrared detectors, such as the effective photosensitive area, the uniformity of photosensitivity over the surface, and the photoelectric coupling coefficient. The spot diameter of the optical probe is experimentally and theoretically estimated, and the optical probe is tested for determining the uniformity of photosensitivity over the surface of an InSb photodiode at a wavelength of 4.3 μm .

Keywords: optical probe, infrared range, effective photosensitive area, photosensitivity uniformity, photoelectric crosstalk coefficient

PACS: 61.46.+w , 42.25.Bs, 07.07.Df

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2025.4.347718>

ЛЮМІНЕСЦЕНТНИЙ СЕНСОР НА ОСНОВІ КОЛОЇДНИХ НАНОКРИСТАЛІВ ОКСИДУ ЦИНКУ

С. Ф. Гусейнова, К. Є. Берков

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,
вул. Змієнка Всеволода, 2, м. Одеса, 65082, Україна
e-mail: huseynova@stud.onu.edu.ua

Анотація. Проведено дослідження впливу іонів важких металів на довгохвильову люмінесценцію колоїдних нанокристалів оксиду цинку. Показано, що додавання іонів кадмію призводить до зростання інтенсивності червоно-жовтої люмінесценції, а свинцю – блакитної. Запропонований механізм роботи сенсора, який пов'язаний з перерозподілом концентрації власних дефектів, що визначають довгохвильову люмінесценцію оксиду цинку.

Ключові слова: нанокристали ZnO, колоїдний синтез, фотолюмінесценція, люмінесцентний сенсор

ВСТУП

Наноструктури на основі оксиду цинку отримали широке практичне застосування в світлодіодах, сонячних батареях, системах біомедичної візуалізації та антибактеріальної обробки.

За останнє десятиріччя намітився суттєвий прогрес в створенні хімічних, газових та люмінесцентних сенсорів на основі оксиду цинку [1,2]. Через інтенсивні бойові дії на території України збільшилася доля забруднення сполуками кадмію та свинцю, що входять до складу акумуляторів та боєприпасів. Дані сполуки мають шкідливий вплив на організм людини і навколишнє середовище. Тому зараз потрібна розробка дешевих та масових сенсорів. Такими сенсорами є люмінесцентні сенсори на основі оксиду цинку. Спроба створити такий сенсор зроблена в цій роботі.

Для подолання труднощів, пов'язаних з реалізацією випромінювання, що не залежить від розміру наночастинок в якості контрольного взято довгохвильове випромінювання ZnO, спектральне розташування якого не залежить від розмірів наночастинок.

Метою даної роботи є визначення чутливості довгохвильової люмінесценції колоїдних нанокристалів ZnO до сполук кадмію і свинцю, розчинених у воді.

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Досліджено фотолюмінесцентну чутливість нанокристалів, отриманих методом колоїдного синтезу. Джерелом іонів цинку виступав 10% водний розчин сульфату цинку, а джерелом іонів кисню – 10% розчин гідроксиду калію виробництва компанії Merck. В якості контрольних використовували водні розчини CdCl_2 та PbCl_2 з різними концентраціями сполук важких металів. Для збільшення активної площі поверхні наночастинок, що взаємодіє зі шкідливими речовинами, в колоїдний розчин наночастинок не додавався полімерний стабілізатор. А сам розчин наночастинок наносився па фільтровальну бумагу і висушувався. Для визначення розміру наночастинок ZnO розчин наносився на кварцову підкладку і висушувався.

Дослідження оптичного поглинання та фотолюмінесценції проводили за допомогою монохроматора МДР-6 з двома дифракційними ґратками 2400 та 1200 штр/мм. Перша ґратка використовувалась в ультрафіолетовій області спектру, а друга – в видимій. В якості приймача світлового потоку використовувався фотопомножувач ФЕУ-100.

Для збудження крайової фотолюмінесценції використовувався ультрафіолетовий світлодіод з довжиною хвилі 290 нм (4.27 eV).

Збудження довгохвильової люмінесценції та всі досліді із зразками, що використовували в якості люмінесцентних сенсорів, здійснювалося промисловими світлодіодами фірм Edison та Cree з енергіями квантів порядку 3.1 еВ.

Розмір наночастинок визначався за величиною зсуву краю фундаментального поглинання в наближенні ефективних мас. (табл. 1) за формулою Вонга [3].

Таблиця 1

Результати розрахунків
оптичного поглинання в нанокристалах ZnO

№.	ZnSO ₄ , КОН	E _g , еВ	ΔE _g , еВ	R, нм
1.	5 %	4.0	0.8	4.5
2.	10 %	3.8	0.5	5.7
3.	20 %	3.5	0.3	10

Результати розрахунків підтверджені дослідженнями скануючого електронного мікроскопу (СЕМ). На рис. 1 показано утворення конгломератів з нанокристалітів ZnO розміром до 10 нм.

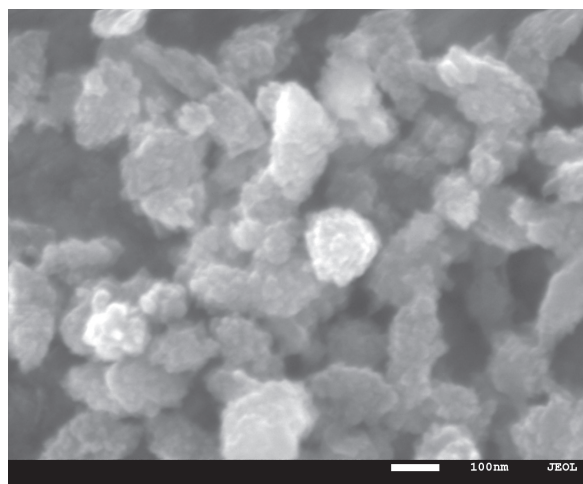


Рис. 1. СЕМ-зображення нанокристалів ZnO без стабілізатора. Зразок № 3.

ЕКСПЕРИМЕНТ

Люмінесценція досліджуваних нанокристалів аналізувалася в двох спектральних областях – ультрафіолетовій та видимій.

Спектри фотолюмінесценції в ультрафіолетовій області характеризуються трьома лі-

ніями випромінюваннями, розташування яких залежить від концентрації прекурсорів, тобто від ширини забороненої зони (рис. 2).

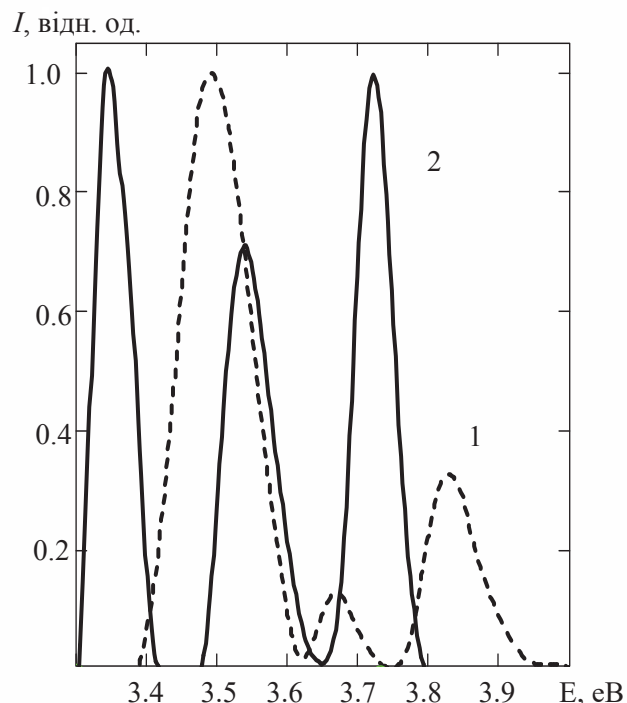


Рис. 2. Спектри фотолюмінесценції нанокристалів ZnO в УФ-області. Зразок № 1(1), № 2(2). $T_{\text{вим}}=300$ К.

Як показали дослідження, лінії крайового випромінювання змінюють своє спектральне розташування і не можуть бути використані в якості еталонних при додаванні розчинів з забруднювачами. Крім того збудження цих ліній потребує джерела високоенергетичного ультрафіолетового випромінювання, використання яких на даному етапі є економічно необґрунтованим та потребує додаткових мер безпеки при роботі з такими сенсорами.

В видимій області спектри фотолюмінесценції колоїдних нанокристалів ZnO характеризуються широкими неелементарними смугами випромінювання в синьо-зеленій та жовто-червоній областях спектру. При малих концентраціях прекурсорів низькоенергетичні лінії є домінуючими в спектрах випромінювання. Як і в [3], їх спектральне розташування є стбільним і не залежить від температури і розміру нанокристалітів (ширини забороне-

ної зони). При розкладанні на елементарні Гаусові складові в програмному середовищі OriginPro 7 в спектрах фотолюмінесценції виділяються елементарні лінії випромінювання на 2.82 еВ, 2.72 еВ, 2.62 еВ, 2.50 еВ, 2.38 еВ, 2.30 еВ, 2.17 еВ, 2.06 еВ, 1.88 еВ та 1.70 еВ суцільні лінії на рис. 3).

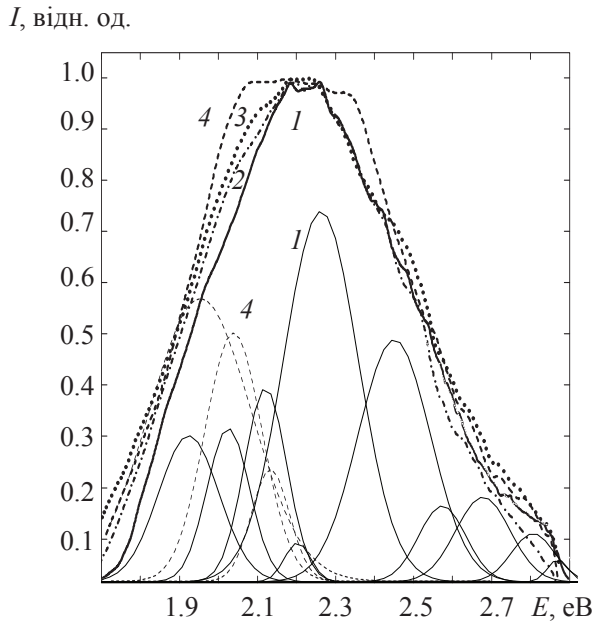


Рис. 3. Спектри фотолюмінесценції нанокристалів ZnO з додаванням CdCl₂:
1 – еталонний зразок, 2 – 0.0001, 3 – 0.0005, 4 – 0.001 г/мл CdCl₂. $T_{\text{вим}} = 300 \text{ К}$.

При нанесенні на зразки розчинів хлориду кадмію в спектрах довгохвильової люмінесценції збільшується інтенсивність лінії випромінювання на 2.06 еВ (рис. 3, криві 2-4). В [3] зазначені лінії випромінювання обумовлені переходами в межах нейтральних асоціативних центрів $(\text{Zn}_i^{+2}, \text{O}_i^{-2})^*$ з різними відстанями між донорами та акцепторами. Збільшення інтенсивності при додаванні розчину хлориду кадмію можна пояснити тим, що іони кадмію витісняють атоми цинку в міжвузловини.

При додаванні хлориду свинцю (рис. 4, криві 2-4) збільшується питома вага ліній блакитного 2.82 еВ, 2.72, 2.62 та 2.5 еВ.

Згідно попередніх досліджень [4,5], перші три лінії можуть бути обумовлені міжвузловинними атомами цинку та кисню $(\text{Zn}_i^0, \text{O}_i^0)^*$.

I , відн. од.

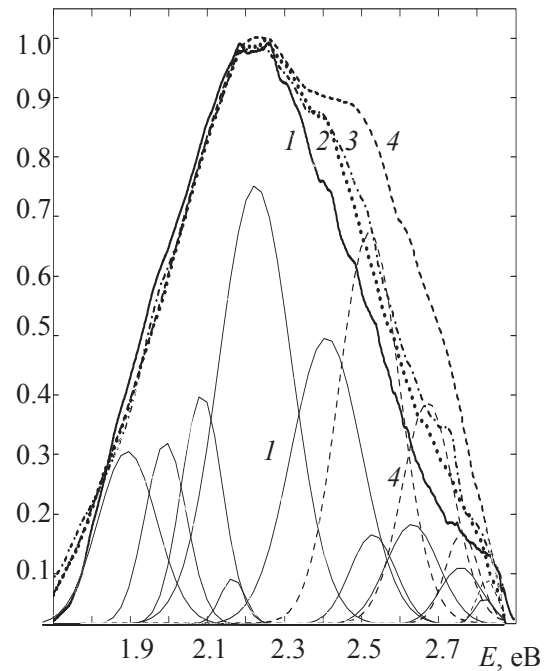


Рис. 4. Спектри фотолюмінесценції нанокристалів ZnO з додаванням PbCl₂:
1 – еталонний зразок, 2 – 0.0001, 3 – 0.0005, 4 – 0.001 г/мл PbCl₂. $T_{\text{вим}} = 300 \text{ К}$.

Лінія на 2.5 еВ добре відома з досліджень об'ємних кристалів і обумовлена переходами в межах центру $(\text{Zn}_i^0, \text{V}_{\text{Zn}}^0)$ [4]. Збільшення інтенсивності цих ліній можна пояснити витісненням атомів цинку атомами свинцю, і, можливо, кисню атомами хлору. Для перевірки цього в досліді водний розчин хлориду свинцю був замінений сульфатом свинцю. В результаті, спектри фотолюмінесценції не зазнали суттєвих змін.

ВИСНОВКИ

Результати проведених досліджень дозволили сформулювати наступні висновки:

Розроблено люмінесцентний сенсор на основі колоїдних нанокристалів ZnO, чутливий до концентрацій сполук кадмію та свинцю в воді до 10^{-4} г/мл.

Показано, що взаємодія з іонами кадмію призводить до збільшення інтенсивності жовто-червоних ліній випромінювання, а свин-

цю – блакитних. Подібний «блакитний» зсув спектрів випромінювання при додаванні іонів свинцю спостерігався нами в спектрах самоактивованої люмінесценції нанокристалів CdS, що можна пояснити тим, що атом свинцю має більший радіус за радіуси атомів цинку і кадмію, тому міжвузловинні атоми цинку і кадмію утворюються з меншою енергією і, відповідно, меншим електричним зарядом.

Запропонований механізм роботи люмінесцентного сенсору, який полягає в перерозподілі концентрацій власних дефектів, переважно міжвузловинних атомів цинку, що входять до складу донорно-акцепторних пар, що визначають довгохвильову люмінесценцію оксиду цинку.

Подальше збільшення чутливості сенсорів можливе за додаванням домішок-соактиваторів в нанокристали ZnO.

Список використаної літератури

- [1]. Wibowo A., Marsudi M. A., Amal M. I., Ananda M. B., Stephanie R., Ardy H., Diguna L. J. ZnO nanostructured materials for emerging solar cell applications // RSC Adv. – 2020. – V. 10. – P. 42838 – 42859.
- [2]. A. S. Korniyushchenko, V. V. Natalich, and V. I. Perekrestov, Formation, Structural, Morphological Characteristics and Sensor Properties of ZnO/CuO // Nanosystems, Metallofiz. Noveishie Tekhnol.-2019. – V. 41, No. 7. – P.953—963.
- [3]. Yu. A. Nitsuk, S. F. Huseynova, Ye. O. Mamailenko, Ya. I. Lepikh, Yu. F. Vaksman, G. V. Korenkova. Nature of zinc oxide colloidal nanocrystals photoluminescence // Sensor Electronics and Microsystem Technologies. – 2023. – Vol. 20 No.4., P. 19.-26. DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2023.4.294626>.
- [4]. Yu. A. Nitsuk, V. M. Salmanov, G. B. Ibragimov, A. G. Guseinov, R. M. Mamedov, S. F. Huseynova. Photoluminescence of Zinc Oxide Nanocrystals Obtained by chemical Method // AJP Fizika. – 2025. – V. 31, No. 2. – P. 23-25.
- [5]. Sharma A., Singh B.P., Dhar S., Gondorf A., Spasova M. Effect of surface groups on the luminescence property of ZnO nanoparticles synthesized by sol–gel route // Surface Science. – 2012. – V.606, No. 3-4. – P. L13-L17.

Стаття надійшла до редакції 05.11.2025 р.

PACS: 61.46.+w , 42.25.Bs, 07.07.Df

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2025.4.347718>

LUMINESCENT SENSOR BASED ON COLLOIDAL ZINC OXIDE NANOCRYSTALS

S. F. Huseynova, K. E. Berkov

Odesa I. I. Mechnikov National University,
2 Vsevoloda Zmiiienka St, Odesa, 65082, Ukraine
e-mail: huseynova@stud.onu.edu.ua

Abstract. The influence of heavy metal ions on the long-wavelength luminescence of colloidal zinc oxide nanocrystals was studied. It was shown that the addition of cadmium ions leads to an increase in the intensity of red-yellow luminescence, and lead ions lead to an increase in the intensity of blue luminescence. The mechanism of the sensor operation is proposed, which is associated with the redistribution of the concentration of intrinsic defects that determine the long-wavelength luminescence of zinc oxide.

Keywords: ZnO nanocrystals, photoluminescence, luminescent sensor

АКУСТОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ

ACOUSTOELECTRONIC SENSORS

PACS: 43.60.Vx, 68.60.Bs

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2025.4.347719>

КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ АКУСТОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН НА ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЯХ

Я. І. Леніх, <https://orcid.org/0000-0001-6769-835X>

П. О. Снігур

Науково-дослідний інститут фізики
Одеського національного університету імені І. І. Мечникова
вул. Змієнка Всеволода, 2, м. Одеса, 65082, Україна
e-mail: ndl_lepikh@onu.edu.ua

Анотація. В роботі аналізуються існуючі і пропонуються нові конструкторсько-технологічні рішення акустoeлектронних пристроїв на поверхневих акустичних хвилях. Відзначається, що при однакових базових елементах пристроїв, в завершальній частині КТР мають місце суттєві відмінності, які запропоновано розглядати як три групи конструкцій корпусування, орієнтовні на серійне (масове) виробництво. Виокремлюються пристрої спеціального призначення, які, як правило, виготовляються малими серіями, а їх конструктив визначається умовами використання в спецапаратурі.

Ключові слова: акустoeлектронні пристрої, поверхневі акустичні хвилі, конструкторсько-технологічні рішення, п'єзoeлектрики, зustrічно-штирьові перетворювачі

Вступ

На даний час значна кількість акустoeлектронних пристроїв на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) вийшли за межі лабораторних досліджень і випускаються серійно для застосування в радіoeлектронних виробках різного призначення – телевізори, смартфони, засоби зв'язку, телекомунікацій, автоматизоване виробництво тощо [1-6]. При цьому вони суттєво відрізняються не тільки електричними характеристиками, функціональним призначенням, а і конструкторсько-технологічними рішеннями (КТР). Різноманіття КТР визна-

чається як самими пристроями на ПАХ, які залежать від частотно-часових і фазових параметрів, що реалізуються з використанням різних п'єзoeлектричних матеріалів (класи монокристалів, п'єзокерамік, плівкових структур тощо), так і вимогами, чи особливостями радіoeлектронної апаратури – установочні і масогабаритні параметри, умови експлуатації – пожежо- та радіобезпека тощо.

Номенклатура розроблюваних акустoeлектронних пристроїв на ПАХ стрімко зростає внаслідок великої ефективності розв'язання з їх допомогою задач мікромініатюризації радіо-

електронної апаратури (РЕА), засобів зв'язку і комунікацій. Разом з цим виникають задачі відповідності КТР пристроїв на ПАХ розрахунковим даним.

Конструкторсько-технологічні рішення

Виходячи з вище означеного сформулюється певною мірою умовних два основних підходи, скоріше напрями, КТР акустoeлектронних пристроїв на ПАХ. Один з них – завершене КТР пристрою у вигляді окремого корпусованого виробу з відповідними виводами для включення в блоки РЕА. Другий – як навісні елементи у складі гібридних інтегральних схем ГІС товсто- чи тонкоплівкового виконання.

Розглянемо їх особливості, які мають місце на завершальній стадії розробки і виготовлення.

Не дивлячись на відмінності пристроїв за своїм призначенням, в загальному випадку вони на базовому рівні складаються зі спільних елементів: п'єзоелектричного звукопровода, зустрічно-штирьових перетворювачів (ЗШП), корпусних елементів і схем узгодження ЗШП з елементами радіотракту РЕА. При цьому пристрої можуть не суттєво відрізнятися п'єзоелектричним матеріалом звукопровода.

До корпусів пристроїв на ПАХ ставляться вимоги по захисту звукопровода з ЗШП від механічних і кліматичних впливів, екрануванню від електромагнітної наводки (сумісності окремих елементів).

Використання системи автоматизованого проєктування пристроїв на ПАХ не дозволяє врахувати вплив конструкції корпусу пристрою на його характеристики. Це майже очевидно. Тому питання корпусування важливе не тільки з точки зору захисту від зовнішніх впливів і механічних пошкоджень, а і досягнення заданих електричних характеристик експериментальним шляхом.

В той же час конструкція корпусу, в принципі, обмежена вимогами до конкретного пристрою і досвідом, навіть і «смаком» розробника.

Оскільки акустoeлектронні пристрої охоплюють широкий діапазон робочих частот – ви-

сокі і надвисокі частоти (ВЧ і НВЧ), то питання електромагнітних (ЕМ) наводок також є досить важливим.

Потужність ЕМ наводок в пристроях на ПАХ визначається як потужність, що випромінюється від одного ЗШП до потужності другого і задається відносно потужності вихідного акустичного сигналу.

Як правило, цю величину називають рівнем подавлення електромагнітних наводок, який визначається як відношення потужності затриманого сигналу до потужності незатриманого. При цьому мається на увазі потужність, яка розсіюється на навантаженні.

Якщо, до прикладу, використовується несиметрична схема узгодження ЗШП з радіотрактом, що частіше за все буває, то ЗШП генерують і приймають «критичні» ЕМ хвилі, які поширюються у хвилеводі з діелектричним заповненням.

При малій відстані між ЗШП ці хвилі сприяють появі значних ЕМ наводок. Якщо ширина порожнини корпусу набагато менше довжини хвилі на робочій частоті, що має місце і в нашому випадку, то справедливе співвідношення

$$(\lambda_c / \lambda) = 1, \quad (1)$$

де λ – довжина хвилі робочої частоти в середині корпусу;

λ_c – довжина його критичної хвилі.

Тоді відносне згасання (розв'язка) міжлюбими двома точками в середині корпусу дорівнює

$$\alpha = k(l / a), \quad (2)$$

де: l – відстань між ЗШП;

a – відстань між ЗШП і кришкою корпусу;

k – коефіцієнт, залежний від властивостей діелектричного заповнення корпусу.

Таким чином, чим більша відстань l між ЗШП і менше a , тим менше рівень ЕМ наводок. Для більшого ослаблення ЕМ зв'язку між ЗШП необхідно максимально наближати внутрішню поверхню корпусу до площини зву-

копровода. Створювана при цьому додаткова електрична ємність ЗШП близька до мінімальної і, в загальному випадку, легко компенсується схемою узгодження.

Справедливості ради слід зауважити, що для деяких пристроїв на ПАХ, в залежності від величини робочої частоти, електрофізичних параметрів (ЕФП) звукопровода, в першу

чергу від його діелектричної проникності ϵ , габаритних розмірів звукопровода в якості корпусу пристрою на ПАХ може бути використаний стандартний металоскляний корпус транзистора типу ТО-8, або аналогічний із ковара зі штирьовими виводами типу 151.15-4, 153.15, 155.15, 157.29, які використовуються переважно для ГІС (рис. 1.).



Рис. 1. Металоскляні корпуси. а) тип 151.15-4, б) тип ТО-8.

Однак такі КТР мають низку недоліків: складність конструкції і технології монтажу, великі габаритні розміри, недостатню ефективність, ЕМ наводки, висока вартість.

У зв'язку з цим запропоновано використання для пристроїв на ПАХ пластмасових корпусів (рис. 2).

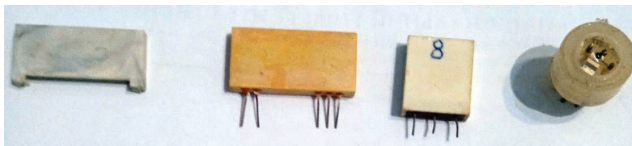


Рис. 2. Пластмасові корпуси.

У цьому випадку суттєво спрощується КТР пристрою в цілому. Проблема зниження електричних наводок вирішується простою металізацією внутрішньої частини корпусу. В ряді випадків, залежно від робочої частоти пристрою достатньо металізувати лише одну поверхню корпусу зі сторони поверхні звукопровода з ЗШП.

Останнім часом все більш помітною стає тенденція застосування для корпусування виробів електронної техніки різних синтетичних матеріалів: пластмаси, еластомерів, епоксидних смол, компаундів тощо. При полімеризації вони одночасно з кріпленням забезпечують герметичність збірки, термостійкість, високі

захисні властивості, технологічність і низьку вартість в умовах серійного виробництва.

Ці тенденції стимулювали нас розробити КТР для корпусування пристроїв на ПАХ з використанням компаундів, які демонструються на рис. 3 [7]. В розробленій конструкції звукопровід з ЗШП встановлюється на металізованій платі з контактними площинками для електричного з'єднання контактних площинок ЗШП і виводів. Для електричного з'єднання контактних площинок і виводів може використовуватись контактол типу АУК 0.23.005 ТУ з питомим опором ~ 4 Ом/квадрат, або мікрозварка. В якості плати може використовуватись любий дешевий матеріал: фольгований стеклотекстоліт або керамічна підкладка, напр. 22 ХС, чи сіталл СТ-50-1 необхідних розмірів. Покриття конструкції може здійснюватись або методом обволокування, або заливкою з застосуванням спеціальної оснастки. При цьому компаунд типу К-5 (ОСТ ЧГ0.029.026) забезпечує герметизацію пристрою на ПАХ без додаткових технологічних операцій, механічну жорсткість конструкції, пониження паразитних акустичних сигналів від країв неробочої частини звукопровода. Такі КТР, до того ж суттєво знижують вартість пристрою, більш технологічні ніж корпусні, дозволяють автоматизувати низку технологічних операцій виготовлення

і подальшу установку на комутаційну плату, наприклад, методом поверхневого монтажу.



Рис. 3. Пристрої на ПАХ корпусовані компаундом.

Як зазначалося вище, з метою підвищення інтеграції електронних виробів в ряді випадків функціональні пристрої будуються у вигляді гібридних тонко- чи товстоплівкових інтегральних схем, в яких окремі елементи, переважно пасивні, виготовляються у плівковому варіанті (провідники, резистори, індуктивності, ємності), а активні елементи (транзистори, мікросхеми) як навісний елемент. У такому випадку пристрої на ПАХ відповідно до вимог ГІС повинні мати КТР, які задовольняють певні особливості КТР ГІС в цілому.

Виходячи з вище вказаного нами запропоновано і розроблено три варіанти КТР пристроїв на ПАХ, адаптованих до КТР ГІС в комплексі.

В першому з них (рис. 4а) пристрій на ПАХ в корпусі використовується як навісний корпусований елемент, який встановлюється приклеюванням до підкладки ГІС. При цьому схема узгодження може бути встановлена як в корпусі пристрою, так і бути елементом ГІС у вигляді плівкової котушки індуктивності або навісним елементом. Такий варіант КТР доцільно використовувати, як показали експерименти, у випадку коли масо-габаритні параметри ПАХ пристрою і ГІС співвідносяться як 1:3. Такі КТР можна використовувати і при РЕА на друкованих платах.

В другому варіанті (рис. 4б) ГІС і ПАХ-пристрій мають спільний корпус. Звукопровід ЗШП встановлюється на металізовану ділянку ГІС. Електричні з'єднання ЗШП зі схемою виконуються дровими або полосковими виводами методом мікрозварки або пайки. Це призводить до певного ускладнення технології виготовлення пристрою на ПАХ, але робить

єдиною технологією монтажу і збірки пристрою на ПАХ і ГІС, а також дозволяє автоматизувати цей процес, що виправдовує певне ускладнення КТР.

На рис. 4в показано третій варіант КТР з частковим корпусуванням. Звукопровід пристрою на ПАХ встановлюється (приклеюється) на підкладку гібридної ГІС як показано в попередньому варіанті. Потім він захищається металевією кришкою, яка кріпиться до металізованої частини підкладки. При такій конструкції забезпечується краще екранування ЗШП, ніж у варіанті з загальним корпусуванням і є більш оптимальним при високих (понад 100 МГц) робочих частотах пристрою на ПАХ. Запропоновані і апробовані КТР відповідають вимогам високої степені інтеграції, надійності і автоматизації при виробництві.

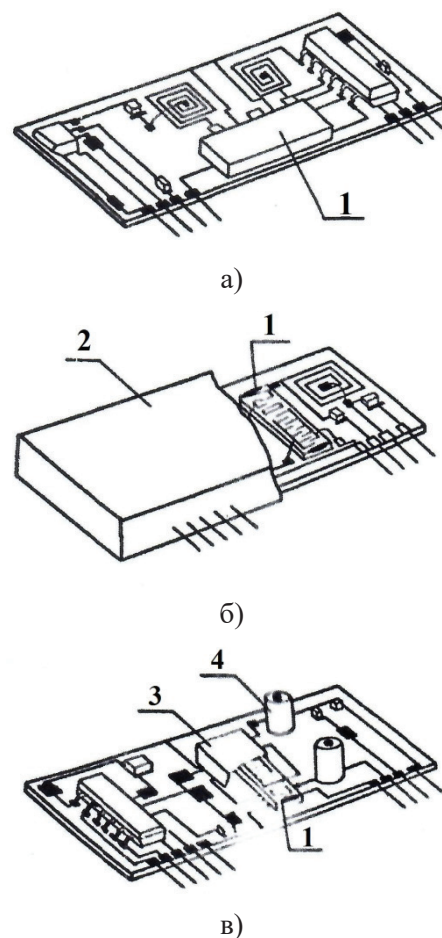


Рис. 4. Конструкторсько-технологічні рішення пристроїв на ПАХ в складі ГІС (мікробірок). 1- пристрій на ПАХ; 2-корпус мікробірки; 3 – корпус пристрою на ПАХ; 4- узгоджуючі котушка індуктивності.

Описані вище три типи конструкторсько-технологічних рішень орієнтовані на відповідні серійні виробництва. Однак повніша реалізація великих потенційних можливостей у вирішенні проблем мікромініатюризації РЕА потребує нерідко прийняття конструктивних рішень, які, головним чином, у завершальній стадії корпусування пристроїв на ПАХ є специфічними і оригінальними. Саме такими є пристрої для спецапаратури, які не орієнтовані на масове виробництво і їх вартість не є визначальною [8-9].

Нами створено, зокрема, датчик на ПАХ з переналагоджуваною частотою в широкому діапазоні, який є затребуваним в комунікаційних системах спеціального призначення, де це дуже важливо в даний час. Розроблено, стадія ТRL-3 і частково ТRL-4, функціонально-інтегровані датчики лінійних і кутових переміщень на ПАХ інтелектуалізованого рівня. Такі датчики вкрай необхідні для роботизованих платформ з дистанційним управлінням спеціального призначення. Деякі з прикладів таких корпусів демонструються на рис. 5

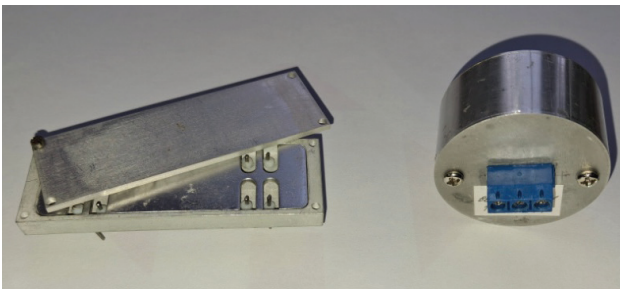


Рис. 5. КТР пристроїв на ПАХ для спецапаратури.

Висновки

1. Конструкторсько-технологічні рішення пристроїв на ПАХ, що є одним з важливих і перспективних напрямів функціональної електроніки мають суттєві особливості, що базуються на специфіці фізичних принципів їх роботи. Базові елементи пристроїв на ПАХ: звукопровід, системи ЗШП, схеми узгодження з радіоканалом РЕА є практично уніфіковані в частині КТР і для них можуть використовуватись типові технологічні операції, добре

відпрацьовані в технології тонкоплівкових ГІС і інтегральних мікросхем в більшості випадків некритичного рівня.

2. КТР пристроїв на ПАХ в цілому умовно можна поділити на три типи: корпусні в металоскляних корпусах, пластмасові і з використанням компаундів.

3. Окремо стоять КТР спеціального призначення, які за винятком базової частини, можуть і, як правило, мають специфічні і оригінальні рішення, задані специфікою РЕА де вони будуть використовуватись.

Список використаної літератури

- [1]. Morgan, D. Ustroystva obrabotki signalov na poverkhnostnykh akusticheskikh volnakh // Per. s angl. S. A. Zhguna; Per. s angl. pod red. S. I. Baskakova. – М.: Radio i svyaz, 1990, 416 s. [in Russian].
- [2]. Lepikh Ya. I., Hordiienko Yu. O., Dzyadevych S. V., Druzhynin A. O., Yevtukh A. A., Lienkov S. V., Melnyk V. H., Romanov V. O. Stvorennia mikroelektronnykh datchyiv novoho pokolinnia dla intelektualnykh system // Monohraf. za redakts. Ya. I. Lepikha. Odesa: 2010, Astroprint, 289 s. [in Ukrainian].
- [3]. Machulin V., Lytovchenko V., Stronskyi O., Lepikh Ya., Smyntyna V. Sensoryka – perspektyvnyi napriam rozvytku suchasnykh intelektualnykh informatsiinykh system // Visnyk NAN Ukrainy, 2010, №11, S. 27-29. [in Ukrainian].
- [4]. Lepikh Ya. I., Hordiienko Yu. O., Dzyadevych S. V., Druzhynin A. O., Yevtukh A. A., Lienkov S. V., Melnyk V. H., Protsenko V. O., Romanov V. O. Mikroelektronni datchyky novoho pokolinnia dla intelektualnykh system. Osnovni tekhnichni kharakterystyky // Dovidnyk. Odesa: Astroprint, 2011, 92 s. [in Ukrainian].
- [5]. Lepikh Ya. I., Lienkov S. V., Melnyk V. H., Romanov V. O., Protsenko V. O. Intelektualni vymyruvalni kanaly sensorykh system // Nauka i oborona. 2011. № 2, S. 36-43. [in Ukrainian].
- [6]. Ya. I. Lepikh, A. A. Yevtukh, V. O. Romanov. Suchasni mikroelektronni datchyky dla intelektualnykh system // Visnyk NAN Ukrainy,

2013, № 4. – S. 40-49. <https://doi.org/10.15407/visn2013.04.040> [in Ukrainian].

[7]. Lepikh Ya. I., Snigur P.O. Akustoelektronnyi prystrii na poverkhnevykh akustychnykh khvyliakh // Patent na korysnu model № 125281, 10.05.2018, Biul. № 9. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/677461/> [in Ukrainian].

[8]. Lepikh Ya. I., Lienkov S. V., Melnyk V. H., Dzyadevych S. V. Mikroelektronni datchyky dlia informatsiinykh (intelektualnykh) system

spetsialnoho pryznachennia // Nauka i oborona. 2010, №3, S. 54-55. [in Ukrainian].

[9]. Ya. I. Lepikh. VHF radio path with intermediate frequency filter and frequency detector on surface acoustic waves // Sensor Electronics and Microsystem Technologies. 2023, Vol. 20, No. 2., P. 31-35, DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2023.2.282729>. [in Ukrainian].

Стаття надійшла до редакції 16.11.2025 р.

PACS: 43.60.Vx, 68.60.Bs

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2025.4.347719>

DESIGN AND TECHNOLOGY SOLUTIONS FOR ACOUSTOELECTRONIC DEVICES FOR PHYSICAL QUANTITIES BASED ON SURFACE ACOUSTIC WAVES

Ya. I. Lepikh, P. O. Snigur

Research Institute of Physics of Odesa I. I. Mechnikov National University
2 Vsevoloda Zmiiienka St, Odesa, 65082, Ukraine
e-mail: ndl_lepikh@onu.edu.ua

Abstract. The paper analyzes existing and proposes new design and technology solutions for acoustoelectronic devices based on surface acoustic waves. It is noted that while the basic elements of the devices are identical, the final part of the DTS features significant differences, which are proposed to be considered as three groups of packaging designs, oriented towards serial (mass) production. Special-purpose devices are singled out; these are typically manufactured in small batches, and their design is determined by the conditions of use in specialized equipment.

Keywords: acoustoelectronic devices, surface acoustic waves, design and technology solutions, piezoelectrics, interdigital transducers

БІОСЕНСОРИ

BIOSENSORS

УДК 543.555, 575.15, 616, 612.466.22, 616.61-008.64

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2025.4.347720>

НОВИЙ КОНДУКТOMETРИЧНИЙ БІОСЕНСОР НА ОСНОВІ АДСОРБОВАНОЇ НА СИЛІКАЛІТІ РЕКОМБІНАНТНОЇ УРЕАЗИ

*С. Марченко*¹, <https://orcid.org/0000-0002-4682-1993>

*Т. Величко*¹, <https://orcid.org/0000-0003-4087-3730>

*О. Солдаткіна*¹, <https://orcid.org/0009-0009-6165-7421>

О. Солдаткін^{1,2}, <https://orcid.org/0000-0003-2362-5487>

*Б. Аката Курч*³, <https://orcid.org/0000-0002-4337-5537>

С. Дзядевич^{1,4}, <https://orcid.org/0000-0003-2915-716X>

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

² Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського,
просп. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна

³ Близькосхідний технічний університет,

б-р Ісмета Іненю, м. Анкара, 06800, Туреччина

⁴ Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
вул. Володимирська, 64, м. Київ, 01003, Україна

e-mail: svmarchenkosc@ukr.net, taras.velycho@gmail.com, olgasoldatkina@yahoo.com,
soldatkinsasha@gmail.com, akata@metu.edu.tr, dzyad@yahoo.com

Анотація. Дана експериментальна робота присвячена розробленню нового кондуктометричного біосенсора з покращеними аналітичними характеристиками для кількісної детекції сечовини. Біоселективний елемент біосенсора було виготовлено шляхом адсорбції рекомбінантної уреазы на кондуктометричному перетворювачі, модифікованому тонким шаром нанопористих частинок силікаліту ($d = 250$ нм). Під час розробки біосенсора було вивчено вплив параметрів розчину на його функціонування. Досліджено величину відгуків біосенсора на основі рекомбінантної уреазы в залежності від концентрації білку в аналізованому розчині. Перевірено, як змінюються відгуки запропонованого біосенсора при різній іонній силі та буферній ємності аналізованого розчину. Розроблений біосенсор мав ряд важливих переваг, таких як швидкість відгуку, простота використання, відсутність потреби у застосуванні токсичних агентів при виготовленні, висока відтворюваність сигналів при безперервній роботі ($RSD = 5\%$), розширений лінійний діапазон знаходився в межах 0,02–9 мМ, висока операційна стабільність протягом щонайменше 19 днів зберігання.

Відповідно, враховуючи високі аналітичні параметри розробки, було доведено перспективність застосування біосенсора на основі рекомбінантної уреази, адсорбованої на силікаліті, для медичної діагностики концентрації сечовини в складних багатокомпонентних біологічних рідинах.

Ключові слова: сечовина, рекомбінантна уреаза, ниркова недостатність, медична діагностика, кондуктометрія, біосенсор, силікаліт, цеоліти

Вступ

В організмі людини сечовина синтезується в печінці як кінцевий продукт детоксикації ендogenous аміаку, що утворюється при розпаді білків та інших азотомісних сполук. Синтезована сечовина вивільняється з печінки в кров і транспортується до нирок, де вона фільтрується і виводиться із сечею. У нормі концентрація сечовини в крові людини складає від 2,5 до 7,5 мМ [1], але швидкість її синтезу, і відповідно концентрація, частково збільшуються при вживанні понаднормово збагаченою білками їжу, посиленням ендogenous катаболізмом в умовах голодування чи при пошкодженні тканин. Надмірна концентрація сечовини в організмі людини відповідає за різні серйозні захворювання, такі як розлад травлення, підвищена кислотність, виразки [2], рак [3], порушення роботи нирок, ниркова недостатність [4], обструкція сечовивідних шляхів, зневоднення [5], шок, опіки, шлунково-кишкова кровотеча [6] тощо. Відомо, що значно підвищений рівень сечовини (50-150 мМ) в крові вказує на тяжку дисфункцію нирок [7]. Такий аномальний рівень може бути зменшений до близько 10 мМ за допомогою процедур гемодіалізу або перитонеального діалізу [8]. Крім того, рівень сечовини нижче нормально-го може спричинити печінкову недостатність, нефротичний синдром, кахексію тощо [9, 10].

У харчовій промисловості тестування сечовини в молочних продуктах протягом певного періоду є дуже значущим, оскільки це призводить до зниження витрат на корм, більшого виходу молочного білка, зниження фальсифікації [11, 12].

Контроль концентрації сечовини в ґрунтах та водоймах є також важливим для екологічного моніторингу. Певний рівень сечовини в річках або ґрунтових водах свідчить про

забруднення стічними водами [13]. Високий вміст сечовини є однією з причин цвітіння водоростей [14, 15]. Поясненням збільшення цієї речовини у водоймах, є щорічне світове виробництво сечовини, яке перевищує 100 мільйонів тонн, більшість з яких використовується як добриво. Надмірне ж внесення цих азотних добрив може призвести до проблем зі шкідниками, збільшуючи їх чисельність, тривалість життя та загальну пристосованість. Також, сечовина може бути відповідальною за зниження рН ґрунту, що може впливати на врожайність [16]. Таким чином, кількісне та якісне виявлення сечовини становить великий інтерес та є надзвичайно необхідним у галузях харчової промисловості, медицини, охорони навколишнього середовища, тощо.

На сьогоднішній день вже розроблено багато методів аналізу концентрації сечовини, найбільш поширеними є пристрої на основі: газової хроматографії [17], калориметрії [18, 19] та флуориметрії [20]. Однак, недоліками наведених методів є складність попередньої підготовки зразків, довготривалість аналізу, потреба у висококваліфікованому персоналі і неможливість використання запропонованих методів для on-line аналізу.

Альтернативою наведеним вище методам є мініатюрні аналітичні пристрої – біосенсори, використання яких дасть змогу позбавитись вищезазначених недоліків. На даний момент розроблено значну кількість біосенсорів для аналізу сечовини, серед яких потенціометричні [21-23], кондуктометричні [24-26], амперометричні [27-29]. Але, не зважаючи на значну кількість уреазних біосенсорів, всі вони мають два суттєвих недоліки, а саме, вузький лінійний діапазон визначення, що пов'язаний з використанням ензиму уреази з бобів сої, та вибір найпоширеніших способів іммобілізації,

а саме ковалентного зв'язування [30], фізичної адсорбції [31], поєднання із полімерами [28, 32-33], чи зв'язування із поверхнею перетворювача [34, 35], яким в свою чергу, притаманні такі проблеми як швидка втрата активності іммобілізованого ензиму, низька відтворюваність сигналів біосенсора, проблеми пов'язані з токсичністю агентів іммобілізації, тощо. Для вирішення недоліків існуючих уреазних біосенсорів для визначення сечовини, ми запропонували як біочутливий елемент використовувати рекомбінантну уреазу (РУ) з *E. coli*, що характеризується підвищеною K_m для розширення та зсуву в область високих концентрацій сечовини лінійного діапазону роботи біосенсора. Як іммобілізуючий агент ми запропонували новий носій – цеоліт, а саме один з його різновидів – силікаліт. Оскільки, як вже відомо, цеоліти представляють значний інтерес для іммобілізації білків [36] і особливо різних ензимів завдяки великій площі поверхні, жорсткими і добре визначеними пористими структурами, термостабільності та гідрофільності [37]. Адсорбція ензимів на цеолітах – це м'який та нетоксичний метод іммобілізації, який дозволяє зберегти активність та біодоступність ензимів в складі біосенсорів. Перспективні результати даного методу іммобілізації були отримані для низки ензимних біосенсорів [38-40].

Отже, мета цієї роботи полягала в розробці нового кондуктометричного біосенсора на основі адсорбованої на силікаліті РУ, що буде характеризуватись значними перевагами у порівнянні з відомими розробками. Впровадження у повсякденну практику нового методу експрес-аналізу концентрації сечовини має життєво важливе значення, особливо для медичної діагностики та екологічного моніторингу довкілля.

Матеріали і методи

У роботі було використано ензим РУ (ЕС 3.5.1.5) з *E. coli*, активністю 150 од. акт./мг білку, виробництва фірми «USBiological» (США), бичачий сироватковий альбумін (БСА, фракція V) та сечовину отримано від «Sigma-Aldrich Chemie» (Німеччина), гліцерин виробництва

«Макрохім» (Україна), NaCl отримано від «Sigma-Aldrich» (США) Як буферний розчин використовували однокомпонентний фосфатний буфер на основі KH_2PO_4 , рН якого титрували NaOH фірми «Merck» (Німеччина). Всі інші хімічні речовини, використані в роботі, були вітчизняного виробництва та ступеню чистоти х.ч. або ч.д.а. Для приготування розчинів використовували дистильовану або ультрачисту воду.

Перетворювачі та схема експериментальної установки для кондуктометричних вимірювань

В роботі використовувались кондуктометричні перетворювачі (КП), виготовлені згідно наших рекомендацій в Інституті фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова (м. Київ, Україна). Вони мають розмір 5×30 мм і складаються з двох пар ідентичних золотих гребінчастих електродів, нанесених на ситалову підкладку. Детальний опис конструкції перетворювача та методики його виготовлення і використання приведено в попередній роботі [41].

На рис. 1 представлено схему експериментальної кондуктометричної установки для проведення вимірів з КП. На одну пару електродів (1) наносили робочу мембрану на основі РУ (3). На другу пару електродів (2) наносили референтну мембрану на основі БСА (4). Також кондуктометрична схема включала в себе портативний кондуктометр «МСР-3» (5), тримач для біосенсора (6) і штатив (7). При проведенні вимірювань на основу штативу встановлюють робочу комірку (8) з досліджуваним розчином (9), а весь сенсорний блок встановлюють на магнітний перемішувач пристрій (10). Портативний вимірювальний прилад «МСР-3» підключається до електромережі через адаптер мережі живлення (11), до біосенсору – сполучними дротами через контакт (12), а до персонального комп'ютера (13) зі встановленим пакетом відповідного програмного забезпечення – через контакт (14). Вимірювання проводили при частоті струму 37 кГц та амплітуді 14 мВ.

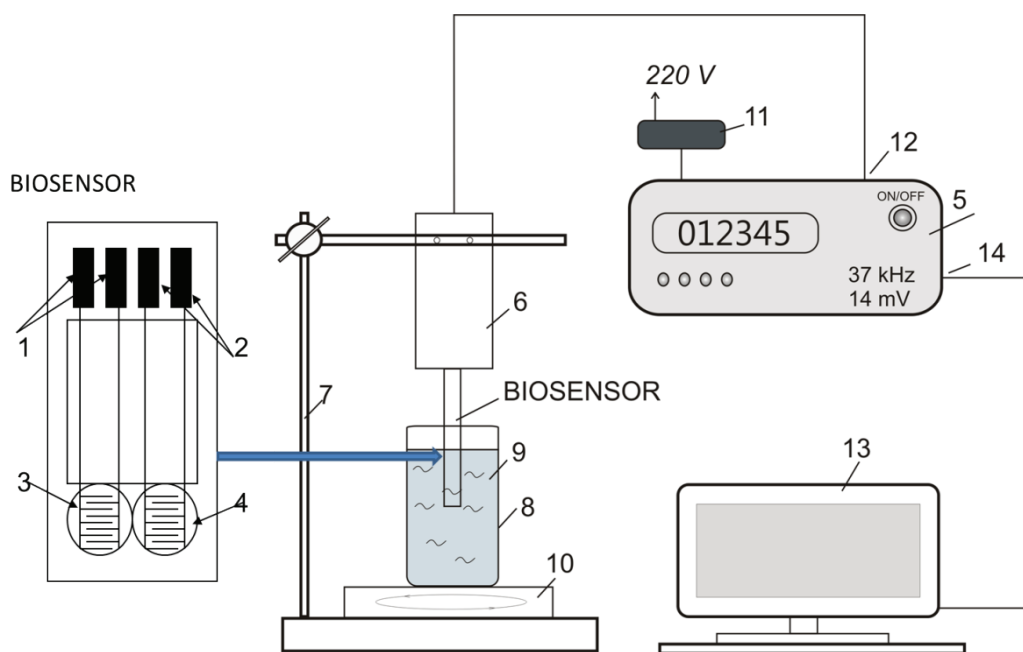


Рис. 1. Схема кондуктометричної установки на основі портативного аналізатора «МСП-3».

Процедура виготовлення біоселективних елементів

Раніше нами було розроблено метод модифікації фізичних перетворювачів з використанням силікаліту. Детальна методика представлена в роботі [42]. Для досліджень використовували КП, попередньо покриті силікалітом. На одну пару електродів наносили 0,15 мкл 5% розчину РУ у 20 мМ фосфатному буфері, рН 6,5, а на іншу (еталонну) пару – 0,15 мкл 5% розчину БСА в аналогічному буфері, після чого перетворювач піддавали повному висушуванню на повітрі (протягом 15-20 хв). Після іммобілізації біосенсор промивали свіжими порціями фосфатного буферного розчину протягом 10–15 хв для видалення незв'язаних компонентів біомембран. Між вимірюваннями біосенсор зберігали в сухому стані за температури +4°C.

Методика проведення біосенсорних вимірювань

Вимірювання проводили за кімнатної температури у відкритій вимірювальній комірці (2 мл), заповненій робочим буферним розчином (10 мМ фосфатний буферний розчин, рН 7,35)

при постійному перемішуванні. Необхідну концентрацію модельного розчину сечовини для вимірювань в комірці отримували шляхом додавання аліквот стокового розчину сечовини до буферного розчину. Неспецифічні зміни вихідного сигналу, пов'язані з локальними змінами температури, рН і випадковими електричними струмами, усувалися за допомогою використання диференційного режиму вимірювання.

Результати і обговорення

Характеристика силікаліту

Отримані зразки наночастинок силікаліту були охарактеризовані за допомогою рентгенівської дифракції на приладі Philips PW 1729 та з використанням скануючої електронної мікроскопії (СЕМ) на приладі 400 Quant FEI.

Площу поверхні зразків було визначено за допомогою багатоточкового БЕТ-аналізу, тоді як розмір пор було отримано методами Сайто-Фолі (С-Ф) та t-діаграми. Морфологію та середній розмір наночастинок силікаліту можна побачити на рис. 2.

Виходячи з різних методів досліджень, більш детальні параметри синтезованого силікаліту наведені в табл. 1.

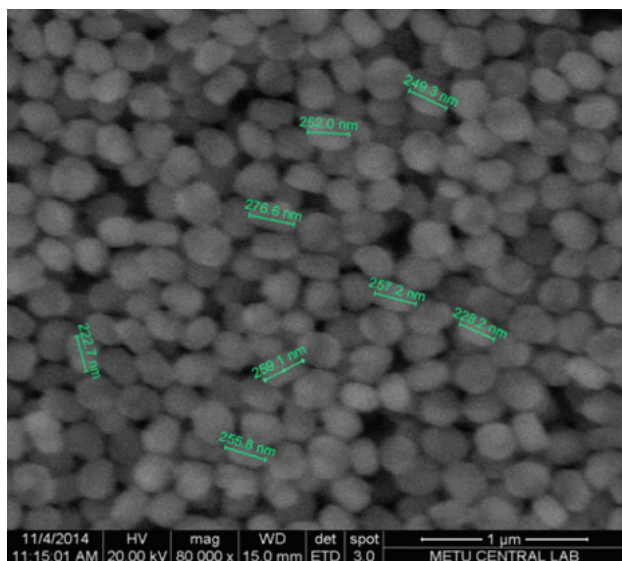


Рис. 2. Морфологія частинок силікаліту за результатами СЕМ.

Табл. 1

Характеристика наночастинок силікаліту

Розмір частинок	Площа поверхні	Розмір пор
≈250 нм	296 м²/г	0,42 нм
СЕМ	С-Ф метод	С-Ф метод

Вплив параметрів розчину на функціонування біосенсора на основі адсорбованої на силікаліті РУ

Принцип роботи запропонованого в роботі кондуктометричного біосенсора на основі адсорбованої на силікаліті РУ, ґрунтується на ензиматичній реакції, представлений рівнянням:



В процесі проходження ензиматичної реакції збільшується локальна концентрація іонів в мембрані. Це, відповідно, призводить до зміни провідності розчину, яка реєструється кондуктометричним перетворювачем [42]. Ці зміни і, відповідно, відгуки біосенсора є пропорційними до концентрації аналізованого субстрату, тобто сечовини.

Як вже згадувалось, в основі кондуктометричного методу лежить вимірювання зміни

провідності аналізованого розчину. Ця зміна провідності може залежати як від самої ензиматичної реакції, так і від характеристик розчину, в якому ця реакція відбувається. Тому передусім було досліджено вплив параметрів розчину (буферна ємність, іонна сила, концентрація білку в розчині) на величину відгуку біосенсора на основі адсорбованої на силікаліті РУ.

Буферна ємність крові людини є відносно високою завдяки наявності великих концентрацій білків та солей у ній. Щоб уникнути впливу буферної ємності крові на функціонування кондуктометричного біосенсора, концентрація робочого буфера у вимірювальній комірці повинна бути не менше 5 мМ. На рис. 3 наведено залежності величин відгуків біосенсора від концентрації сечовини за різних концентрацій робочого буферного розчину (2,5; 5; 10; 25 мМ).

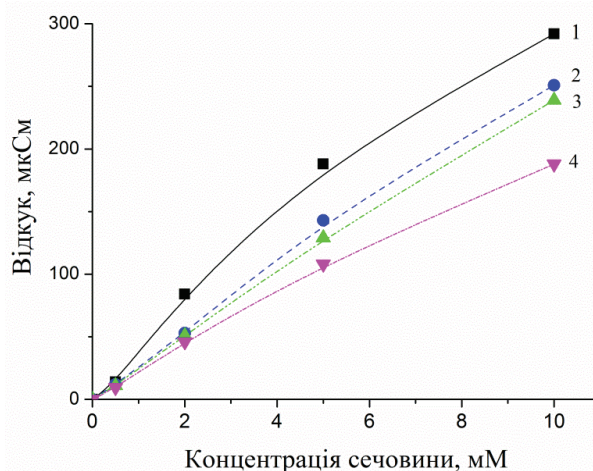


Рис. 3. Залежність величин відгуків біосенсора на основі адсорбованої на силікаліті РУ на різні концентрації сечовини при різних концентраціях робочого буферного розчину (1 – 2,5 мМ, 2 – 5 мМ, 3 – 10 мМ та 4 – 25 мМ). Вимірювання проводились у фосфатному буфері, рН 7,35.

З графіка видно, що зі збільшенням буферної ємності величина відгуків на сечовину зменшується. Зниження відгуків на субстрат у разі збільшення концентрації робочого буферного розчину пов'язано зі зростанням фонові провідності та буферної ємності. Як видно, зі збільшенням буферної ємності, відгуки біосен-

сера на сечовину зменшуються, але не принципово, тож для подальших досліджень було використано концентрацію робочого буфера 10 мМ.

Однією з важливих характеристик буферного розчину, що може негативно впливати на відгук кондуктометричного біосенсора, є іонна сила. Відомо, що сольовим компонентом крові є хлорид натрію з концентрацією близько 150 мМ. Щоб дослідити цей вплив, було проведено вимірювання величини сигналу біосенсора на сечовину при додаванні у аналізований розчин різних концентрацій NaCl (від 1 до 350 мМ) (рис. 4).

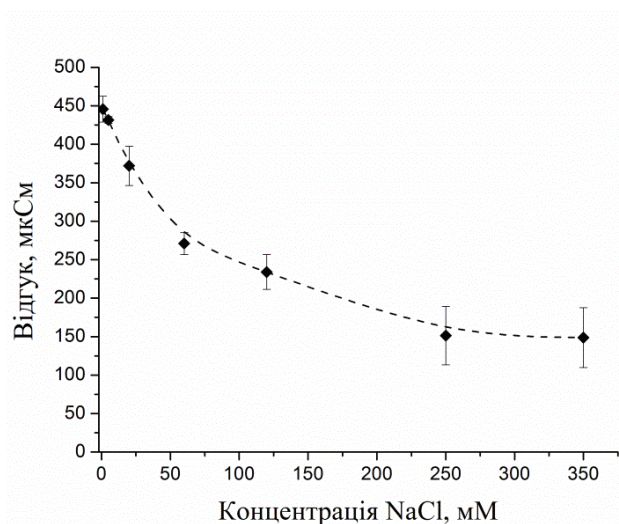


Рис. 4. Залежність величин відгуків біосенсора на основі адсорбованої на силікаліті РУ від концентрації NaCl у аналізованому середовищі. Вимірювання проводились у 10 мМ фосфатному буфері, рН 7,35. Концентрація сечовини становила 10 мМ.

З отриманого графіка видно, що зі збільшенням іонної сили відгук на концентрацію субстрату зменшується за експонентою. При концентрації 350 мМ NaCl у робочому буферному розчині, величина сигналу становить лише 34% від початкового відгуку на сечовину без додавання NaCl у комірку. Одна з головних причин такої залежності пов'язана зі зростанням фонові провідності розчину.

Відомо, що на нормальне функціонування електрохімічних біосенсорів часто негативно може впливати наявність білків в аналізованому середовищі за рахунок механічного

забруднення біомембран, а відповідно зменшення їх проникності. Враховуючи можливе неспецифічне зв'язування іммобілізованої РУ з білками крові, що може впливати на результати аналізу з використанням біосенсора, ми дослідили зміну чутливості біосенсора на різні концентрації сечовини при додаванні різних концентрацій БСА в аналізоване середовище (Табл.2).

Табл. 2

Залежність величини сигналів біосенсора на основі адсорбованої на силікаліті РУ від концентрації БСА в розчині

Концентрація сечовини, мМ	Відгуки біосенсора за різних концентрацій БСА, мкСм				
	0%БСА	0,1%БСА	0,25%БСА	0,5%БСА	1%БСА
0,5	48	45	46	45	46
2	151	155	158	158	149
5	262	271	271	270	257
10	357	369	369	365	349
15	416	423	429	427	414
25	515	509	506	507	493

Аналізуючи результати експерименту, встановлено, що біосенсорного сигналу на внесення БСА у вимірювальну комірку не спостерігалось, і не було виявлено істотного впливу БСА на величину відгуків кондуктометричного біосенсора на основі адсорбованої на силікаліті РУ. Отже, присутність високомолекулярної фракції білку в робочому буфері у концентраціях що можуть бути присутні в реальних біологічних рідинах (з врахуванням розведення) не призводить до виникнення неспецифічного відгуку та не впливає на величину відгуку біосенсора на основі РУ, адсорбованої на силікаліті.

Стабільність функціонування біосенсора на основі адсорбованої на силікаліті РУ

Відтворюваність та операційна стабільність є одними з найважливіших характерис-

тик стабільної роботи біосенсорів. Для дослідження відтворюваності ми протягом одного робочого дня, з інтервалом у 30 хв, отримували відгуки біосенсора на одну й ту саму концентрацію субстрату (10 мМ). При цьому біосенсор весь час між вимірюваннями залишався у робочому буфері з постійним перемішуванням. Відносне стандартне відхилення при біосенсорному вимірюванні концентрації сечовини складало 5%, що є прийнятним (рис. 5). Саме тому запропонований біосенсор на основі адсорбованої на силікаліті РУ має високу перспективність застосування для аналізу сечовини у реальних біологічних зразках хворих.

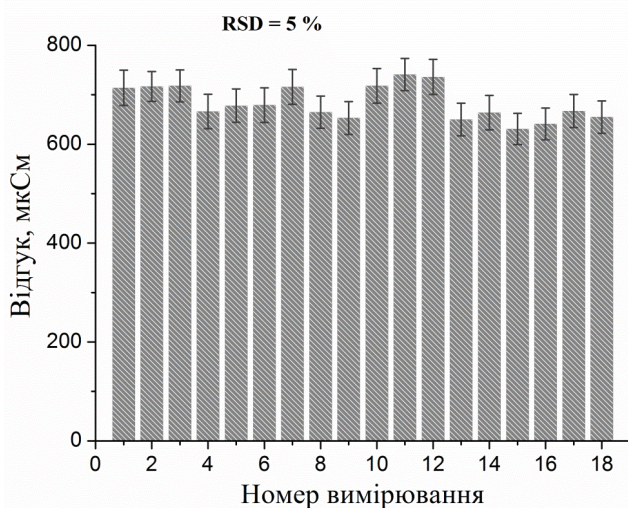


Рис. 5. Відтворюваність сигналів біосенсора на основі адсорбованої на силікаліті РУ протягом одного робочого дня при безперервній роботі.

**Концентрація сечовини – 10 мМ.
Вимірювання проводились у 10 мМ
фосфатному буфері, рН 7,35.**

Поширеним недоліком біосенсорів на основі методів іммобілізації по принципу фізичної адсорбції ензимів є те, що останні можуть поступово вимиватися робочим розчином через слабкий зв'язок між ензимом та адсорбентом. Тому важливо було перевірити стабільність роботи біосенсора протягом певного часу. З цією метою, ми протягом 19 днів експерименту отримували по 5 відгуків уреазного біосенсора на однакову концентрацію сечовини. Під час експерименту, між вимірюваннями,

біосенсор зберігався за кімнатної температури у сухому стані. За період тестування відгуки біосенсора не зазнали значної втрати активності, що є дуже гарним показником операційної стабільності (рис. 6).

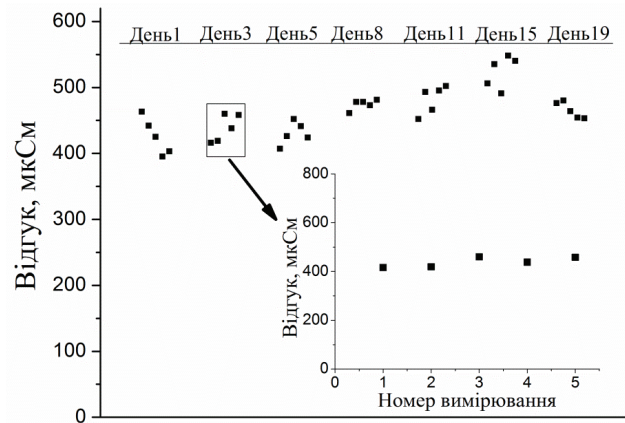


Рис. 6. Операційна стабільність сигналів біосенсора на основі адсорбованої на силікаліті РУ протягом 19 днів функціонування.

**Концентрація сечовини – 10 мМ.
Вимірювання проводились у 10 мМ
фосфатному буфері, рН 7,35.**

З метою вивчення аналітичних параметрів біосенсора для можливості подальшого аналізу сечовини в біологічних рідинах було проаналізовані типові сигнали біосенсора на різні концентрації сечовини та побудована детальна калібрувальна крива (рис. 7).

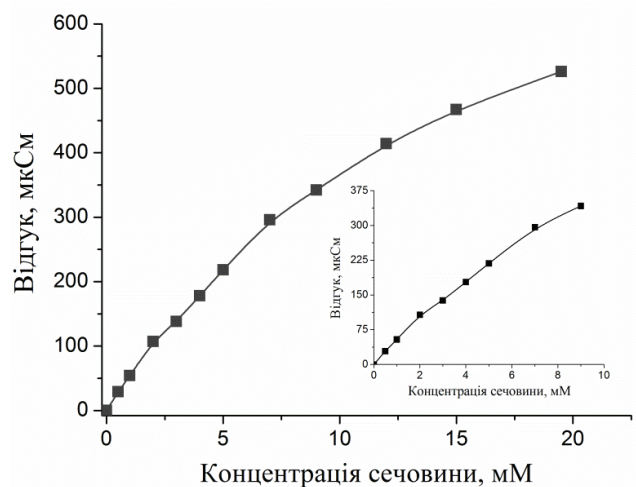


Рис. 7. Залежність величини відгуку біосенсора на основі адсорбованої на силікаліті РУ від концентрації сечовини в розчині. Вимірювання проводились у 10 мМ фосфатному буфері, рН 7,35.

Теоретично, лінійна ділянка цієї калібрувальної кривої може бути використана надалі для аналізу концентрації сечовини в реальних біологічних зразках хворих на ниркову недостатність. Отримані відгуки та побудовану калібрувальну криву аналізували стосовно їх аналітичних характеристик: динамічного діапазону роботи, який знаходився в межах 0-20 мМ, лінійний діапазон складав 0,02-9 мМ сечовини, мінімальна межа детекції сечовини дорівнювала 20 мкМ.

Розроблений біосенсор на основі адсорбованої на силікаліті РУ характеризується відмінними аналітичними характеристиками, є високо стабільним при роботі та селективним до цільового субстрату відносно найбільш впливових інтерферентів крові. Відповідно, в подальшому, він може з успіхом використовуватись при аналізі сироватки крові/діалізної рідини пацієнтів із захворюванням нирок.

Висновки

Дана експериментальна робота була спрямована на розробку, адаптацію та оптимізацію нового моноензимного кондуктометричного біосенсора для визначення сечовини в модельних та реальних біологічних зразках. Біосенсор створений на основі РУ з *E. coli* і призначений для точного визначення концентрації сечовини в діалізній рідині та сироватці крові хворих на ниркову недостатність. Біосенсор було створено шляхом іммобілізації РУ на чутливій поверхні гребінчастих електродів кондуктометричного перетворювача з використанням методики адсорбції на силікаліті.

В процесі дослідження було перевірено вплив різних концентрацій буферу на відгуки кондуктометричного біосенсора, хлориду натрію та різних концентрацій білку як основних складових компонентів сироватки крові, які можуть впливати на результати вимірювання. Показана відсутність інтерференції з боку компонентів матриці. Біосенсор характеризувався хорошою відтворюваністю відгуків на додавання модельного розчину сечовини (RSD=5 %) та високою операційною стабільністю сигналів протягом 19 діб.

З метою перевірки можливості подальшого застосування розробленого біосенсора для детекції сечовини в реальних біологічних зразках, було проаналізовано його аналітичні характеристики. Лінійний діапазон роботи біосенсора знаходився в широких вимірювальних межах від 0,02 до 9 мМ, мінімальна межа визначення – 20 мкМ. Показано значне розширення лінійного діапазону визначення сечовини внаслідок застосування рекомбінантного ензиму. Це дає змогу проводити вимірювання зразків, що містять високу концентрацію сечовини, без значного їх розведення.

Таким чином, кондуктометричний біосенсор на основі РУ з *E. Coli*, адсорбованої на силікаліті, можна розглядати як перспективний аналітичний інструмент для високочутливого визначення концентрації сечовини в реальних біологічних зразках хворих на ниркову недостатність.

Подяки

Дослідження виконувалось за фінансової підтримки гранту Фонду Саймонса № SFI-PD-Ukraine-00017453 та індивідуальних грантів від FEBS “New multibiosensor device for diagnosis of early diabetic nephropathy and hemodialysis control” і дослідницької стипендії IUBMB Wood-Whelan “Development of new biosensors based on modified carbonaceous materials for sorbitol measurement as the main marker of diabetic complications”.

Список використаної літератури

- [1]. G. Dhawan, G. Sumana, B. D. Malhotra. Recent developments in urea biosensors // Biochem. Eng. J., 44(1), p. 42–52 (2009).
- [2]. A.-S. F. Nktel, M. H. Nadhim, H.Y. Nawar. Serological, culture and urea breath test for detection of *H. pylori* in gastric ulcers patients // Indian J Forensic Med Toxicol., 14(4), p. 1317-1322 (2020).
- [3]. E. Wu, G.-F. Wei, Y. Li, M.-K. Du, J.-T. Ni. Serum urea concentration and risk of 16 site-specific cancers, overall cancer, and cancer mortality in individuals with metabolic syndrome: a cohort study // BMC Medicine, 22:536 (2024).

- [4]. O. I. Adeyomoye, C. O. Akintayo, K. P. Omotuyi, A. N. Adewumi. The biological roles of urea: A review of preclinical studies // *Indian J. Nephrol.*, 32(6), p. 539-545 (2022).
- [5]. A. R. Mehta. Why does the plasma urea concentration increase in acute dehydration? // *Adv. Physiol. Educ.*, 32(4), p. 336 (2008).
- [6]. M. D. Witting, L. Magder, A. E. Heins, A. Mattu, C. A. Granja, M. Baumgarten. ED predictors of upper gastrointestinal tract bleeding in patients without hematemesis // *Am. J. Emerg. Med.*, 24, p. 280-285 (2006).
- [7]. R. Vanholder, T. Gryp, G. Glorieux. Urea and chronic kidney disease: the comeback of the century? (in uraemia research) // *Nephrol. Dial. Transplant.*, 33(1), pp. 4-12 (2018).
- [8]. R. Koncki. Recent developments in potentiometric biosensors for biomedical analysis // *Anal. Chim. Acta*, 599(1), p. 7-15 (2007).
- [9]. D. Chirizzi, C. Malitesta. Potentiometric urea biosensor based on urease immobilized by an electrosynthesized poly (ophenylenediamine) film with buffering capability // *Sens. Actuators, B*, 157(1), p. 211-215 (2011).
- [10]. D. Fink, G. M. Hernandez, L. Alfonta. Ion track-based urea sensing // *Sens. Actuators, B*, 156 (1), p. 467-70 (2011).
- [11]. J. H. Santos Neto, L. O. dos Santos, A. M. P. dos Santos, C. G. Novaes, S. L. Costa Ferreira. A new and accessible instrumentation to determine urea in UHT milk using digital image analysis // *Food Chem.*, 381 (1), 132221 (2022).
- [12]. F. Shalileh, H. Sabahi, M. Dadmehr, M. Hosseini. Sensing approaches toward detection of urea adulteration in milk // *Microchem. J.*, 193, 108990 (2023).
- [13]. L. E. Scherger, V. Zanello, C. Lexow. Impact of Urea and Ammoniacal Nitrogen Wastewaters on Soil: Field Study in a Fertilizer Industry (Bahía Blanca, Argentina) // *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 107, p. 565-573 (2021).
- [14]. C. J. Gobler, A. Burson, F. Koch, Y. Tang, M. R. Mulholland. The role of nitrogenous nutrients in the occurrence of harmful algal blooms caused by *Cochlodinium polykrikoides* in New York estuaries (USA) // *Harmful Algae*, 17, p. 64-74 (2012).
- [15]. K. Lu, Z. Liu, R. Dai, W.S. Gardner. Urea dynamics during Lake Taihu cyanobacterial blooms in China // *Harmful Algae*, 84, p. 233-243 (2019).
- [16]. D. Curtin, M.E. Peterson, W. Qiu, P.M. Fraser. Predicting soil pH changes in response to application of urea and sheep urine // *J. Environ. Qual.*, 49(5), p.1445-1452 (2020).
- [17]. K. Y. Tserng, S. C. Kalhan. Gas chromatography/mass spectrometric determination of [15N]urea in plasma and application to urea metabolism study // *Anal. Chem.*, 54 (3), p. 489-491 (1982).
- [18]. C.J. Patton, S.R. Crouch. Spectrophotometric and Kinetics Investigation of the Berthelot Reaction for the Determination of Ammonia // *Anal. Chem.*, 49 (3), pp. 464-469 (1977).
- [19]. D.E. Gaddes, M.C. Demirel, W.B. Reeves, S. Tadigadapa. Remote calorimetric detection of urea via flow injection analysis // *Analyst*, 140(23), p. 8033-8040 (2015).
- [20]. M. S. Abdel-Latif, G. G. Guilbault. Fluorometric determination of urea by flow injection analysis // *J. Biotechnol.*, 14 (1), p. 53-61 (1990).
- [21]. D. Liu, M. E. Meyerhoff, H. D. Goldberg, R. B. Brown. Potentiometric ion- and bioselective electrodes based on asymmetric polyurethane membranes // *Anal. Chim. Acta*, 274 (1), pp. 37-46 (1993).
- [22]. S. B. Adeloju, S. J. Shaw, G. G. Wallace. Polypyrrole-based potentiometric biosensor for urea. Part 2. Analytical optimization // *Anal. Chim. Acta*, 281 (3), p. 621-627 (1993).
- [23]. B. Lakard, G. Herlem, S. Lakard, A. Antoniou, B. Fahys. Urea potentiometric biosensor based on modified electrodes with urease immobilized on polyethylenimine films // *Biosens. Bioelectron.*, 19 (12), p. 1641-1647 (2004).
- [24]. K. Chen, D. Liu, L. Nie, S. Yao. Determination of urea in urine using a conductivity cell with surface acoustic wave resonator-based measurement circuit // *Talanta*, 41 (12), p. 2195-2200 (1994).
- [25]. H. Sangodkar, S. Sukeerthi, R.S. Srinivasa, R. Lal, Q. Contractor. A biosensor array

based on polyaniline // *Anal. Chem.*, 68 (5), p. 779–783 (1996).

[26]. A. S. Jdanova, S. Poyard, A. P. Soldatkin, N. Jaffrezic-Renault, C. Martelet. Conductometric urea sensor. Use of additional membranes for the improvement of its analytical characteristics // *Anal. Chim. Acta*, 321(1), p. 35–40 (1996).

[27]. S. B. Adeloju, S. J. Shaw, G. G. Wallace. Polypyrrole-based amperometric flow injection biosensor for urea // *Anal. Chim. Acta*, 323, p. 107–113 (1996).

[28]. S. B. Adeloju, S. J. Shaw, G. G. Wallace. Pulsed-amperometric detection of urea in blood samples on a conducting polypyrrole-urease biosensor // *Anal. Chim. Acta*, 341, p. 155–160 (1997).

[29]. Rajesh, V. Bisht, W. Takashima, K. Kaneto. An amperometric urea biosensor based on covalent immobilization of urease onto an electrochemically prepared copolymer poly (N-3-aminopropyl pyrrole-co-pyrrole) film // *Biomaterials*, 26 (17), p. 3683–3690 (2005).

[30]. K. Yoneyama, Y. Fujino, T. Osaka, I. Satoh. Amperometric sensing system for the detection of urea by a combination of the pH-stat method and flow injection analysis // *Sens. Actuators B Chem*, 76, p. 152–157 (2001).

[31]. M. Kanungo, A. Kumar, A.Q. Contractor. Studies on electropolymerization of aniline in the presence of sodium dodecyl sulfate and its application in sensing urea // *J. Electroanal. Chem.*, 528, p. 46–56 (2002).

[32]. C. Jiménez, J. Bartrol, N. F. De Rooij, M. Koudelka-Hep. Use of photopolymerizable membranes based on polyacrylamide hydrogels for enzymatic microsensor construction // *Anal. Chim. Acta*, 351, p. 169–176 (1997).

[33]. S. Komaba, M. Seyama, T. Momma, T. Osaka. Potentiometric biosensor for urea based on electropolymerized electroinactive polypyrrole // *Electrochim. Acta*, 42 (3), pp. 383–388 (1997).

[34]. N. Tinkilic, O. Cubuk, I. Isildak. Glucose and urea biosensors based on all solid-state PVC–NH₂ membrane electrodes // *Anal. Chim. Acta*, 452, p. 29–34 (2002).

[35]. M. L. Hamlaoui, K. Reybier, M. Marrakchi, N. Jaffrezic-Renault, C. Martelet,

R. Kherrat, A. Walcarius. Development of a urea biosensor based on a polymeric membrane including zeolite // *Anal. Chim. Acta*, 466 (1), p. 39–45 (2002).

[36]. Wu J., Li X., Yan Y., Hu Y., Zhang Y., Tang Y. Protein adsorption onto nanozeolite: Effect of micropore openings // *J. Coll. Interface Sci.*, 2013, 406, p. 130–138.

[37]. Kaur B., Srivastava R. Synthesis of ionic liquids coated nanocrystalline zeolite materials and their application in the simultaneous determination of adenine, cytosine, guanine, and thymine // *Electrochim. Acta*, 2014, 133, p. 428–439.

[38]. B. Liu, R. Hu, J. Deng. Characterization of immobilization of an enzyme in a modified Y zeolite matrix and its application to an amperometric glucose biosensor // *Anal. Chem.*, 69 (13), p. 2343–2348 (1997).

[39]. B. Liu, Z. Liu, D. Chen, J. Kong, J. Deng. An amperometric biosensor based on the coimmobilization of horseradish peroxidase and methylene blue on a beta-type zeolite modified electrode // *Fresenius. J. Anal. Chem.* 367 (6), p. 539–544 (2000).

[40]. O. O. Soldatkin, I. S. Kucherenko, S. V. Marchenko, B. Ozansoy Kasap, B. Akata, A. P. Soldatkin, S. V. Dzyadevych. Application of enzyme/zeolite sensor for urea analysis in serum // *Mater. Sci. Eng. C*, 42, p. 155–160 (2014).

[41]. O. O. Soldatkin, I. S. Kucherenko, V. M. Pyeshkova, A. L. Kukla, N. Jaffrezic-Renault, A. V. El'skaya, S. V. Dzyadevych, A.P. Soldatkin. Novel conductometric biosensor based on three-enzyme system for selective determination of heavy metal ions // *Bioelectrochemistry*, 83 (1), p. 25–30 (2012).

[42]. I. S. Kucherenko, O. O. Soldatkin, B. O. Kasap, S. Öztürk, B. Akata, A. P. Soldatkin, S.V. Dzyadevych. Elaboration of Urease Adsorption on Silicalite for Biosensor Creation // *Electroanalysis*, 24 (6), p. 1380–1385 (2012).

[43]. N. Jaffrezic-Renault, S.V. Dzyadevych. Conductometric microbiosensors for environmental monitoring // *Sensors*, 8 (4), p. 2569–2588 (2008).

Стаття надійшла до редакції 15.10.2025 р.

UDC 543.555,575.15,616,612.466.22,616.61-008.64
DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2025.4.347720>

A NEW CONDUCTOMETRIC BIOSENSOR BASED ON RECOMBINANT UREASE ADSORBED ON SILICALITE

S. Marchenko¹, T. Velychko¹, O. Soldatkina¹, O. Soldatkin^{1,2}, B. Akata Kurç³, S. Dzyadevych^{1,4}

¹Institute of Molecular Biology and Genetics of the NAS of Ukraine,
150 Akademika Zabolotnoho St, Kyiv, 03680, Ukraine

²National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,
37 Beresteyskyi Ave, Kyiv, 03056, Ukraine

³Middle East Technical University,

İsmet İnönü Blvd, Ankara, 06800, Turkey

⁴Taras Shevchenko National University of Kyiv,
64 Volodymyrska St, Kyiv, 01003, Ukraine

e-mail: svmarchenkosc@ukr.net, taras.velychko@gmail.com, olgasoldatkina@yahoo.com,
soldatkinsasha@gmail.com, akata@metu.edu.tr, dzyad@yahoo.com

Abstract. This experimental work is devoted to the development of a new conductometric biosensor with improved analytical characteristics for the quantitative detection of urea. The bioselective element of the biosensor was manufactured by adsorption of recombinant urease on a conductometric transducer modified with a thin layer of nanoporous silicalite particles ($d = 250$ nm). During the development of the biosensor, the influence of solution parameters on its functioning was studied. Namely, the magnitude of the responses of the biosensor based on recombinant urease depending on the protein concentration in the analyzed solution was studied. It was checked how the responses of the proposed biosensor change at different ionic strength and buffer capacity of the analyzed solution. The developed biosensor had a number of important advantages, such as fast response, ease of use, no need to use toxic agents during fabrication, high signal reproducibility during continuous operation (RSD = 5%), extended linear range within 0.02–9 mM, and high operational stability for at least 19 days of storage. Accordingly, taking into account the good analytical parameters of the development, the high prospect of using the biosensor based on recombinant urease adsorbed on silicalite for medical diagnostics of urea concentration in complex multicomponent biological fluids was proven.

Keywords: urea, recombinant urease, kidney failure, medical diagnostics, conductometry, biosensor, silicalite, zeolites

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 англійською мовою і супроводжуватися файлами тексту і малюнків. Рукописи, які пропонуються авторами з України до видання англійською мовою обов’язково доповнюються україномовною. Електронна копія може бути надіслана електронною поштою.
2. Прийнятні формати тексту: MS Word (rtf, doc, docx).
3. Прийнятні графічні формати для рисунків: EPS, TIFF, BMP, PCX, WMF, MS Word і MS Graf, JPEG. Рисунки, які 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,
вул. Змієнка Всеволода, 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 – 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 2000 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 та англійською мовами.

Для авторів з закордону, які не володіють українською мовою, пп. 2–5 викладаються англійською мовою.

7. 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).

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

9. Список літератури повинен бути надрукований через 1,5 інтервали, з літературою, пронуме-

рованою в порядку її появи в тексті. Бібліографія друкується лише латиницею (кирилиця подається в транслітерації). Порядок оформлення літератури повинен відповідати вимогам Акредитаційної комісії України, наприклад:

[1]. I. M. Cidilkovskii. *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).

10. Виносок, якщо можливо, бажано уникати.

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

Кожен рисунок повинен бути розташований у тексті статті після посилання на нього та 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.

11. 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).

12. 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. PAPER PREPARATION REQUIREMENTS

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 or English, a hard copy and supplemented with a text file and figures. Manuscripts which are offered by authors from Ukraine to the edition in English are necessarily supplemented by Ukrainian version. An electronic copy may be submitted by e-mail.
2. Acceptable text formats: MS Word (rtf, doc, docx).
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,
Vice Editor-in-Chief, Odesa National
I. I. Mechnikov University, ISEPTC,
2 Zmiiienka Vsevoloda St., Odesa,
65082, Ukraine.

Phone/fax +38(048) 723-34-61,
e-mail: semst-journal@onu.edu.ua,
http://semst.onu.edu.ua

*All manuscripts are subject
to blind peer reviewing*

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 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 2000 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 and English languages.

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

7. 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).

8. 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).

9. 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 Accreditation Commission of Ukraine requirements, for example:

[1]. I. M. Cidilkovskii. *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).

10. 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.

11. 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).

12. 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 AUTHORS' ATTENTION

The ISSN abbreviation of the journal's title is

«Sens. elektron. mikrosist. tehnol.»

*Please, use the specified abbreviated title in your references
and bibliography to have your article properly referred to and cited.*

Комп'ютерна верстка – В. Г. Вітвицька

Підп. до друку 23.12.2025 р. Формат 60×84/8.

Ум.-друк. арк. 8,68. Наклад 50 пр.

Зам. № 3070.

Видавець:

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова

вул. Університетська, 12, м. Одеса, 65082, Україна

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 4215 від 22.11.2011 р.

Тел.: (048) 723 28 39, e-mail: druk@onu.edu.ua

Виготовлювач:

Видавничий дім «Гельветика»

вул. Інглезі, 6/1, м. Одеса, 65101, Україна

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 7623 від 22.06.2022 р

Тел.: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

e-mail: mailbox@helvetica.ua

Надруковано з готового оригінал-макета