

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

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

**СЕНСОРНА  
ЕЛЕКТРОНІКА  
І МІКРОСИСТЕМНІ  
ТЕХНОЛОГІЇ  
2024 – Т. 21, № 1**

*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

Свідоцтво про державну реєстрацію  
КВ № 8131

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

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

Видається за рішенням Вченої ради  
Одеського національного університету  
імені І. І. Мечникова  
*Протокол № 8 від 26.03.2024 р.*

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

**SENSOR  
ELECTRONICS  
AND MICROSYSTEM  
TECHNOLOGIES  
2024 – VOL. 21, No. 1**

*Scientific and Technical Journal*

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

UDC 681.586

Founded by Odesa I. I. Mechnykov  
National University

At support of the Ukrainian Physical  
Society

Certificate of State Registration  
KB № 8131

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

The Journal is reviewed by RJ “Djereło»  
is included in the International Base Index  
Copernicus, Cross Ref. Elibrary,  
Directory of Research  
Journal Indexing, General Impact Factor  
EBSCO

Publishes on the resolution of Odesa  
I. I. Mechnykov National University  
Scientific Council  
*Transaction No. 8, 26.03.2024*

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

## Редакційна колегія

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

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

## Editorial Board

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

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

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

## ЗМІСТ CONTENTS

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

*M. V. Strikha, R. S. Khilinich*  
ON THE PHYSICAL NATURE OF FIELD EMISSION FROM ZnO NANOSHEETS .. 4

*М. В. Стріха, Р. С. Хілініч*  
ПРО ФІЗИЧНУ ПРИРОДУ ПОЛЬОВОЇ ЕМІСІЇ З НАНОАРКУШІВ ZnO

### **Матеріали для сенсорів Sensor materials**

*V. V. Zaika, N. K. Shvachko*  
MORPHOLOGICAL, OPTICAL PROPERTIES AND ELECTRONIC STRUCTURE OF ZnO THIN FILMS DOPED WITH ALUMINUM ..... 11

*В. В. Заїка, Н. К. Швачко*  
МОРФОЛОГІЧНІ, ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ЕЛЕКТРОННА БУДОВА ТОНКИХ ПЛІВОК ZnO ДОПОВАНИХ АЛЮМІНІЄМ

*V. R. Kolbunov, M. P. Trubitsyn, A. O. Diachenko*  
ELECTRICAL SWITCHING IN GLASS-CERAMIC STRUCTURES BASED ON VANADIUM DIOXIDE ..... 21

*В. Р. Колбунов, М. П. Трубіцин, А. О. Дяченко*  
ЕЛЕКТРИЧНЕ ПЕРЕМИКАННЯ В СКЛОКЕРАМІЧНИХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВІ ДІОКСИДУ ВАНАДІЮ

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

*L. I. Nykyruy, R. V. Ilnytskyi, M. F. Pavlyuk*  
MODELING OF ANALOG-TO-DIGITAL SIGNAL CONVERTERS FOR SENSOR MICROSYSTEMS IN THE MICROWIND SOFTWARE ..... 29

*Л. І. Нукируй, Р. В. Ільницький, М. Ф. Павлюк*  
МОДЕЛЮВАННЯ АНАЛОГО-ЦИФРОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СИГНАЛІВ ДЛЯ СЕНСОРНИХ МІКРОСИСТЕМ У ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ MICROWIND

**XI International conference “Topical problems of semiconductor physics” ..... 36**  
**XI Міжнародна конференція «Актуальні проблеми фізики напівпровідників»**

**VI All-Ukrainian scientific and practical conference of higher education graduates and young scientists “Physical principles of modern technologies in the construction industry” ..... 39**

**VI Всеукраїнська науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих вчених «Фізичні основи сучасних технологій в будівельній індустрії»**

**Інформація для авторів. Вимоги до оформлення статей у журнал..... 42**  
**Information for authors.**  
**Paper preparation requirements ..... 45**

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

---

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

---

---

PACS85.30.De, 85.30.Kk, 85.30.Mn

DOI <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.1.300941>

### ПРО ФІЗИЧНУ ПРИРОДУ ПОЛЬОВОЇ ЕМІСІЇ З НАНОАРКУШІВ ZnO

*М. В. Стріха<sup>1,2</sup>, Р. С. Хілініч<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Київський національний університет ім. Тараса Шевченка,  
факультет радіофізики, електроніки і комп'ютерних систем,  
пр. Глушкова, 4г, Київ, Україна;

<sup>2</sup> Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України,  
пр. Науки, 41, Київ, Україна.

### ПРО ФІЗИЧНУ ПРИРОДУ ПОЛЬОВОЇ ЕМІСІЇ З НАНОАРКУШІВ ZnO

*М. В. Стріха, Р. С. Хілініч*

**Анотація.** Проведений аналіз дозволяє встановити фізичну природу процесу польової емісії з наноркушів ZnO. Показано, що можливому діапазону ефективних значень роботи виходу з вершини наноркуша відповідають значення коефіцієнту підсилення поля  $\beta$  порядку 20000. Таким значенням  $\beta$  і висоті наноркуша порядку мкм відповідають субнанометрові величини радіуса вершини наноркуша, що добре узгоджується з експериментально відомим фактом: польова емісія з наноструктурованої поверхні майже вся відбувається з кількох верхніх атомів нанопротрузії. Отже, ефективна емісія відбувається лише з вельми незначної частини загальної поверхні катоду, проте велике значення коефіцієнта підсилення поля  $\beta$  забезпечує помітне значення густини емісійного струму порядку  $3 \cdot 10^{-4}$  А/м<sup>2</sup> для поля вмикання порядку  $3 \cdot 10^6$  В/м.

**Ключові слова:** польова емісія, наноркуш, коефіцієнт підсилення поля, робота виходу

### ON THE PHYSICAL NATURE OF FIELD EMISSION FROM ZnO NANOSHEETS

*M. V. Strikha, R. S. Khilinich*

**Abstract.** The performed analysis allows us to determine the physical nature of the field emission process from ZnO nanosheets. It is shown that the possible range of effective values of the work function at the top of the nanosheet corresponds to the field enhancement factor  $\beta$  of the order

© М. В. Стріха, Р. С. Хілініч, 2024

of 20000. Such values of  $\beta$  and a nanosheet height of the order of  $\mu\text{m}$  correspond to subnanometer values of the radius of the nanosheet top, which is in good agreement with the experimentally known fact that the field emission from the nanostructured surface almost all comes from the top few atoms of the nanoprotrusion. Thus, the effective emission occurs only from a very small part of the total cathode surface, but the large value of the field enhancement factor  $\beta$  provides a noticeable emission current density of the order of magnitude of  $3 \cdot 10^{-4} \text{ A/m}^2$  for a turn on field of the order of magnitude of  $3 \cdot 10^6 \text{ V/m}$ .

**Keywords:** field emission, nanosheet, field enhancement coefficient, work function

Масивний ZnO є широкощільним напівпровідником із шириною забороненої зони за кімнатної температури в 3,37 еВ і зазвичай має електронну провідність, обумовлену структурними дефектами [1]. Низька вартість та здатність утворювати наноаркуші робить оксид цинку перспективним матеріалом для сенсорики, сучасної фото- та вакуумної електроніки [2–4]. У [4] високоефективний катод для польової емісії було створено на основі недорогого методу низькотемпературного хімічного розчину на скляній підкладці у варіанті наноаркушів ZnO та наноаркушів, декорованих наночастинками срібла Ag. Було показано, що ефективність катоду в обох випадках суттєво зростає в умовах УФ освітлення.

Однак наведені авторами [4] значення коефіцієнта підсилення поля (в діапазоні 3000–5000) викликають сумнів. Річ у тому, що для реконструкції цих цифр автори використовували в усіх випадках найпростішу формулу Фаулера-Нордгейма для металів, хоч для напівпровідників (тим більше таких широкозонних, як оксид цинку) вона зазнає суттєвих модифікацій [5]. Наведена ними модель також не враховувала геометрії системи, де емісія відбувається лише з малої частини загальної площі катоду. Не було враховано зміни роботи виходу на краї наноаркуша ZnO, з якого й відбувається емісія, а також зміни роботи виходу оксиду цинку внаслідок УФ генерації великої кількості нерівноважних носіїв.

В цій роботі ми спробуємо теоретично змодельовати катод для польової емісії, створений у [4], вдаючись до реалістичніших і фізичніших наближень. Зокрема, ми, у відповідності до [6–8], вважатимемо, що емісія насправді відбувається лише з країв наноаркушів ZnO, де

кривизна поверхні призводить до появи посиленого локального поля  $F_{loc}$ , пов'язаного з напруженістю поля між анодом і катодом

$F = V/l$  (де  $V$  – напруга на аноді,  $l$  – відстань між анодом і катодом) співвідношенням

$$F_{loc} = \beta F. \quad (1)$$

В (1) введено коефіцієнт підсилення поля  $\beta$ , обумовлений геометрією емісійної поверхні.

Топологію реальної емісійної поверхні, дослідженої в [4], зображено на рис. 1. Наноаркуші ZnO, за даними [4], мають довжину близько 1,8  $\mu\text{m}$  і діаметр заокруглення верхнього краю 8 нм.

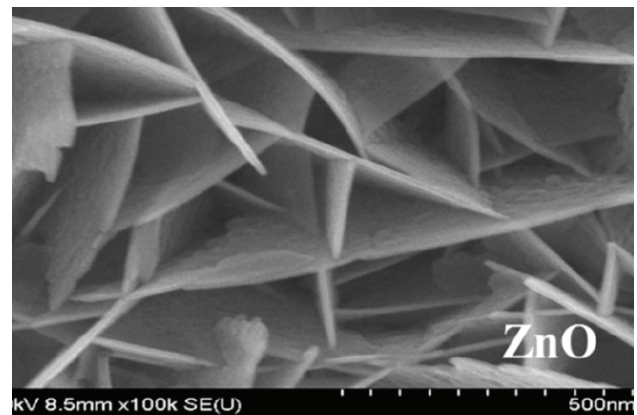


Рис. 1. Структура емісійної поверхні катоду з наноаркушів ZnO (адаптовано з [4]).

У [4] для реконструкції одержаної залежності густини емісійного струму від прикладеного поля було використано стандартну формулу Фаулера-Нордгейма [5] для холодної емісії з металу:

$$J = \frac{e^3}{16\pi^2 \hbar \Phi} \beta^2 F^2 \exp\left[-\frac{4\sqrt{2m_o} \Phi^{3/2}}{3e\hbar} \frac{\Phi^{3/2}}{\beta F}\right]. \quad (2)$$

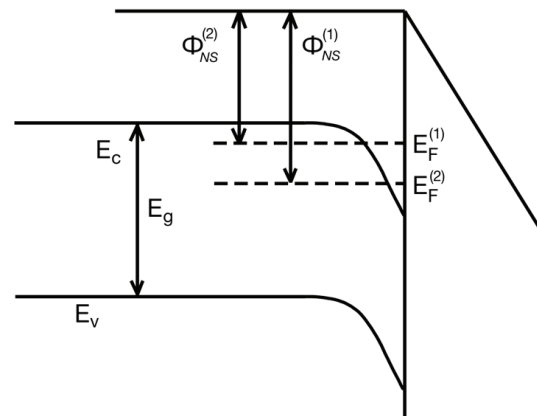
Тут  $e$  і  $m_0$  – заряд і маса вільного електрона,  $\Phi$  – робота виходу. Однак, як було показано в [5], ця формула не описує емісії з напівпровідника, яким є ZnO. До того ж, вона не враховує того, що реально емісія відбувається лише з малої частини наноструктурованої поверхні, зображеної на рис. 1 – тієї, де поблизу краю наноаркуша реалізується велике локальне поле (1). Решта поверхні взагалі не робить помітного внеску в струм холодної емісії для дослідженого в [4] діапазону полів між анодом і катодом.

Тому для емісії з наноаркушу напівпровідника ZnO скористаємося з модифікації формули, виведеної в [10] для випадку, зображеного на рис. 2: різкий вигин зон у матеріалі  $n$ -типу під впливом прикладеного зовнішнього поля утворює приповерхневу 2D квантову яму, у якій зосереджені електрони:

$$J_{NS} = \frac{\hbar}{4em_e} \left( \frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_s} \right)^2 M_{NS} \beta^2 F^2 \exp \left[ - \frac{4\sqrt{2m_o}}{3\hbar e} \frac{\Phi_{NS}^{3/2}}{\beta F} \right]. \quad (3)$$

Тут  $\varepsilon_o$  – діелектрична провідність вакууму в одиницях SI,  $\varepsilon_s$  – відносна діелектрична проникність напівпровідника. Звернімо увагу на те, що в експоненті (3), як і в експоненті формули Фаулера-Нордгейма (2), стоїть маса вільного електрона, оскільки електрон тунелює з напівпровідника в вакуум. Натомість у передекспоненті стоїть ефективна маса електрона в ZnO  $m_e = 0,23 m_0$  [1]. Множник  $M_{NS}$  є часткою поверхні, з якої відбувається ефективна холодна емісія; з вигляду рис.1 зрозуміло, що  $M_{NS} \ll 1$ . Індекс  $NS$  у формулі (3) означає емісію з наноаркушів (англ. nanosheets).

Слід відзначити: з підвищенням швидкості зона-зонної генерації носіїв УФ-випромінюванням квазірівень Фермі для електронів піднімається вгору, що відповідає (див. рис. 2) зменшенню роботи виходу для електронів у наноаркушах оксиду цинку порівняно з рівноважним значенням  $\Phi_{NS} = 4,9$  eV [11], що в свою чергу призводить до експериментально спостереженого в [4] збільшення густини емісійного струму та зменшення поля вмикання, коли цей струм починає помітно зростати.



**Рис. 2.** Емісія електронів з тонкого збагаченого основними носіями-електронами 2D-шару в ZnO  $n$ -типу. При збільшенні швидкості зона-зонної генерації носіїв УФ-випромінюванням квазірівень Фермі для електронів піднімається вгору, цьому відповідає зменшення роботи виходу;  $E_F^{(2)} > E_F^{(1)}$  відповідає  $\Phi_{NS}^{(2)} < \Phi_{NS}^{(1)}$ .

Звернемо увагу, що локальне значення  $\Phi_{NS}$  біля краю наноаркуша може бути й суттєво меншим від цього рівноважного значення. Це пов'язано з тим, що будь-яке вістря неминуче включає області з менш щільним пакуванням атомів, де потенціальний бар'єр для електронів, що виходять у вакуум, нижчий. На цьому було, зокрема, побудовано принцип дії електронного польового мікроскопа, який широко використовувався, починаючи з 1936 р., для дослідження структури тугоплавких металів [12].

Побудована в [13] феноменологічна модель показує, що робота виходу для поверхні, зображеної на рис. 2, пропорційна  $\sqrt{n/A}$ , де  $n$  – число електронів, що передається в 2D електронний газ при поверхні від одного поверхневого атома,  $A$  – поверхнева площа, що припадає на такий атом. Тому на краї наноаркуша, радіус якого сягає порядку кількох нм, значення роботи виходу може виявитися дещо нижчим від табличного значенням  $\Phi_{NS} = 4,9$  eV.

Виходячи з цього, експериментальну криву залежності густини емісійного струму від поля [4] нами з використанням інтегрованого середовища розробки PyCharm та мови Python припасовано до формули (3), див. рис. 3. Причому кожному значенню роботи

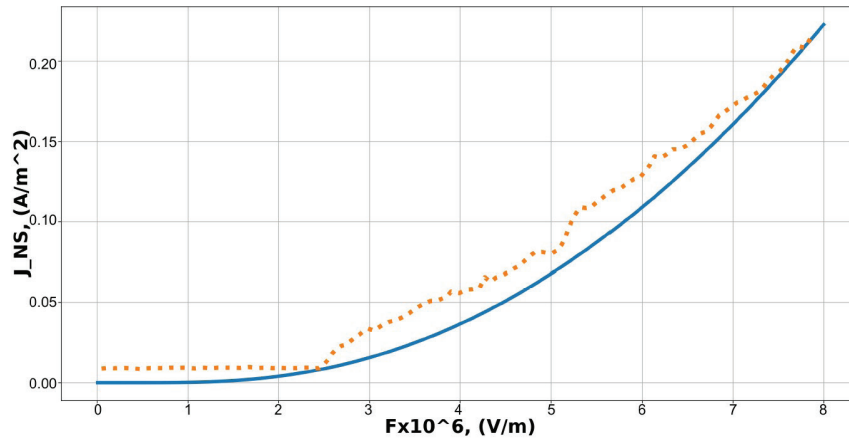


Рис. 3. Залежність густини емісійного струму з нанокрушів ZnO від напруженості електричного поля: експериментальна крива з [4] (пунктир); теоретична крива для параметрів, наведених у Таблиці 1 (суцільна лінія).

виходу  $\Phi_{NS}$  з обраного нами реалістичного діапазону зміни цієї величини (в залежності від реальної структури краю нанокруша) відповідає власне значення коефіцієнту підсилення поля  $\beta$ , та коефіцієнту ефективної частки емісійної поверхні  $M_{NS}$  (див. таблицю 1).

ту в [8, 14], легко показати, що в наближенні лінійного розподілу густини заряду по висоті нанокруша  $h$  коефіцієнт підсилення поля над його вершиною, що має радіус  $R_o$ , дорівнює

$$\beta_a \approx \frac{2h/R_o}{\ln(4h/R_o) - 2}. \quad (4)$$

Таблиця 1.

$\Phi_{NS}$ (eV)	$B$	$M_{NS} (\cdot 10^{-13})$
3,5	17116	2,02
3,7	18517	1,73
3,9	19268	1,62
4,1	19982	1,52
4,3	21044	1,38
4,5	22033	1,27
4,7	22510	1,24
4,9	23535	1,14

Таблиця 1 дає уявлення про фізичну природу процесу емісії з нанокрушів ZnO. Можливому (виходячи з оцінки за [13]) діапазону ефективних значень  $\Phi_{NS}$  відповідають значення коефіцієнта підсилення поля, в декілька разів вищі за отримані в [4] (що пояснюється різною структурою передекспонент формули (2), використаної в [4], і (3), використаної в нашій роботі). Використовуючи методику, розвину-

Значенням  $\beta$  з Таблиці 1 і експериментальному значенню висоти  $h$  порядку мкм повинні за (4) відповідати субнанометрові величини радіуса вершини нанокруша, що добре узгоджується з експериментально відомим фактом: польова емісія з наноструктурованої поверхні майже вся відбувається з кількох верхніх атомів нанопротрузії. Такому малому значенню добре відповідає і мала величина множника  $M_{NS}$ . Це означає, що ефективна емісія відбувається лише з вельми незначної частини загальної поверхні катоду, проте велике значення коефіцієнта підсилення поля забезпечує помітне значення густини струму порядку  $3 \cdot 10^{-4}$  А/м<sup>2</sup> для поля вмикання порядку  $3 \cdot 10^6$  В/м.

Проведений аналіз дозволяє встановити фізичну природу процесу польової емісії з нанокрушів ZnO, що можуть розглядатися як перспективні й недорогі емітери для приладів нового покоління.

## Список використаної літератури

- [1]. M. Oshikiri, Y. Imanaka, F. Aryasetiawan, G. Kido. Comparison of the electron effective mass of the n-type ZnO in the wurtzite structure measured by cyclotron resonance and calculated from first principle theory. *Physica B: Condensed Matter* **298**, 472–476 (2001).
- [2]. Yanli Kang, Feng Yu, Lu Zhang, Wenhao Wang, Long Chen, Yingchun Li. Review of ZnO-based nanomaterials in gas sensors. *Solid State Ionics* **360**, 115544 (2021).
- [3]. C. C. Yang, H. C. Yu, Y. K. Su, M. Y. Chuang, C. H. Hsiao, T. H. Kao. Noise Properties of Ag Nanoparticle-Decorated ZnO Nanorod UV Photodetectors. *IEEE Photonics Technol. Lett.* **28**, 379–382 (2016).
- [4]. Sheng-Joue Young, Yi-Hsing Liu, and Jen-Tse Chien. Improving Field Electron Emission Properties of ZnO Nanosheets with Ag Nanoparticles Adsorbed by Photochemical Method. *ACS Omega* **3**, 8135–8140 (2018).
- [5]. Anatoliy Evtukh, Hans Hartnagel, Oktay Yilmazoglu, Hidenori Mimura and Dimitris Pavlidis. *Vacuum Nanoelectronic Devices: Novel Electron Sources and Applications*. John Wiley & Sons, Ltd., 2015.
- [6]. Filippo Giubileo, Antonio Di Bartolomeo, Laura Iemmo, Giuseppe Luongo and Francesca Urban. Field Emission from Carbon Nanostructures. *Applied Sciences*. **8**, 526 (2018).
- [7]. Debabrata Biswas. A universal formula for the field enhancement factor. *Physics of Plasmas*. **25**, 043113 (2018).
- [8]. A. M. Horiachko, D. O. Korzh, D. V. Slobodianiuk, M. V. Strikha. Polova emisiiia z perspektyvnykh katodiv na osnovi nanostrukturovanoho SiC: novyi pidkhid do vrakhuvannia koefitsiienta posylennia polia. *Fizyka i khimiia tverdoho tila*. **23**, 347–352 (2022) (in Ukrainian).
- [9]. Mathias Schnippering, Michel Carrara, Annette Foelske, Rudiger Kotz, and David J. Fermin. Electronic properties of Ag nanoparticle arrays. A Kelvin probe and high resolution XPS study. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **9**, 725–730 (2007).
- [10]. A. M. Goriachko, M. V. Strikha. Nanostructured SiC as a promising material for the cold electron emitters. *Semiconductor physics, quantum electronics and optoelectronics*. **24**, 355–361 (2021).
- [11]. Xin Yin, Yeqi Shi, Yanbing Wei, Yongho Joo, Padma Gopalan, Izabela Szlufarska, Xudong Wang. Unit Cell-Level Thickness Control of Single-Crystalline Zinc Oxide Nanosheets Enabled by Electrical Double Layer Confinement. *Langmuir*, **33**, 7708–7714 (2017).
- [12]. E. W. Muller, T. T. Tsong. *Fild Ion Microscopy. Principles and Applications*. Elsevier, New York, 1969.
- [13]. I. Brodie, S. H. Chou, H. Yuan. A general phenomenological model for work function. *Surface Science*, **625**, 112–118 (2014).
- [14]. Debabrata Biswas, Gaurav Singh, Rajasree Ramachandran. The cosine law of field enhancement factor variation: Generic emitter shapes. *Physica E: Low dimensional Systems and Nanostructures*. **109**, 179–182 (2019).

Стаття надійшла до редакції 21.03.2024 р.



PACS85.30.De, 85.30.Kk, 85.30.Mn

DOI <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.1.300941>**ON THE PHYSICAL NATURE OF FIELD EMISSION FROM ZnO NANOSHEETS***M. V. Strikha<sup>1,2</sup>, R. S. Khilinich<sup>1</sup>*<sup>1</sup> Taras Shevchenko National University of Kyiv, Faculty of Radiophysics, Electronics and Computer Systems, pr. Akademika Hlushkova 4g, 03022 Kyiv, Ukraine<sup>2</sup> V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, pr. Nauky 41, 03028 Kyiv, Ukraine**Summary**

Low cost and the ability to form nanosheets make the semiconductor zinc oxide a promising material for sensors, modern photonics, and vacuum electronics. In [Sheng-Joue Young et al, ACS Omega 3, 8135–8140 (2018)], a high-performance cathode for field emission was created based on an inexpensive low-temperature chemical solution method on a glass substrate in the form of ZnO nanosheets and nanosheets decorated with silver Ag nanoparticles.

Since the Fowler-Nordheim formula derived for metals does not describe cold emission from a semiconductor, for theoretically modeling of the nanostructured ZnO-based cathode we have used the formula for the emission current density from an *n*-type semiconductor, where a sharp bending of the bands under the influence of an applied external field forms a near-surface 2D quantum well, in which electrons are concentrated:

$$J_{NS} = \frac{\hbar}{4em_e} \left( \frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_s} \right)^2 M_{NS} \beta^2 F^2 \exp \left[ - \frac{4\sqrt{2m_o}}{3\hbar e} \frac{\Phi_{NS}^{3/2}}{\beta F} \right].$$

Here,  $\varepsilon_o$  is the vacuum dielectric constant in SI units,  $\varepsilon_s$  is the relative permittivity of the semiconductor,  $m_o$  and  $m_e$  are the free electron mass and effective electron mass in the semiconductor,  $\Phi_{NS}$  is the work function of the semiconductor,  $F$  is the electric field strength,  $\beta$  is the electric field enhancement coefficient near the edge of the nanosheet, and the  $M_{NS}$  factor is the fraction of the surface from which effective cold emission occurs.

It is shown that the possible range of effective values of the work function at the top of the nanosheet corresponds to the values of the field enhancement coefficient  $\beta$  of the order of magnitude of 20000. Such values of  $\beta$  and a nanosheet height of the order of  $\mu\text{m}$  correspond to subnanometer values of the radius of the nanosheet top, which is in good agreement with the experimentally known fact: that the field emission from the nanostructured surface almost all occurs from the top few atoms of the nanoprotrusion. Thus, the effective emission occurs only from a very small part of the total cathode surface, but the large value of the field enhancement coefficient  $\beta$  provides a noticeable current density of the order of  $3 \cdot 10^{-4} \text{ A/m}^2$  for a turn on field of the order of  $3 \cdot 10^6 \text{ V/m}$ .

The performed analysis allows us to determine the physical nature of the field emission process from ZnO nanosheets, which can be considered as promising and inexpensive emitters for new generation devices.

**Keywords:** field emission, nanosheet, field enhancement coefficient, work function

PACS85.30.De, 85.30.Kk, 85.30.Mn

DOI <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.1.300941>**ПРО ФІЗИЧНУ ПРИРОДУ ПОЛЬОВОЇ ЕМІСІЇ З НАНОАРКУШІВ ZnO***М. В. Стрїха<sup>1,2</sup>, Р. С. Хїлінич<sup>1</sup>*<sup>1</sup> Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, факультет радіофізики, електроніки і комп'ютерних систем, пр. Глушкова, 4г, Київ, Україна;<sup>2</sup> Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України, пр. Науки, 41, Київ, Україна.**Реферат**

Низька вартість та здатність утворювати наноаркуші робить напівпровідник оксид цинку перспективним матеріалом для сенсорики, сучасної фото- та вакуумної електроніки. У роботі [Sheng-Joue Young et al, *ACS Omega* **3**, 8135–8140 (2018)] високоефективний катод для польової емісії було створено на основі недорогого методу низькотемпературного хімічного розчину на скляній підкладці у варіанті наноаркушів ZnO та наноаркушів, декорованих наночастинками срібла Ag.

Оскільки виведена для металів формула Фаулера-Нордгейма не описує холодної емісії з напівпровідника, для теоретичного моделювання наноструктурованого катода на основі ZnO ми використали формулу для густини емісійного струму з напівпровідника *n*-типу, де різкий вигин зон під впливом прикладеного зовнішнього поля утворює приповерхневу 2D квантову яму, у якій зосереджені електрони:

$$J_{NS} = \frac{\hbar}{4em_e} \left( \frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_s} \right)^2 M_{NS} \beta^2 F^2 \exp \left[ - \frac{4\sqrt{2m_o}}{3\hbar e} \frac{\Phi_{NS}^{3/2}}{\beta F} \right].$$

Тут  $\varepsilon_o$  – діелектрична провідність вакууму в одиницях SI,  $\varepsilon_s$  – відносна діелектрична проникність напівпровідника,  $m_o$  та  $m_e$  – маса вільного електрона та ефективна маса електрона в напівпровіднику,  $\Phi_{NS}$  – робота виходу напівпровідника,  $F$  – напруженість електричного поля,  $\beta$  – коефіцієнт посилення електричного поля біля краю наноаркуша, множник  $M_{NS}$  є часткою поверхні, з якої відбувається ефективна холодна емісія.

Показано, що можливому діапазону ефективних значень роботи виходу з вершини наноаркуша відповідають значення коефіцієнту підсилення поля порядку 20000. Таким значенням  $\beta$  і висоті наноаркуша порядку мкм відповідають субнанометрові величини радіуса вершини наноаркуша, що добре узгоджується з експериментально відомим фактом: польова емісія з наноструктурованої поверхні майже вся відбувається з кількох верхніх атомів нанопротрузії. Отже, ефективна емісія відбувається лише з вельми незначної частини загальної поверхні катода, проте велике значення коефіцієнта підсилення поля забезпечує помітне значення густини струму емісії порядку  $3 \cdot 10^{-4}$  А/м<sup>2</sup> для поля вмикання порядку  $3 \cdot 10^6$  В/м.

Проведений аналіз дозволяє встановити фізичну природу процесу польової емісії з наноаркушів ZnO, що можуть розглядатися як перспективні й недорогі емітери для приладів нового покоління.

**Ключові слова:** польова емісія, наноаркуш, коефіцієнт підсилення поля, робота виходу

# МАТЕРІАЛИ ДЛЯ СЕНСОРІВ

---

## SENSOR MATERIALS

---

---

PACS77.55.hf, 33.60.+q, 79.60.-i, 82.80.Pv, 68.37.Hk, 81.15.Cd, 68.37.-d, 78.20.-e, 78.66.-w

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.1.300942>

### MORPHOLOGICAL, OPTICAL PROPERTIES AND ELECTRONIC STRUCTURE OF ZnO THIN FILMS DOPED WITH ALUMINUM

*V. V. Zaika<sup>1</sup>, N. K. Shvachko<sup>2</sup>*

Kurdyumov Institute for Metal Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 36,  
Academician Vernadsky Blvd, 03142 Kyiv, Ukraine

<sup>1</sup> +38(068)774-79-32, [zaikavladimir228@gmail.com](mailto:zaikavladimir228@gmail.com)

<sup>2</sup> +38(095)550-48-99, [nazarii1999@gmail.com](mailto:nazarii1999@gmail.com)

### MORPHOLOGICAL, OPTICAL PROPERTIES AND ELECTRONIC STRUCTURE OF ZnO THIN FILMS DOPED WITH ALUMINUM

*V. V. Zaika, N. K. Shvachko*

**Abstract.** This paper presents the results of investigation of aluminum-doped zinc oxide thin films obtained by radio-frequency magnetron deposition on a glass substrate. It was shown by energy dispersion X-ray spectroscopy that the average aluminum content in the thin films was 0.2–0.8 at.%. An increase in the average grain size with increasing aluminum concentration was shown, and column-like growth of the films was established using microscopic images. Investigation of the electronic structure showed a redistribution of intensity in the O 1s spectrum with aluminum doping. The valence band spectra were also obtained, and theoretical calculations were performed within the framework of density functional theory to better understanding the results. Using a spectrophotometer, the transparency of the films obtained after aluminum doping was shown to increase. With the help of the Tauc method, the band gap was determined to be 3.41 eV, while DFT calculations showed a band gap of 1.25 eV.

**Keywords:** nanostructured thin films, RF magnetron sputtering, doped, electronic structure

## МОРФОЛОГІЧНІ, ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ЕЛЕКТРОННА БУДОВА ТОНКИХ ПЛІВОК ZnO ДОПОВАНИХ АЛЮМІНІЄМ

*В. В. Заїка, Н. К. Швачко*

**Анотація.** В даній роботі представлені результати досліджень тонких плівок окисі цинку допованих алюмінієм, які отримані методом радіочастотного магнетронного нанесення на скляній підкладці. За допомогою енергодисперсійного рентгенівського аналізу показано, що середній вміст алюмінію в тонких плівках становив 0.2–0.8 at.%. Було показано ріст середнього розміру нанозерен при збільшенні концентрації алюмінію, а також за допомогою мікроскопічних знімків поперечного перерізу було встановлено стовпчастий ріст плівок. Дослідження електронної будови показали перерозподіл інтенсивності в  $O 1s$  спектрі після допування алюмінієм. Також були отримані спектри валентної зони, та проведені теоретичні розрахунки в рамках теорії функціоналу густини для кращої інтерпретації отриманих результатів. Методом Таука була визначена ширина забороненої зони яка становила 3.41eВ, тоді як в рамках DFT розрахунків заборонена зона становила 1.25 eВ.

**Ключові слова:** наноструктуровані тонкі плівки, ВЧ магнетронне розпилення, легування, електронна структура

### Introduction

Zinc oxide (ZnO) is a well-known material due to its wide range of applications, that include varistors, additives for paints, cement, and rubber, thin-film transistors, visible-blind photodetectors, gas sensors, transparent conductive oxides, and other devices. These diverse applications are due to a set of unique properties of ZnO. These include a straight, wide band gap, a high exciton binding energy, good transparency in the visible and infrared spectrum, low cost of ZnO, and environmental safety.

ZnO thin films can be obtained by various physical and chemical methods of deposition, in particular, sol-gel, radiofrequency magnetron deposition, and molecular beam epitaxy [1–3]. Among the above methods, radiofrequency magnetron deposition stands out due to the simplicity of the process, homogeneity of the films obtained, and their elemental purity. Additionally, the synthesis can be economically optimized by eliminating the process of baking of the ceramic target, which requires high temperatures and, therefore, significant energy consumption. One way to realize this is the production of thin films using magnetron deposition of a pressed powder target.

Despite a considerable number of studies of aluminum-doped ZnO films [4–6], the effect of aluminum on morphological properties and electronic structure is still not sufficiently covered.

Based on this, the objectives of this work are:

- Synthesize ZnO thin films as well as ZnO films doped with aluminum using pressed powder targets.
- Study their morphological and optical properties and electronic structure.
- Determine the chemical composition of the obtained films.
- Determine the effect of aluminum on the morphological and optical properties and establish its influence on the electronic structure.

### Methods of synthesis and characterization

ZnO thin films were deposited by radiofrequency magnetron deposition using a high-purity target of pressed ZnO (99.9%) powder with a diameter of 4.0 cm (12.57 cm<sup>2</sup>). Aluminum doping was performed by mixing ZnO (99.9%) and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (>98%) powders in a weight ratio of 99:1, 98:2, 97:3 for ZnO1%, ZnO2%, and ZnO3% samples, respectively, and then mixing

the powders for an hour. A microscopy glass slide (1x1 cm<sup>2</sup>) was used as a substrate. It was cleaned beforehand with acetone and isopropyl alcohol in an ultrasonic bath for 20 minutes and rinsed with deionized water. After that, the glass was transported to a vacuum chamber and placed above the ZnO target at a distance of 4.5 cm. A pre-vacuum and a diffusion pump equipped with a nitrogen trap were used to obtain a high vacuum of  $5.0 \times 10^{-5}$  Pa. Argon (99.9%) was used to produce the plasma. The pressure inside the chamber during deposition was  $1.0 \times 10^{-2}$  Pa. The films were deposited at a magnetron power of 100 W. The target was pre-deposited for 10 minutes to clean its surface, and then the films were deposited during 60 minutes and under the identical synthesis conditions.

The morphological analysis of the surface after the growth of ZnO thin films was performed by scanning electron microscopy (SEM) using a Tescan Mira 3 microscope. This microscope is equipped with an EDX detector, which allows to perform the chemical analysis.

The X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) spectra of the core levels of the samples were obtained on a JEOL XPS2400 X-ray spectrometer. The operating pressure during the experiment was no more than  $1.0 \times 10^{-7}$  Pa. The radiation of the magnesium anode with the energy of the Mg K $\alpha$  line of 1253.6 eV was used. The energy resolution was 0.1 eV. The charge correction was performed by using the C1s spectral line centroid with an energy of 284.0 eV as a reference point.

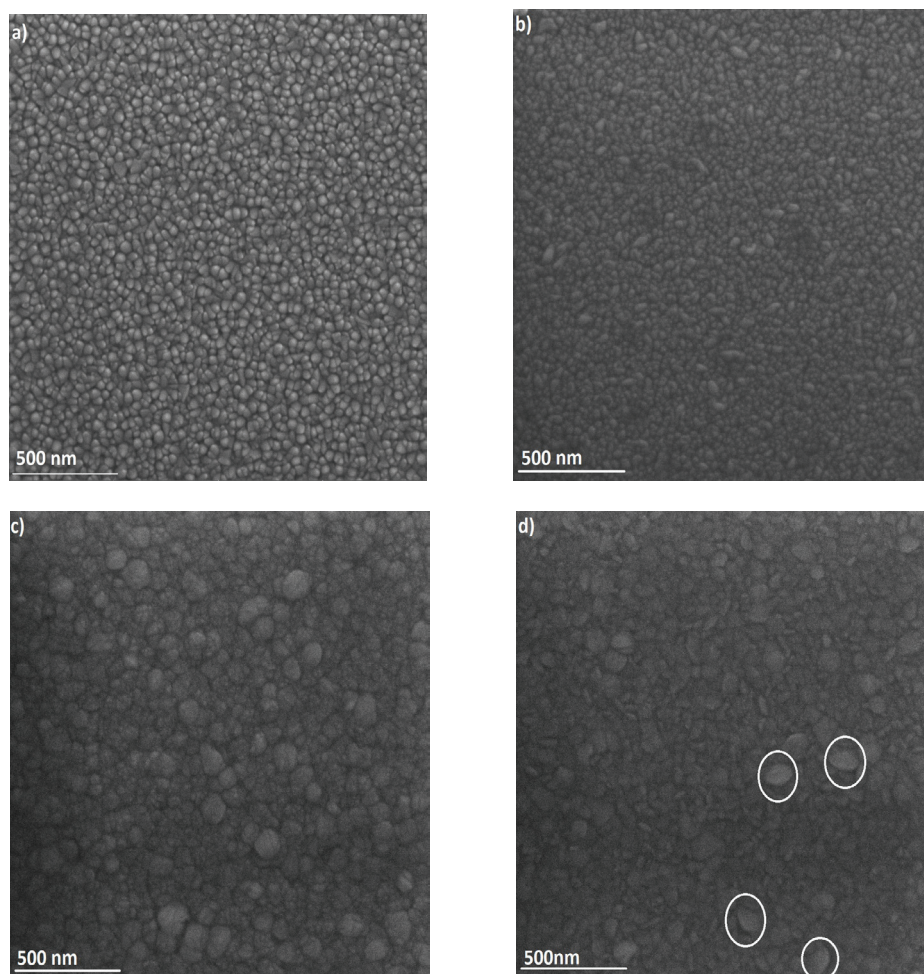
We used the Quantum Espresso Simulation Package [7] for all density functional theory (DFT) calculations with projector augmented wave (PAW) pseudopotentials [8]. We used a plane wave cut-off energy of 816 eV and a  $9 \times 9 \times 3$  Gamma-centered k-point grid for structural optimizations and a  $32 \times 32 \times 16$  Gamma-centered k-point grid for density of states calculations. All calculations are done using the generalized gradient approximation (GGA) based exchange-correlation functional PBEsol [9], with a Hubbard-U of 7.5 eV (as per [10]) applied to the Zn-d states as implemented with the Dudarev[11] approach unless otherwise stated.

## Results and discussion

The morphological features of the thin films were studied by SEM (Fig. 1). The morphology of the ZnO film consists of densely packed grains of almost spherical shape. The ZnO1% film also consists of almost spherical grains, but the coalescence of some grains can be observed, resulting in the formation of elongated particles with a more elliptical shape. It is easy to notice a significant increase in nanograins size for the ZnO2% film due to a higher degree of coalescence. However, for the ZnO3% film, the number of large grains as well as their size decreased. It can be observed that a small number of petal-like grains appear (Fig. 1 d), which may indicate a change in the growth kinetics. It is worth noting the developed nanoscale structure of the surface of obtained films despite their relative smoothness. Thus, it can be assumed that the addition of aluminum leads to a decrease in the surface area, which can alter both the adsorption properties of the film and the surface energy.

In order to estimate the thickness of the samples, the surfaces of the films were locally destroyed by scratching the surface with a scalpel (Fig. 2). The thicknesses of the films were 270.0, 292.0, 410.0, 349.0 nm for ZnO, ZnO1%, ZnO2%, and ZnO3% samples, respectively. The increase in the growth rate may be due to the greater number of electrons in an Al<sup>3+</sup> ion compared to Zn<sup>2+</sup>, which affects the number of nucleation centers in the initial stages of growth. From the cross-sectional image, the column-like structure of the films can be established. The explanation for this phenomenon is described in [12]. It consists in the selection of crystals with the fastest growth rates perpendicular to the substrate, which is governed by the principle of “survival of the fastest”. This growth is also characterized in the structural zone model proposed by J. V. Sanders [13], which states that the temperature range  $0.1 < \text{synthesis temperature/melting temperature} < 0.3$  corresponds to the conditions when surface diffusion becomes noticeable and as a result, a column-like structure with impermeable boundaries is formed.

Given that the mean free path of characteristic X-rays is much longer than the



**Fig. 1.** SEM images of samples. a) ZnO b) ZnO1% c) ZnO2% d) ZnO3%.

thickness of the films obtained, in order to perform the EDX analysis the films were scraped off with a scalpel and transported onto a conductive carbon tape. The EDX analysis revealed the presence of 4 elements, namely Zn, O, Al and C (Fig. 3). Taking into account the chemical composition of the tape, carbon was excluded from the EDX analysis. The results of EDX analysis revealed successful doping of the films with aluminum, but its concentration was lower than expected. A larger amount of zinc than oxygen was observed, which is typical for films obtained by radio-frequency magnetron deposition using argon. Also, the non-stoichiometric Zn/O ratio may indicate a significant amount of oxygen vacancies or interstitial zinc atoms. Given the low migration energy barrier for interstitial zinc of 0.57 eV [14],

the oxygen deficiency can be explained by a large number of oxygen vacancies.

To clarify the features of the electronic structure, XPS studies were performed (Fig. 4). The energy of Zn  $2p_{3/2}$  is 1021.4 eV, and Zn  $2p_{1/2}$  is 1044.5 eV. The spin-orbit splitting for Zn,  $2p_{3/2} - 2p_{1/2}$ , amounts to 23.1 eV, which is characteristic of ZnO. The peaks with energies of 1036.0 and 1012.9 appear due to satellites from Mg K  $\alpha_{3,4}$  [15], which are located in the direction of lower binding energies at a distance of 8.5 eV.

Changes in the O 1s spectrum after the doping of ZnO with aluminum were attested. In the literature, the decomposition of O 1s peak into 3 components is accepted. The low-energy peak is attributed to O<sup>2-</sup> ions in the ZnO matrix with predominantly Zn-O (or Zn substituted by

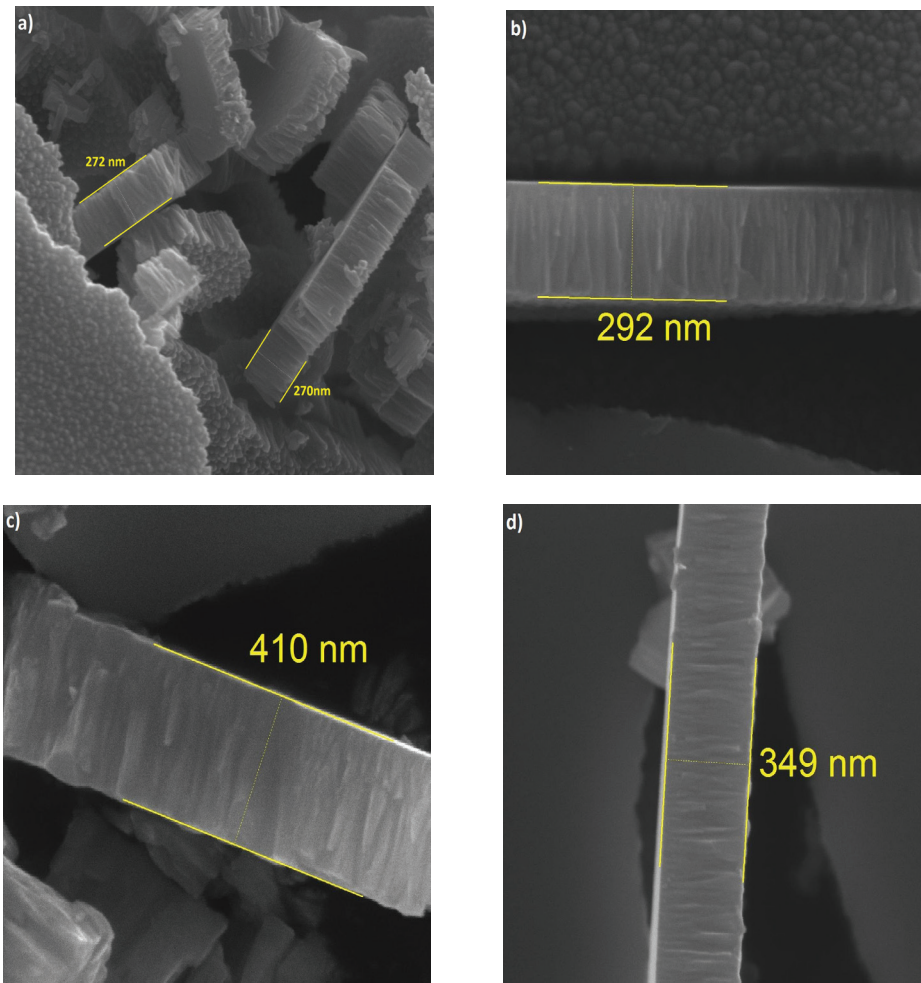


Fig. 2. Estimation of film thickness by SEM. a) ZnO b) ZnO1% c) ZnO3% d) ZnO3%.

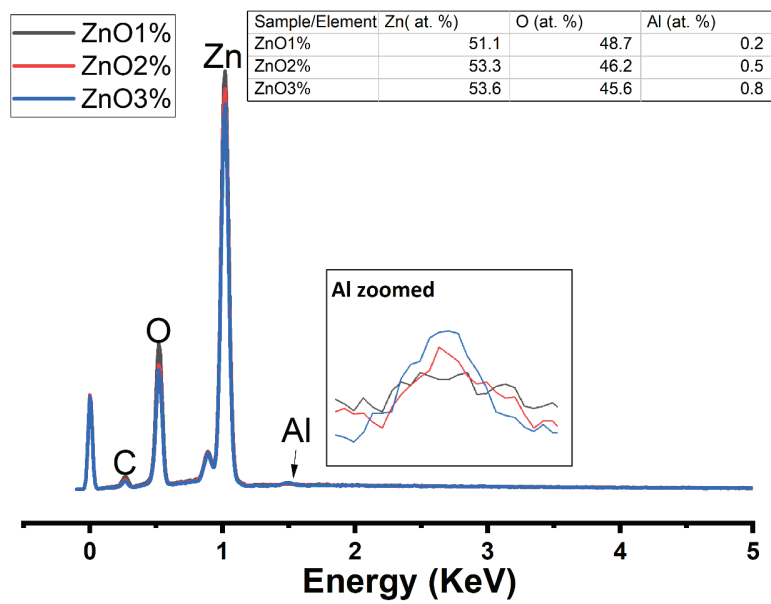


Fig. 3. EDX analysis of ZnO1%, ZnO2%, ZnO3%.

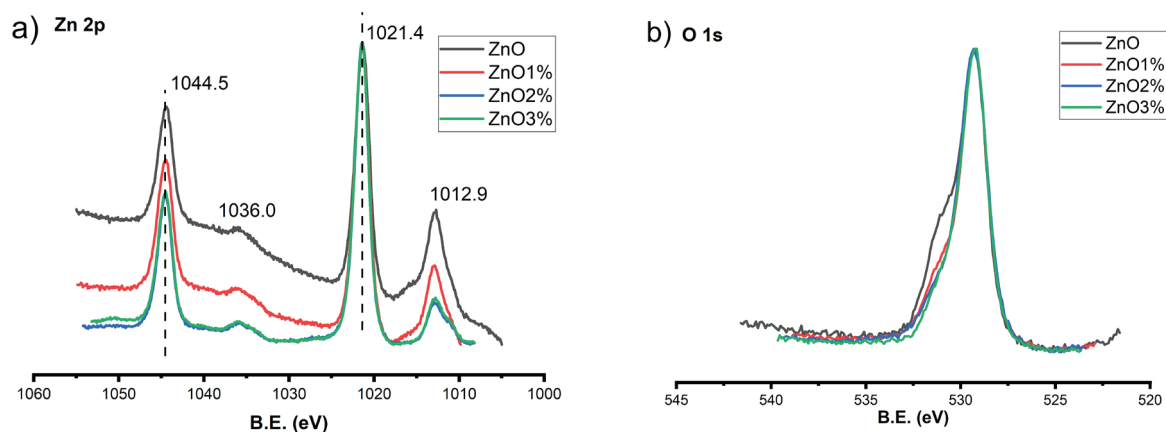


Fig. 4. XPS spectra of a) Zn 2p; b) O 1s.

Al) ionic bonds [16], while middle peak belongs to  $O^{2-}$  ions in oxygen-deficient regions [17], and the high-energy peak stems from the adsorbed or chemically adsorbed forms of oxygen, namely  $CO$ ,  $H_2O$ , or surface hydroxyl groups [18]. Thus, the decrease in the intensity of the higher-energy components of the O 1s spectrum can be explained by a decrease in the number of adsorbed oxygen species on the surface. This statement also correlates with a decrease in oxygen in the EDX spectra and an increase in the size of nanograins on the surface, which ultimately reduces the total surface area.

Figure 5 (a) shows the valence band of ZnO and aluminum-doped ZnO thin films. DFT calculations of electronic structure of ZnO were also performed (Fig. 5b) for a better interpretation of the results. Comparing the experimental data with the calculated data, one can notice a good agreement of the total density of states (DOS) between experiment and theory. Thus, it is easy to see that the top of the valence band is almost entirely composed of  $2p$  oxygen states and the bottom of the valence band is composed of  $3d$  zinc states. Given the almost identical energy of the states near the top of the valence band of Zn  $4s$  and O  $2p$ , we can assume their partial hybridization. After the addition of aluminum, a significant decrease in the electron density in the range from 2.0 to 5.0 eV is observed, which to the best of our knowledge is the first time it has been reported. Within the framework of DFT

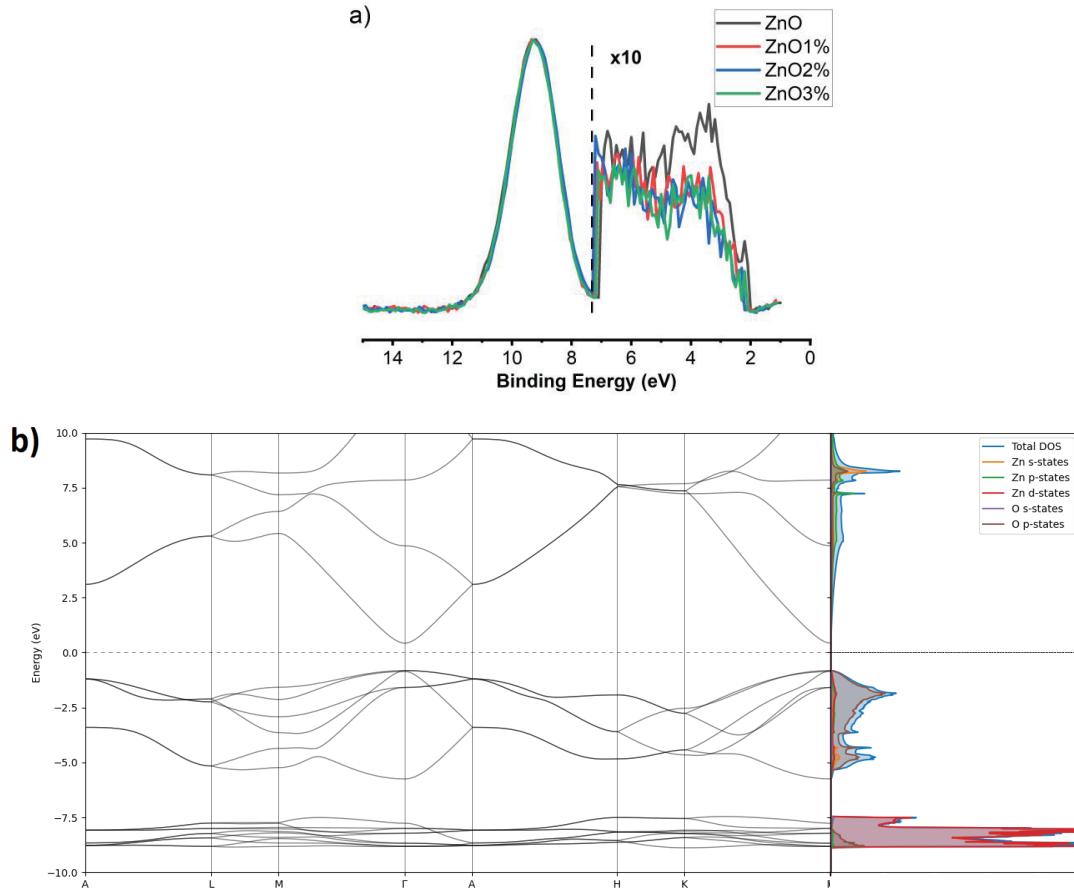
calculations, it was determined that ZnO has a direct band gap at the  $\Gamma$  point of the Brillouin zone with a width of 1.25 eV.

For many applications, transparency in the visible range is an extremely important parameter. Relatively high transparency was observed for all the films obtained, as well as a clear onset of the absorption edge at 370 nm. The transparency of all films was  $> 75\%$  in the entire visible and near-infrared range (Fig. 6a). Transparency fluctuations are associated with interference effects and confirm the smooth surface of the films obtained. Using the Tauc plot [20], the band gap was determined to be 3.41 eV (Fig. 6b). An observed increase in the band gap after aluminum doping might occur due to the Moss-Berstein effect [21]. For example, in [22], an increase in the band gap from 3.33 eV to 3.36 eV was observed after aluminum doping, but the resolution of our spectrophotometer does not allow us to determine such small changes.

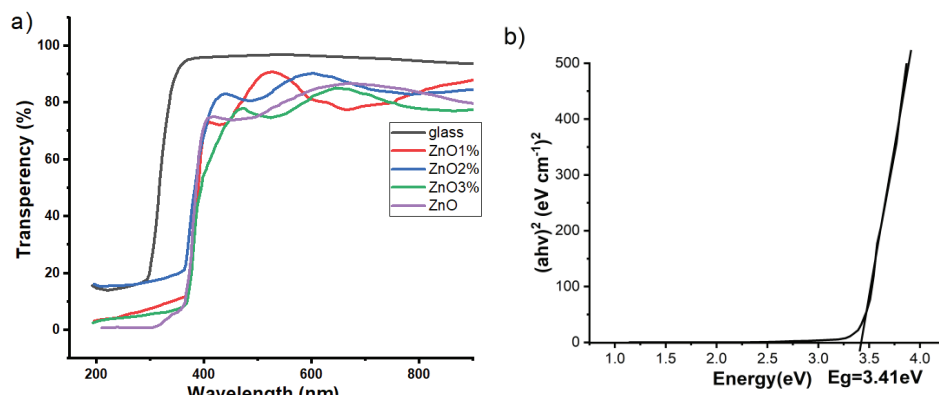
## Conclusions

In the present work, aluminum-doped ZnO thin films were successfully synthesized using radio-frequency magnetron deposition with using a powder target. Upon doping with aluminum, an increase in the average nanograin size is observed due to increased coalescence, which can affect the adsorption properties and surface energy of the thin films. Using SEM cross-sectional images of thin films the columnar growth of the films was





**Fig. 5. (a) XPS spectra of the valence band. Taking into account the small photoionization cross section under Mg K $\alpha$  irradiation for O  $2p = 0.0193$  [19], part of the spectrum was multiplied by 10. b) ZnO band structure and the density of states obtained by DFT calculations.**



**Fig. 6. (a) Transmission spectra of thin films. b) Determination of the band gap of ZnO by the Tauc plot.**

observed, which is explained by the selectivity of crystals with the fastest growth rates perpendicular to the substrate. The oxygen deficiency in the obtained films was found to be due to a large

number of oxygen vacancies. The decrease of adsorbed oxygen species was established from the redistribution of O  $1s$  intensity. The top of the valence band is predominantly composed of  $2p$

oxygen states, while the bottom is characterized by the presence of  $3d$  zinc states. To the best of our knowledge, a decrease in the density of states in the energy range from 2.0 to 5.0 eV after aluminum doping is observed for the first time. The obtained films have relatively good transparency of more than 75% in the visible and near-infrared spectral region. The band gap determined by the Tauc plot was 3.41 eV, and the one obtained in DFT calculations was 1.25 eV.

### References

- [1]. L. Znaidi. Sol-gel-deposited ZnO thin films: A review // *Mater. Sci. Eng. B-Adv.*, 174(1–3), pp. 18–30 (2010).
- [2]. M. Opel, S. Geprägs, M. Althammer, T. Brenninger, R. Gross. Laser molecular beam epitaxy of ZnO thin films and heterostructures // *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 47(3), 034002 (2013).
- [3]. P. -F. Yang, H. -C. Wen, S. -R. Jian, Y. -S. Lai, S. Wu & R. -S. Chen. Characteristics of ZnO thin films prepared by radio frequency magnetron sputtering // *Microelectron. Reliab.*, 48(3), pp. 389–394 (2008).
- [4]. Z. Zhang, C. Bao, W. Yao, S. Ma, L. Zhang & S. Hou. Influence of deposition temperature on the crystallinity of Al-doped ZnO thin films at glass substrates prepared by RF magnetron sputtering method // *Superlattice. Mictost.*, 49(6), pp. 644–653 (2011).
- [5]. D. K. Kim & H. B. Kim. Room temperature deposition of Al-doped ZnO thin films on glass by RF magnetron sputtering under different Ar gas pressure // *J. Alloy. Compd.*, 509(2), pp. 421–425 (2011).
- [6]. R. S. Tondare, B. W. Shivaraj, H. N. Narasimhamurthy, M. Krishna & T. K. Subramanyam. Effect of deposition time on structural, electrical and optical properties of Aluminium doped ZnO thin films by RF magnetron sputtering // *Mater. Today-proc.*, 5(1), pp. 2710–2715 (2018).
- [7]. P. Giannozzi, S. Baroni, N. Bonini, M. Calandra, R. Car, C. Cavazzoni, D. Ceresoli, G. L. Chiarotti, M. Cococcioni, I. Dabo, A. Dal Corso, S. Fabris, G. Fratesi, S. de Gironcoli, R. Gebauer, U. Gerstmann, C. Gougoussis, A. Kokalj, M. Lazzeri, L. Martin-Samos, N. Marzari, F. Mauri, R. Mazzarello, S. Paolini, A. Pasquarello, L. Paulatto, C. Sbraccia, S. Scandolo, G. Sclauzero, A. P. Seitsonen, A. Smogunov, P. Umari, R. M. Wentzcovitch. QUANTUM ESPRESSO: a modular and open-source software project for quantum simulations of materials // *Condens. Matter. Phys.*, 21, 395502 (2009).
- [8]. G. Kresse and D. Joubert. Kresse, G., & Joubert, D. (1999). From ultrasoft pseudopotentials to the projector augmented-wave method // *Phys. Rev. B.*, 59(3), pp. 1758–1775 (1999).
- [9]. J. P. Perdew, A. Ruzsinszky, G. I. Csonka, O. A. Vydrov, G. E. Scuseria, L. A. Constantin, X. Zhou, and K. Burke // *Phys. Rev. Lett.*, 102, 039902 (2009).
- [10]. P. Erhart, K. Albe & A. Klein. First-principles study of intrinsic point defects in ZnO: Role of band structure, volume relaxation, and finite-size effects // *Phys. Rev. B.*, 73(20), 205203 (2006).
- [11]. S. L. Dudarev, G. A. Botton, S. Y. Savrasov, C. J. Humphreys, and A. P. Sutton, Electron-energy-loss spectra and the structural stability of nickel oxide: An LSDA+U study // *Phys. Rev. B.*, 57, 1505 (1998).
- [12]. A. van der Drift. Evolutionary selection, a principle governing growth orientation in vapour-deposited layers // *Philips Res. Repts.*, 22, 267–288. (1967).
- [13]. J. V. Sanders. “Structure of evaporated metal films” in *Chemisorption and Reactions on Metal Films* // Academic Press, New York, pp 1–38 (1971).
- [14]. A. Janotti C. G. Van de Walle. Native point defects in ZnO // *Phys Revi B.*, 76(16) 165202 (2007).
- [15]. M. O. Krause, J. G. Ferreira. K X-ray emission spectra of Mg and Al // *J. Phys. B-At. Mol. Opt.*, 8(12), pp. 2007–2014 (1975).
- [16]. R. Al-Gaashani, S. Radiman, A. R. Daud, N. Tabet, Y. Al-Douri, XPS and optical studies of different morphologies of ZnO nanostructures prepared by microwave methods // *Ceram. Int.*, 39(3), pp. 2283–2292 (2013).
- [17]. D. K. Kim and H. B. Kim, Room temperature deposition of Al-doped ZnO thin films on glass by RF magnetron sputtering under different Ar gas pressure // *J. Alloy. Compd.*, 509(2), pp. 421–425 (2011).

[18]. V.P. Singh and Ch. Rath, Passivation of native defects of ZnO by doping Mg detected through various spectroscopic techniques // *Rsc. Adv.*, 5(55), pp. 44390–44397 (2015).

[19]. N. Ikeo, Y. Iijima, N. Niimura et al., Handbook of X-ray photoelectron spectroscopy. JEOL Ltd 216 s. (1991).

[20]. J. Tauc, Optical properties and electronic structure of amorphous Ge and Si // *Mater. Res. Bull.*, 3(1), pp. 37–46 (1968).

[21]. T. S. Moss. The Interpretation of the Properties of Indium Antimonide// *Proc. Phys. Soc.*, 67(10), 775–782 (1954).

[22]. K. Lovchinov, K. Nichev, O. Angelov, M. Sendova-Vassileva, V. Mikli, D. Dimova-Malinovska. Structural, optical and electrical properties of V doped ZnO thin films deposited by r.f. magnetron sputtering // *J. of Phys.: Conference Series*, 253, 012030 (2010).

Стаття надійшла до редакції 11.03.2024 р.

PACS77.55.hf, 33.60.+q, 79.60.-i, 82.80.Pv, 68.37.Hk, 81.15.Cd, 68.37.-d, 78.20.-e, 78.66.-w  
DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.1.300942>

## MORPHOLOGICAL, OPTICAL PROPERTIES AND ELECTRONIC STRUCTURE OF ZnO THIN FILMS DOPED WITH ALUMINUM

*V. V. Zaika<sup>1</sup>, N. K. Shvachko<sup>2</sup>*

Kurdyumov Institute for Metal Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
36, Academician Vernadsky Blvd, 03142 Kyiv, Ukraine  
<sup>1</sup> +38(068)774-79-32, zaikavladimir228@gmail.com  
<sup>2</sup> +38(095)550-48-99, nazarii1999@gmail.com

### Summary

The aim of the work was to determine the effect of aluminium on the morphological and optical properties of ZnO thin films, as well as to clarify its influence on the electronic structure. To achieve these goals, scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray spectroscopy, X-ray photoelectron spectroscopy, and spectrophotometric methods were chosen. It was found that the average size of nanograins on the surface increased after aluminium doping, and that the films demonstrated columnar growth, as cross-sectional images show. An increase in the growth rate of the films after aluminium doping was also observed. Using energy-dispersive X-ray spectroscopy, it was found that the films are characterised by the presence of oxygen deficiency, which is explained by a large number of oxygen vacancies. It is reasonable to assume a decrease in the amount of adsorbed oxygen species on the surface of the films after aluminium doping, based on the redistribution of the O *1s* line intensity. For a better explanation of the photoelectron spectra of the occupied part of the valence band, density functional theory (DFT) calculations were performed. It is shown that the ceiling of the valence band is almost entirely composed of *2p* oxygen electrons, and the bottom of the valence band is composed of *3d* zinc electrons. Also, taking into account the same energy of O *2p* and Zn *4s* electrons, we can assume their partial hybridization. Furthermore, after the addition of aluminium, a decrease in the intensity in energy range from 2.0 to 5.0 eV within the valence band was observed, to our best knowledge, for the first time. The transparency of all the films obtained in the visible spectral region was > 75%. Also, using the Tauc method, the band gap was found to be 3.41 eV. Within the framework of the DFT, the value of the band gap was 1.25 eV, which is explained by the well-known fact that the band gap decreases in DFT calculations.

**Keywords:** nanostructured thin films, RF magnetron sputtering, doping, electronic structure

PACS77.55.hf, 33.60.+q, 79.60.-i, 82.80.Pv, 68.37.Hk, 81.15.Cd, 68.37.-d, 78.20.-e, 78.66.-w  
DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.1.300942>

## МОРФОЛОГІЧНІ, ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ЕЛЕКТРОННА БУДОВА ТОНКИХ ПЛІВОК ZnO, ДОПОВАНИХ АЛЮМІНІЄМ

*В. В. Заїка<sup>1</sup>, Н. К. Швачко<sup>2</sup>*

Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,  
бульв. Академіка Вернадського, 36, 03142 Київ, Україна

<sup>1</sup> +38(068)774-79-32, [zaikavladimir228@gmail.com](mailto:zaikavladimir228@gmail.com)

<sup>2</sup> +38(095)550-48-99, [nazarii1999@gmail.com](mailto:nazarii1999@gmail.com)

### Реферат

Мета роботи полягала у визначенні впливу алюмінію на морфологічні, оптичні властивості тонких плівок ZnO, а також з'ясуванні його впливу на електронну будову. Для досягнення поставлених цілей були обрані методи сканувальної електронної мікроскопії, рентгенівської енергодисперсійної спектроскопії, рентгенівської фотоелектронної спектроскопії та спектрофотометричні методи досліджень. Було виявлено, що після допування алюмінієм збільшується середній розмір нанозерен на поверхні, а також зі знімків поперечного перерізу плівок встановлено їх стовпчастий ріст. Також спостерігалось збільшення швидкості росту плівок після допування алюмінієм. За допомогою рентгенівської енергодисперсійної спектроскопії було з'ясовано, що отриманим плівкам притаманний дефіцит кисню, який пояснюється великою кількістю кисневих вакансій. Можна припустити зменшення кількості адсорбованих видів кисню на поверхні плівок після допування алюмінієм, виходячи з перерозподілу інтенсивності лінії O 1s. Для кращої інтерпретації фотоелектронних спектрів зайнятої смуги валентної зони були проведені розрахунки в рамках теорії функціоналу густини (ТФГ). Показано, що стега валентної смуги майже повністю складається з 2p електронів кисню, а дно валентної зони – з 3d електронів цинку. Також, враховуючи однакову енергію електронів O 2p та Zn 4s, можна припустити їх часткову гібридизацію. Крім того, після допування алюмінієм спостерігається зменшення інтенсивності у валентній зоні з 2.0 до 5.0 eV, що, на нашу думку, спостерігається вперше. Прозорість усіх отриманих плівок у видимій області спектру була > 75%. Також, методом Таука була знайдена ширина забороненої зони зі значенням 3.41eV. В рамках теорії ТФГ значення забороненої зони становило 1.25eV, що пояснюється загальновідомим фактом зменшення значення забороненої зони в теоретичних розрахунках.

**Ключові слова:** наноструктуровані тонкі плівки, ВЧ магнетронне розпилення, легування, електронна структура

УДК 538.956

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.1.300025>

## ЕЛЕКТРИЧНЕ ПЕРЕМИКАННЯ В СКЛОКЕРАМІЧНИХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВІ ДІОКСИДУ ВАНАДІЮ

*В. Р. Колбунов, М. П. Трубіцин, А. О. Дяченко*

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара  
пр. Науки, 72, Дніпро, 49010, Україна, kolbunov\_vadim@i.ua

## ЕЛЕКТРИЧНЕ ПЕРЕМИКАННЯ В СКЛОКЕРАМІЧНИХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВІ ДІОКСИДУ ВАНАДІЮ

*В. Р. Колбунов, М. П. Трубіцин, А. О. Дяченко*

**Анотація.** В роботі вивчено зміни електричного струму під час перемикання зразків склокераміки на основі діоксиду ванадію зі стану з великим опором (off-state) у стан із малим опором (on-state) і зворотно. Затримка переходу з off-state в on-state, при застосуванні до зразка склокераміки перемикаючої напруги  $U_0$ , пов'язана з часом  $t_{don}$ , необхідним для його розігріву до температури фазового переходу метал-напівпровідник у  $VO_2$ . Час затримки  $t_{don}$  зменшується зі зростанням  $U_0$ . Встановлено, що затримку зворотного переходу з on-state в off-state контролює шнур струму, в межах якого кристаліти  $VO_2$  склокераміки перебувають у металевій фазі. Час затримки  $t_{doff}$  цього переходу визначає час, упродовж якого в зразку  $VO_2$ -склокераміки існує шнур струму після вимкнення напруги  $U_0$ . Величина  $t_{doff}$  зростає при збільшенні  $U_0$ .

**Ключові слова:** склокераміка,  $VO_2$ , електричне перемикання

## ELECTRICAL SWITCHING IN GLASS-CERAMIC STRUCTURES BASED ON VANADIUM DIOXIDE

*V. R. Kolbunov, M. P. Trubitsyn, A. O. Diachenko*

**Abstract.** The changes in electric current during the switching of vanadium dioxide-based glass-ceramic samples from the off-state to the on-state and vice versa were studied in this paper. The delay in the transition from the off-state to the on-state when a switching voltage  $U_0$  is applied to the glass-ceramic sample is related to the time  $t_{don}$  required to heat it to the metal-semiconductor phase transition temperature in  $VO_2$ . The delay time  $t_{don}$  decreases with increasing  $U_0$ . It was found that the delay of the reverse transition from on-state to off-state is controlled by the current cord within which the  $VO_2$  crystallites of the glass-ceramics are in the metal phase. The delay time  $t_{doff}$  of this transition determines the time during which the current cord exists in the  $VO_2$  glass-ceramic sample after the voltage  $U_0$  is switched off. The value of  $t_{doff}$  increases as  $U_0$  increases.

**Keywords:** glass-ceramic,  $VO_2$ , electric switching

## Вступ

Науковий і практичний інтерес до діоксиду ванадію  $\text{VO}_2$  та матеріалам на його основі зумовлений фазовим переходом метал-напівпровідник (ФПМН), який спостерігається у  $\text{VO}_2$  при температурі  $T_t = 68^\circ\text{C}$  [1–3]. Склокерамічні матеріали на основі  $\text{VO}_2$  та ванадій-фосфатного скла (ВФС) демонструють стрибкоподібну зміну електропровідності (~2–3 порядки) в межах температури  $T_t$  та мають вольт-амперні характеристики S-типу з пороговим перемиканням [4]. Такі склокераміки можуть бути використані як матеріал для критичних терморезисторів та порогових перемикачів з робочим струмом до 10 А. Це вигідно відрізняє склокераміку на основі  $\text{VO}_2$  від плівок  $\text{VO}_2$ , які мають робочий струм не більше 100 мА [5, 6] та оксидних стекол з робочим струмом не більше 1 А [7, 8].

Найважливішу роль у функціонуванні критичних терморезисторів відіграє кінетика струму через них при перемиканні з високоомного стану в низькоомний і зворотно. Слід зауважити, що тривалість переходу з високоомного (off-state) у низькоомний (on-state) стан визначалася в ряді робіт [8–12], а даних про тривалість зворотного переходу після проходження імпульсу напруги вкрай мало [13].

Метою цієї роботи є експериментальне дослідження процесу електричного перемикання зразків склокераміки на основі діоксиду ванадію та аналіз отриманих результатів у рамках моделі «критичної температури».

## Зразки та деталі експерименту

Дослідження проводились на зразках склокераміки, які мали склад  $\text{VO}_2\text{-SnO}_2\text{-Cu-ВФС}$ . Ці зразки мали форму дисків з діаметром основи 10 мм і висотою біля 2 мм. Як електродний матеріал використовували індій-галієву евтектику. У таблиці 1 наведено значення основних параметрів зразків склокераміки.

Дослідження виконували на установці, схема якої показана на рис. 1. Резистор  $R_0$  з опором 20 Ом обмежував струм через зразок склокераміки  $R_t$  після його перемикання в низькоомний стан (on-state). Струм через зразок визначали за падінням напруги на прецизійному

резисторі  $R_c$  з опором  $0,104 \pm 0,001$  Ом. Напруги вимірювали з відносною похибкою  $\pm 1\%$ .

Табл. 1

Основні електрофізичні параметри досліджуваних зразків

Опір при температурі $25^\circ\text{C}$ ( $R_0$ ), Ом	146
Опір при температурі $100^\circ\text{C}$ ( $R_{on}$ ), Ом	0,58
Напруга порогового перемикання $U_{Son}$ , В	5,5
Струм порогового перемикання $I_{Son}$ , мА	70
Струм порогового перемикання $I_{Soff}$ , мА	11
Теплова стала часу $\tau_p$ , с	40

В якості джерела постійної напруги ДН1 та ДН2 (рис. 1) використовували стабілізовані регульовані джерела напруги типу ТЕС 14 НТР 30.5. Вимірювання виконували за температури  $25^\circ\text{C}$  після встановлення термодинамічної рівноваги зразка склокераміки з навколишнім середовищем.

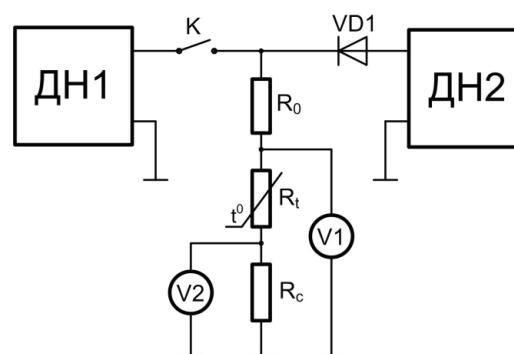


Рис. 1. Схема установки для дослідження електричного перемикання в зразках склокераміки на основі діоксиду ванадію.

Для перемикання терморезистора з високоомного стану в низькоомний на нього подавалася постійна напруга  $U_0$  з ДН1. Після розмикання ключа К на зразок подавали напругу  $U_{01} = 1$  В з ДН2. Така методика давала змогу реєструвати кінетику електричного струму, що протікає через досліджуваний зразок склокераміки, після зняття перемикальної напруги  $U_0$ .

## Експериментальні результати та їх обговорення

*Затримка ввімкнення склокераміки на основі діоксиду ванадію*

На рис. 2б показано типову зміну значення струму, що протікає через зразок склокераміки на основі  $\text{VO}_2$ , із часом при подаванні та знятті напруги перемикавання  $U_0$  (рис. 2а).

Доцільно розглянути окремо процес перемикавання зразка  $\text{VO}_2$ -склокераміки в стан on-state і зворотно в off-state.

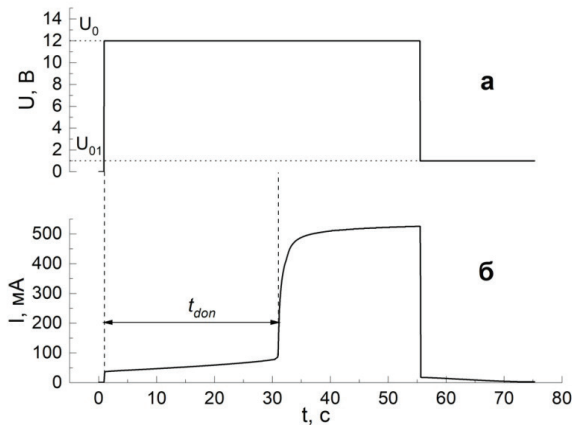


Рис. 2. Кінетика струму через зразок  $\text{VO}_2$ -склокераміки (б) після подачі та зняття перемикальної напруги  $U_0$  (а).

Як видно, після подачі постійної напруги  $U_0$ , на початку, за рахунок розігріву зразка, струм через нього повільно зростає (рис. 2б). У цьому інтервалі часу кристаліти  $\text{VO}_2$ -склокераміки перебувають у напівпровідниковій фазі, і опір склокераміки змінюється з температурою так само, як для напівпровідникових терморезисторів з негативним температурним коефіцієнтом опору [14]. Через інтервал часу  $t_{don}$  від початку процесу зразок нагрівається до температури ФПМН  $T_t \approx 70^\circ\text{C}$  і перемикається в стан із низьким електричним опором (on-state). Відбувається різке збільшення електричного струму. У зразку склокераміки формується шнур струму, у межах якого кристаліти  $\text{VO}_2$  перебувають у провідній металевій фазі [15]. Через деякий час діаметр шнуру струму досягає рівноважного значення, що визначається термодинамічною рівновагою з навколишнім середовищем. Тому струм  $I$  зразка склокераміки перестає змінюватися (рис. 2б).

Таким чином, для розігрівання зразка електричним струмом до температури  $T_t$ , за якої відбувається перемикавання в стан із низь-

ким опором, потрібен деякий час  $t_{don}$ . Цей час визначає затримку перемикавання критичних терморезисторів і порогових перемикачів на основі матеріалів із фазовим переходом метал-напівпровідник. Значення  $t_{don}$  можна знайти за часовими залежностями струму (рис. 2б). Для цього треба врахувати, що перемикавання починається, коли опір зразка склокераміки досягає величини  $R_S = U_{Son}/I_{Son}$ , який визначається пороговими значеннями струму  $I_{Son}$  і напруги  $U_{Son}$  (табл. 1). Значення  $I_{Son}$  і  $U_{Son}$  для досліджуваних зразків знаходили за пороговою точкою вольт-амперної характеристики, у якій температура зразка досягає значення  $T_t$ . Для напруги  $U = U_d$  (рис. 2б), з якої починається порогове перемикавання, з урахуванням схеми, показаної на рис. 1, нехтуючи малим опором  $R_c$ , нескладно отримати таке співвідношення:

$$U_d = U_0 R_S / (R_S + R_0), \quad (1)$$

яке в нормалізованому вигляді можна записати як

$$U_d/U_0 = 1/(1 + R_0/R_S). \quad (2)$$

Співвідношення (2) визначає рівень, що дає змогу знайти за часовими залежностями відносного падіння напруги на зразку склокераміки  $U_t/U_0$  час затримки перемикавання  $t_{don}$  при будь-якому значенні ступені напруги  $U_0$ . На рис. 3 показано такі часові залежності, зареєстровані за різних значень напруги  $U_0$ . Рівень, який визначається співвідношенням (2), показано на рис. 3 пунктирною лінією. Він розрахований для  $R_0 = 20 \text{ Ом}$  і значення опору  $R_S$ , яке відповідно до параметрів  $U_{Son}$ ,  $I_{Son}$ , представлених у табл. 1, дорівнює  $84,6 \text{ Ом}$ .

На рис. 3 абсциси точок перетину пунктирної лінії з кінетичними кривими визначають значення часу затримки перемикавання зразка  $\text{VO}_2$ -склокераміки  $t_{don}$  за різних значень напруги  $U_0$ .

Кінетика відносного падіння напруги  $U/U_0$  для зразків склокераміки була досліджена за різних значень напруги  $U_0$  для визначення залежності тривалості затримки перемикавання  $t_{don}$  від напруги. Зазначена залежність прослідковується на рис. 4, де наведено відносні значення часу затримки перемикавання

$t_d/\tau_p$ , а кружки відповідають експериментальним даним. Тут як  $\tau_p$  позначено теплову сталу часу зразка (табл. 1).

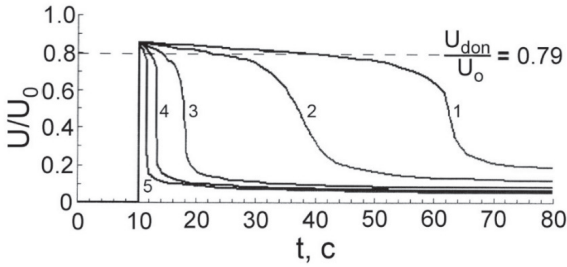


Рис. 3. Відносне падіння напруги на зразку склокераміки на основі діоксиду ванадію як функція часу при значеннях  $U_0$ , В: 1–8, 2–10, 3–15, 4–20, 5–25.

Як видно, зі зростанням  $U_0$  час затримки монотонно зменшується. Коли падіння напруги на зразку склокераміки наближається до порогової напруги  $U_S \sim 5,5$  В, час затримки різко зростає, прямуючи до нескінченності. Це узгоджується з тим, що за напруг, менших за  $U_S$ , зразок не може бути перемкнутим у стан із низьким опором.

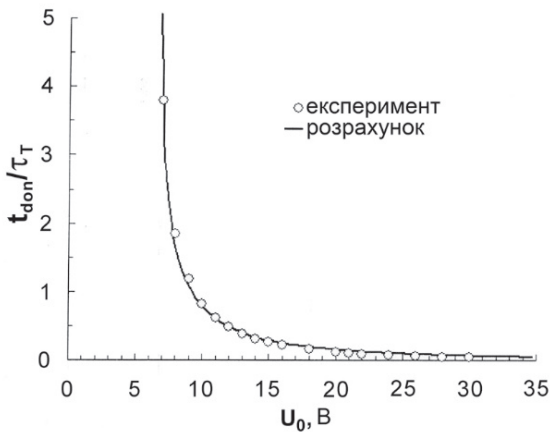


Рис. 4. Експериментальна та розрахункова залежності нормованого часу затримки перемикання зразка склокераміки на основі діоксиду ванадію.

Для визначення зв'язку між часом затримки перемикання  $t_{don}$  і напругою  $U_0$  скористаємося моделлю «критичної температури» [1]. Запишемо рівняння теплового балансу зразка склокераміки на основі діоксиду ванадію, увімкненого в коло, як представлено на рис. 1:

$$C_T \frac{dT}{dt} + k(T - Q) = \frac{U_0^2 R_T}{(R_0 + R_T)^2}, \quad (3)$$

де  $C_T$ ,  $T$ ,  $k$  – теплоємність, температура і коефіцієнт теплового розсіювання зразка, відповідно;  $t$  – час;  $Q$  – температура навколишнього середовища.

Рівняння (3) не враховує розподілу температури в об'ємі зразка і навколишньому середовищі. Однак таке наближення досить добре виправдовується на практиці під час аналізу електричних кіл із терморезисторами [14].

Нижче температури ФПМН  $T_i$  залежність опору зразка склокераміки від температури описується формулою:

$$R_T = R_\infty \exp\left(\frac{\Delta E}{k_B T}\right),$$

де  $\Delta E$  – енергія активації електропровідності;  $R_\infty$  – опір зразка при  $T \rightarrow \infty$ ;  $k_B$  – стала Больцмана. Якщо  $R_Q$  – опір зразка за температури навколишнього середовища  $Q$ , а  $\Delta T = T - Q$ , то залежність опору зразка склокераміки від температури можна представити у вигляді:

$$R_T = R_Q \exp\left(-\frac{\Delta E \Delta T}{k_B Q(Q + \Delta T)}\right). \quad (4)$$

Коефіцієнт теплового розсіювання  $k$ , що входить до рівняння (3), виразимо через порогову напругу  $U_{Son}$  і опір  $R_S$  зразка  $VO_2$ -склокераміки з огляду на те, що в пороговій точці вольт-амперної характеристики баланс потужності, що виділяється та розсіюється, у статичному режимі визначається співвідношенням  $k(T_i - Q) = U_{Son}^2/R_S$ . З цього співвідношення випливає:

$$k = U_{Son}^2/(R_S \Delta T_i), \quad (5)$$

де  $\Delta T_i = (T_i - Q)$ .

Час затримки перемикання зразка  $t_{don}$  визначається часом, необхідним для його розігріву від температури довкілля  $Q$  до «критичної температури», за якої відбувається перемикання зразка склокераміки в стан on-state. Такою «критичною температурою» є температура фазового переходу метал-напівпровідник  $T_i$  в діоксиді ванадію. Тому, виконавши інтегрування (3) в інтервалі  $0 \leq \Delta T \leq \Delta T_i$ , з урахуван-



ням співвідношення (5) та  $T = Q + \Delta T$ , для відносної величини часу затримки перемикавання  $t_d/\tau_T$  отримаємо такий вираз:

$$\frac{t_{don}}{\tau_T} = \int_0^{\Delta T_t} \frac{d\Delta T}{\left(\frac{U_0}{U_S}\right)^2 \frac{R_T R_S \Delta T_t}{(R_0 + R_T)^2} - \Delta T}, \quad (6)$$

де теплова постійна часу склокераміки дорівнює  $\tau_T = C_T/k$  [7].

Вираз (6) визначає зв'язок між відносним часом затримки перемикавання зразка склокераміки на основі  $\text{VO}_2$  і постійною напругою  $U_0$ , прикладеною до зразка в момент часу, починаючи з якого відраховується час затримки.

Результати розрахунку для дослідженого в роботі зразка склокераміки (параметри в табл. 1), виконані в діапазоні напруги  $7 \text{ В} \leq U_0 \leq 35 \text{ В}$  з кроком  $0,1 \text{ В}$  при  $Q = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $R_0 = 20 \text{ Ом}$  і кроку інтегрування  $0,01 \text{ град}$ , представлені на рис. 4 суцільною лінією. Ці результати дають змогу знайти напругу  $U_0 = 9 \text{ В}$ , за якої час затримки перемикавання зразка збігається з його тепловою постійною часу  $\tau_T$  ( $t_{don}/\tau_T = 1$ ). За часовою залежністю відносного падіння напруги на зразку склокераміки, зареєстрованою за  $U_0 = 9 \text{ В}$ , знайдено значення теплової постійної часу  $\tau_T = 40 \text{ с}$ , до якої нормовано експериментальні значення  $t_{don}$ , представлені кружками на рис. 4. Як видно, має місце хороша відповідність між результатами розрахунку й експерименту, що підтверджує застосовність моделі «критичної температури» для опису кінетики перемикавання зразків діоксиднованадієвої склокераміки.

#### Вимкнення склокераміки на основі діоксиду ванадію

Як видно на рис. 2, протягом деякого часу після зняття перемикальної напруги  $U_0$  і подачі на зразок малої опорної напруги  $U_{01}$  спостерігається спад струму. Така поведінка свідчить, що шнур струму з кристалітами  $\text{VO}_2$  у металевій фазі зберігається протягом деякого часу після вимкнення перемикальної напруги. Отже, має місце затримка вимкнення  $t_{doff}$  зразків  $\text{VO}_2$ -склокераміки, яка пов'язана з переходом зі стану з малим опором (on-state) у стан з великим опором (off-state).

На рис. 5 показано часові залежності струму через зразок  $\text{VO}_2$ -склокераміки, зареєстровані за різних значень перемикальної напруги  $U_0$ , починаючи з моменту її зняття (початковий момент часу відповідає задньому фронту прямокутного імпульсу на рис. 2а). Зменшення струму зразка з часом пов'язане з його охолодженням від температури в момент вимкнення напруги  $U_0$  до температури навколишнього середовища  $Q$ . На початковій стадії у зразку існує шнур струму з кристалітами  $\text{VO}_2$  в провідній металевій фазі. За досить великих напруг  $U_0$ , коли шнур струму має досить великий поперечний переріз, зразок склокераміки має малий опір  $R_t$ . Тому, оскільки  $R_t \ll R_0$ , його струм у схемі на рис. 1 повністю контролює обмежувальний резистор  $R_0$ . Це пояснює наявність ділянки зі слабкою залежністю струму від часу на початковій стадії кінетичного процесу (рис. 5, region 1). Як видно на рис. 5, довжина цієї ділянки збільшується зі зростанням напруги  $U_0$ . Причиною такої поведінки є те, що при збільшенні  $U_0$  шнур струму розширюється в поперечному напрямку. Це веде до збільшення кількості кристалітів  $\text{VO}_2$  у металевій фазі. Тому потрібен більший час для розсіювання теплоти ФПМН, що виділяється під час переходу кристалітів  $\text{VO}_2$  з металеві фазу в напівпровідникову фазу.

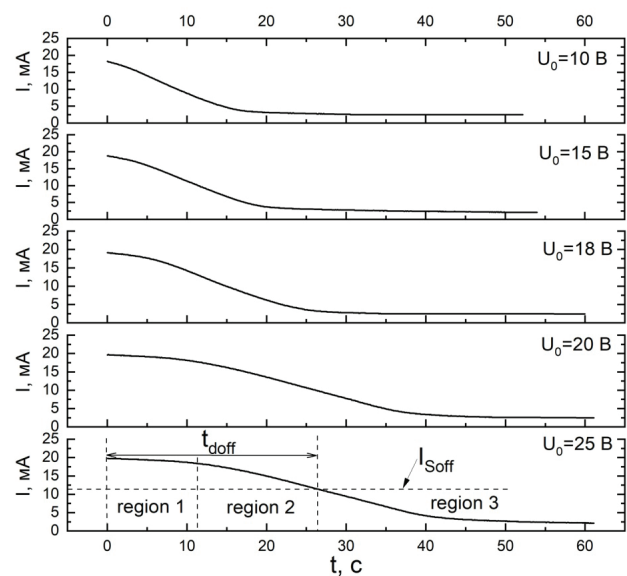


Рис. 5. Кінетика струму під час вимкнення зразка  $\text{VO}_2$ -склокераміки за різних величин напруги перемикавання  $U_0$

У процесі переходу кристалітів  $\text{VO}_2$  з металеві фази в напівпровідникову фазу поперечні розміри шнура струму зменшуються, що веде до збільшення опору зразка  $\text{VO}_2$  склокераміки. Це є причиною зменшення струму з часом (рис. 5, region 2). Тому за струмів, менших за  $I_{\text{soff}}$  у зразку  $\text{VO}_2$  склокераміки шнур струму відсутній, і подальше зменшення струму зумовлене зменшенням температури зразка, в якому всі кристаліти  $\text{VO}_2$  перебувають у напівпровідниковій фазі (рис. 5, region 3).

Таким чином, час  $t_{\text{doff}}$ , що визначає затримку перемикавання зразків  $\text{VO}_2$ -склокераміки та критичних терморезисторів на основі такої кераміки з on-state в off-state, можна знайти з даних, представлених на рис. 5, використовуючи рівень струму  $I_{\text{soff}} = 11$  мА (див. таблицю 1). На рис. 6 представлено залежність часу затримки перемикавання зразків  $\text{VO}_2$ -склокераміки з on-state в off-state від величини перемикальної напруги  $U_0$ . Час затримки  $t_{\text{doff}}$  на відміну від часу затримки  $t_{\text{don}}$  (рис. 2), зростає при збільшенні напруги  $U_0$ . Таким чином, має місце протилежний характер залежностей від напруги  $U_0$  часів затримки перемикавання зразків  $\text{VO}_2$ -склокераміки зі стану з високим опором у стан з низьким опором і навпаки.

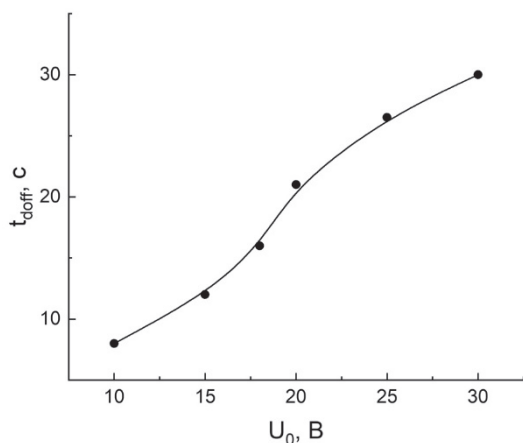


Рис. 6. Залежність часу затримки  $t_{\text{doff}}$  зразків  $\text{VO}_2$ -склокераміки від напруги перемикавання  $U_0$

Слід зауважити, що після зняття напруги  $U_0$  струм через зразок практично моментально падає більш ніж на порядок (див. рис. 2б), а після цього протікають релаксаційні проце-

си, описані вище. Тому кінетика перемикавання склокераміки на основі діоксиду ванадію в off-state стан має значно менший вплив на її практичне застосування, ніж кінетика перемикавання в on-state стан.

## Висновки

Вивчено кінетику перемикавання зразків склокераміки на основі  $\text{VO}_2$  зі стану з великим опором (off-state) у стан із малим опором (on-state) і навпаки. Встановлено, що затримка переходу з off-state в on-state, при застосуванні до зразка перемикаючої напруги  $U_0$ , пов'язана з часом його розігріву до температури фазового переходу метал-напівпровідник у  $\text{VO}_2$ . Час затримки такого переходу  $t_{\text{don}}$  зменшується зі зростанням  $U_0$ . Показано, що розрахована залежність  $t_{\text{don}}$  від напруги  $U_0$ , отримана з використанням спрощеного рівняння теплового балансу зразка і моделі «критичної температури», перебуває в хорошій відповідності з експериментальними даними. Встановлено, що затримку зворотного переходу з on-state в off-state контролює шнур струму, в межах якого кристаліти  $\text{VO}_2$  склокераміки перебувають у металевій фазі. Час затримки  $t_{\text{doff}}$  цього переходу визначається часом існування шнура струму після вимкнення напруги  $U_0$ , яка перевела зразок  $\text{VO}_2$ -склокераміки в on-state. Величина затримки  $t_{\text{doff}}$  зростає при збільшенні  $U_0$ . Причиною такої поведінки є розширення шнура струму зі зростанням  $U_0$ . Як наслідок, збільшується кількість кристалітів  $\text{VO}_2$  у металевій фазі. Тому  $t_{\text{doff}}$  зростає за рахунок збільшення часу, необхідного для розсіювання теплоти, що виділяється під час переходу кристалітів  $\text{VO}_2$  з металеві фази в напівпровідникову фазу.

## Список використаної літератури

- [1]. W. Bruckner, H. Opperman, W. Reihelt, J. I. Terukow, F. A. Tschudnowski, E. Wolf. Vanadiumoxide: Darstellung, Eigenschaften, Anwendung. Akademie-Verlag, Berlin. 252 s. (1983).
- [2]. X. Gao, C. M. M. Rosário; H. Hilgenkamp. Multi-level operation in  $\text{VO}_2$ -based resistive switching devices // AIP Advances, **12**, p. 015218 (2022).

- [3]. K. Liu, S. Lee, S. Yang, O. Delaire, J. Wu. Recent progresses on physics and applications of vanadium dioxide // *Materials Today*, **21(8)**, pp. 875–896 (2018).
- [4]. V. R. Kolbunov, A. I. Ivon, I. M. Chernenko. Conductivity of VO<sub>2</sub>-based ceramics // *J. Mater. Sci: Mater. Electron.*, **17(1)**, pp. 57–62 (2006).
- [5]. Z. A. Umar, R. Ahmed, H. Asghar, U. Liaqat, A. Fayyaz. VO<sub>2</sub> thin film based highly responsive and fast VIS/IR photodetector // *Materials Chemistry and Physics*, **290(15)**, p. 126655 (2022).
- [6]. H. Zhang, Zh. Wu, C. Wang, Y. Sun. VO<sub>2</sub> film with small hysteresis width and low transition temperature // *Vacuum*, **170**, p. 108971 (2019).
- [7]. A. Pergament, G. Stefanovich, V. Malinenko, A. Velichko. Electrical switching in thin film structures based on transition metal oxides // *Adv. Condens. Matter Phys.*, **26**, p. 654840 (2015).
- [8]. D. Li, A. A. Sharma, D. K. Gala et al. Joule heating-induced metal-insulator transition in epitaxial VO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> devices // *ACS Applied Materials & Interfaces*, **8**, pp. 12908–12914 (2016).
- [9]. B. Walls, O. Murtagh, S. I. Bozhko et al. VO<sub>x</sub> phase mixture of reduced single crystalline V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: VO<sub>2</sub> resistive switching // *Materials*, **15(21)**, p. 7652 (2022).
- [10]. G. M. Liao, S. Chen, L. L. Fan et al. Dynamically tracking the joule heating effect on the voltage induced metal-insulator transition in VO<sub>2</sub> crystal film // *AIP Advances*, **6**, p. 045014 (2016).
- [11]. E. Janod, J. Tranchant, B. Corraze, et al. Resistive switching in mott insulators and correlated systems // *Adv. Funct. Mater.*, **25**, p. 6287 (2015).
- [12]. A. Rana, C. Li, G. Koster et al. Resistive switching studies in VO<sub>2</sub> thin films // *Sci. Rep.* **10**, p. 3293 (2020).
- [13]. I. P. Radu, B. Govoreanu, S. Mertens et al. Switching mechanism in two-terminal vanadium dioxide devices // *Nanotechnology*, **26**, p. 165202 (2015).
- [14]. J. Fraden. Handbook of Modern Sensors. Physics, Designs and Applications. Springer International Publishing, Switzerland. 663 p. (2016).
- [15]. A. I. Ivon, I. M. Chernenko, V. R. Kolbunov et al. The size effect in current-voltage characteristic of VO<sub>2</sub>-based ceramics in the on-state // *J. Mater. Sci: Mater Electron.*, **18**, pp. 1009–1012 (2007).

Стаття надійшла до редакції 16.03.2024 р.

UDC538.956

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.1.300025>

## ELECTRICAL SWITCHING IN GLASS-CERAMIC STRUCTURES BASED ON VANADIUM DIOXIDE

*V. R. Kolbunov, M. P. Trubitsyn, A. O. Diachenko*

Oles Honchar Dnipro National University  
72 Nauky av., Dnipro, 49010, Ukraine, kolbunov\_vadim@i.ua

### Summary

The current kinetics during the switching of VO<sub>2</sub> glass-ceramic samples from the high resistance state (off-state) to the low resistance state (on-state) and vice versa has been studied. The delay of the transition from the off-state to the on-state, when the switching voltage  $U_0$  is applied to the glass-ceramic sample, is related to the time  $t_{don}$  required for it to heat up to the temperature of the metal-semiconductor phase transition in VO<sub>2</sub>. The delay time  $t_{don}$  decreases with increasing  $U_0$ . It is shown that the calculated dependence of  $t_{don}$  on the voltage  $U_0$  is in good agreement with the experimental

data. It is found that the delay of the reverse transition from the on-state to the off-state is controlled by the current cord within which the VO<sub>2</sub> crystallites of the glass-ceramics are in the metallic phase. The delay time  $t_{doff}$  of this transition determines the time during which the current cord is present in the VO<sub>2</sub> glass-ceramic sample after the voltage  $U_0$  is switched off. The value of  $t_{doff}$  increases as  $U_0$  increases. The reason for this behaviour is the expansion of the current cord as  $U_0$  increases. As a result, the number of VO<sub>2</sub> crystallites in the metallic phase increases. Therefore,  $t_{doff}$  increases due to the increase in the time required to dissipate the heat released during the transition of the VO<sub>2</sub> crystallites from the metallic phase to the semiconductor phase.

**Keywords:** glass-ceramic, VO<sub>2</sub>, electric switching

УДК 538.956

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.1.300025>

## ЕЛЕКТРИЧНЕ ПЕРЕМИКАННЯ В СКЛОКЕРАМІЧНИХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВІ ДІОКСИДУ ВАНАДІЮ

*В. Р. Колбунов, М. П. Трубіцин, А. О. Дяченко*

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара  
пр. Науки, 72, Дніпро, 49010, Україна, kolbunov\_vadim@i.ua

### Реферат

Метою цієї роботи було вивчення зміни струму під час перемикання зразків VO<sub>2</sub>-склокераміки зі стану з високим опором (off-state) у стан із низьким опором (on-state) і зворотно. Затримка переходу з off-state в on-state, при застосуванні до зразка склокераміки перемикаючої напруги  $U_0$ , пов'язана з часом  $t_{don}$ , необхідним для його розігріву до температури фазового переходу метал-напівпровідник у VO<sub>2</sub>. Час затримки  $t_{don}$  зменшується зі зростанням  $U_0$ . Показано, що розрахункова залежність  $t_{don}$  від напруги  $U_0$ , перебуває в хорошій відповідності з експериментальними даними. Встановлено, що затримку зворотного переходу з on-state в off-state контролює шнур струму, в межах якого кристаліти VO<sub>2</sub> склокераміки перебувають у металевій фазі. Час затримки  $t_{doff}$  цього переходу визначає час, упродовж якого в зразку VO<sub>2</sub> склокераміки існує шнур струму, після вимкнення напруги  $U_0$ . Величина  $t_{doff}$  зростає при збільшенні  $U_0$ . Причиною такої поведінки є розширення шнура струму зі зростанням  $U_0$ . Як наслідок, збільшується кількість кристалітів VO<sub>2</sub> у металевій фазі. Тому  $t_{doff}$  зростає за рахунок збільшення часу, необхідного для розсіювання теплоти, що виділяється під час переходу кристалітів VO<sub>2</sub> з металевієї фази в напівпровідникову фазу.

**Ключові слова:** склокераміка, VO<sub>2</sub>, електричне перемикання

# СЕНСОРИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ

## SENSORS AND INFORMATION SYSTEMS

PACS85.40.Ry

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.1.300140>

### MODELING OF ANALOG-TO-DIGITAL SIGNAL CONVERTERS FOR SENSOR MICROSYSTEMS IN THE MICROWIND SOFTWARE

*L. I. Nykyruy<sup>1</sup>, R. V. Ilnytskyi<sup>2</sup>, M. F. Pavlyuk<sup>3</sup>*

Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Shevchenko Str. 57,  
Ivano-Frankivsk, 76018. Ukraine, +380956991785

Email: <sup>1</sup> lyubomyr.nykyruy@pnu.edu.ua, <sup>2</sup> roman.ilnitsky@pnu.edu.ua,  
<sup>3</sup> myroslav.pavlyuk@pnu.edu.ua

### MODELING OF ANALOG-TO-DIGITAL SIGNAL CONVERTERS FOR SENSOR MICROSYSTEMS IN THE MICROWIND SOFTWARE

*L. I. Nykyruy, R. V. Ilnytskyi, M. F. Pavlyuk*

**Abstract.** For the results of simulating the operation of analog-digital converters, we chose such a converter as the serial approximation ADC (SAR ADC). A sequential approximation ADC is a type of analog-to-digital converter that converts a continuous analog waveform to a discrete digital representation by binary search through all possible quantization levels before finally converging on a digital output for each conversion. There are three important blocks in the SAR ADC architecture: the sample and hold circuit (Sample and Hold, S/H), the comparator, and the SAR block. The topology and principle of operation of which was modeled in the Micro Wind software environment.

**Keywords:** analogue-to-digital converter, MicroWind software, submicron technology

### МОДЕЛЮВАННЯ АНАЛОГО-ЦИФРОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СИГНАЛІВ ДЛЯ СЕНСОРНИХ МІКРОСИСТЕМ У ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ MICROWIND

*Л. І. Никуруй, Р. В. Ільницький, М. Ф. Павлюк*

**Анотація.** Для моделювання роботи аналого-цифрових перетворювачів обрано перетворювач АЦП послідовного наближення (SAR ADC). АЦП із послідовним наближенням – це тип аналого-цифрового перетворювача, який перетворює неперервну аналогову форму сигналу

в дискретне цифрове представлення за допомогою двійкового пошуку через усі можливі рівні квантування перед остаточним зближенням до цифрового виходу для кожного перетворення. В архітектурі SAR ADC є три важливі блоки: схема вибірки та зберігання (Sample and Hold, S/H), компаратор і блок SAR. Топологія та принцип роботи змодельовано в програмному середовищі Micro Wind.

**Ключові слова:** аналого-цифровий перетворювач, програмне забезпечення MicroWind, субмікронна технологія

### Introduction

The main application of the sample-and-store scheme is in ADC. This function block processes the analog input signal and stores the value between tact. Many ADC topologies require a stable input signal, which is provided by the S/H circuit [1]. This reduces ADC error caused by internal delay variations. Sometimes this circuit element is called Track and Hold (T/H). Typically, a sample-and-hold circuit contains a switch and a capacitor. In trace mode, when the sampling signal is high and the switch is connected, it traces the analog input signal. It then holds the value when the sample signal goes low in the hold mode. Figure 1 shows a model of the S/H scheme in DSCH 3.5

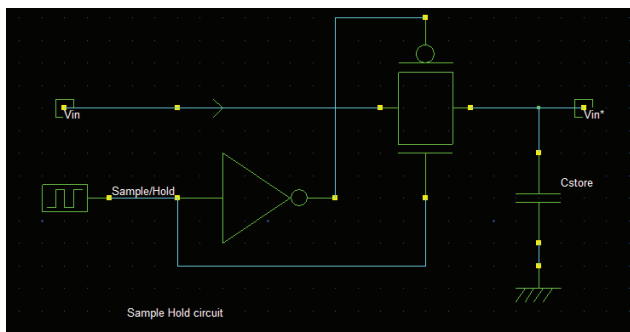


Fig. 1. Model of the sampling and storage functional block in DSCH 3.5.

### Results and discussion

During binary search, the analog input signal is sampled and its sampled value is saved by the S/H circuit. Two signals are applied to the input: one is an analog input signal applied to the transfer switch, and the other is a square-wave sampling signal applied to the CMOS rather than the gate, which is implemented using advanced MOSFETs to sample the analog input. The implementation of the sampling and storage

block topology was carried out in the MicroWind software environment (Fig. 2). [2,3].

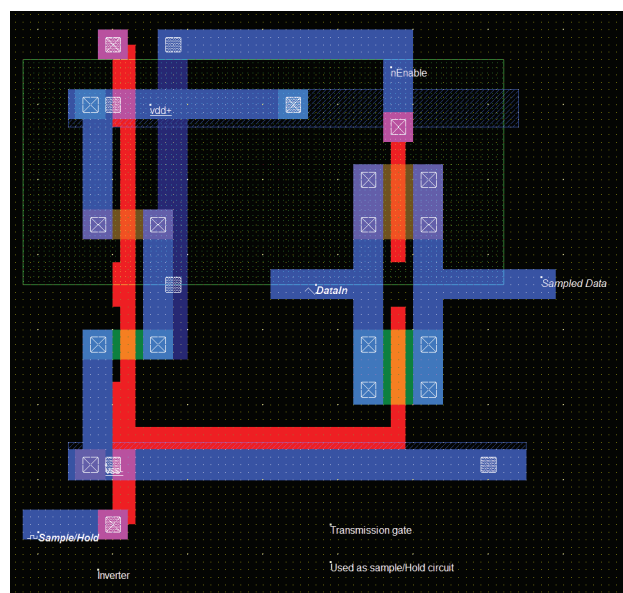


Fig. 2. Topology of the sample and storage unit.

The input is a continuous analog signal, we sample it and obtain a specific digitized value that is stored at the output of the S/H circuit until the input is sampled again, i.e. the sampling signal goes low. In the above circuit, there are two types of signals, one is the input analog voltage and the other is the sample voltage. So, depending on the sampling voltage, a signal is generated. In the case of high sample voltage, the analog voltage is held at a certain level for a certain time depending on the on-time of the square-wave sample signal [4–6]. S/H is usually implemented using a capacitive matrix, and the difference between successive samples is taken. The input signal is sampled on the top plates when using load switches. This increases installation speed and input bandwidth. And at the same time the lower plates are reset to  $V_{ref}$ .

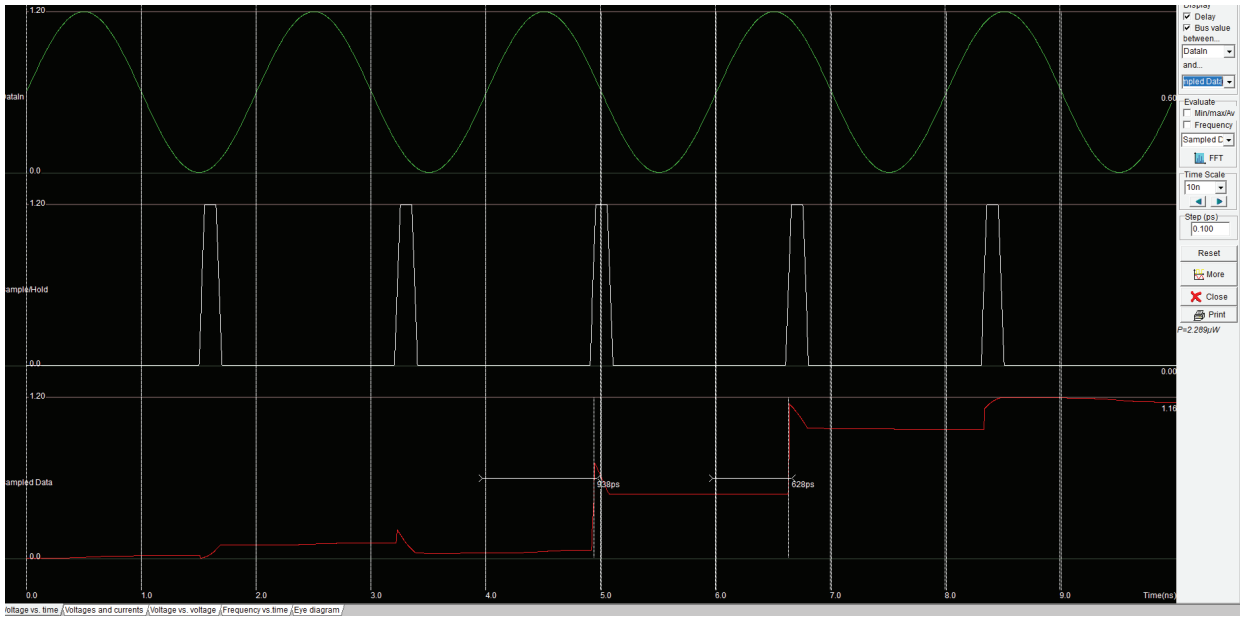


Fig. 3. S/H block simulation result.

The comparator is the only analog unit of the SAR ADC and performs the actual conversion. It compares the analog input signal to the analog output of the DAC and generates a digital output of «0» or «1» to be used in the SAR logic. The comparator consists of two input terminals,  $+V_{in}$  and  $-V_{in}$ , where the analog input voltage is supplied.[7–8]. If the voltage at  $+V_{in}$  is less than  $-V_{in}$ , then at the output of the comparator  $V_{out}$ , «0» is output. But if  $-V_{in}$  is greater than  $+V_{in}$ , then «1» is output. Therefore, comparators are sometimes referred to as «single-bit ADCs». The common mode range of a conventional comparator is limited by current-voltage (I–V) operations.

And while in the middle of the power range, switching may not be possible. Therefore, a latched comparator can be used for a wide range of input signal oscillation. The offset error in this case depends on the MOSFET and the resistors. This offset does not affect the overall linearity, but does affect the global offset, which can be removed digitally. Traditionally, the reset phase stops the comparator after the proper input voltage has been established.

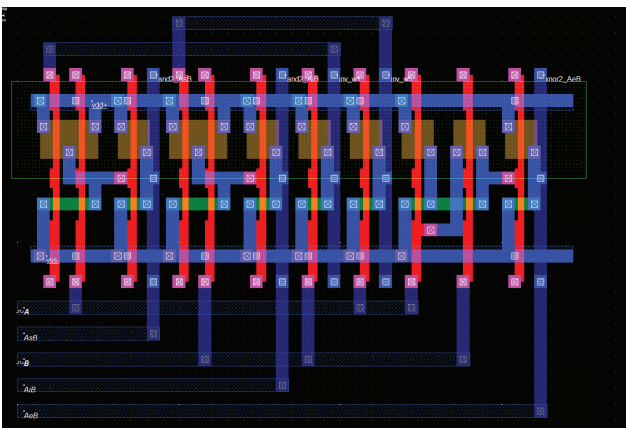


Fig.4. A comparator topology built in MicroWind is demonstrated.

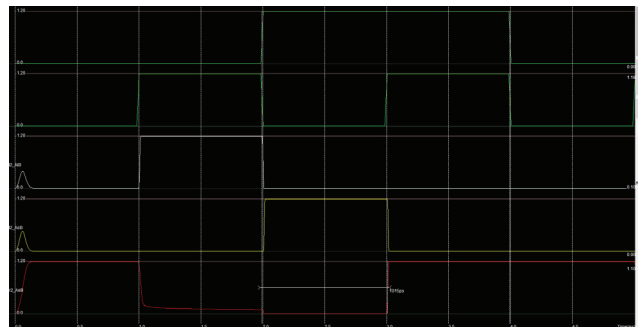


Fig.5. The result of simulating the operation of the comparator in MicroWind.

The last block of the SAR ADC is the sequential approximation control register itself. Serial approximation register (SAR) control logic defines each bit sequentially. The SAR register contains N-bits for an N-bit ADC. There are 3 possible states for each bit, it can be set to «1», reset to «0» or keep its value. In the first step,

the MSB is set to «1» and the other bits are reset to «0», the digital code is converted to an analog value via a DAC. The analog signal at the output of the DAC is applied to the input of the comparator and compared with the sampled input. Based on the result of the comparator, the

SAR controller determines the value of the MSB. If the input signal is higher than the DAC output, the MSB remains at «1», otherwise it is reset to «0». The remaining bits are defined in the same way. In the last cycle, the converted digital code is stored. Thus, an N-bit SAR ADC requires N+1

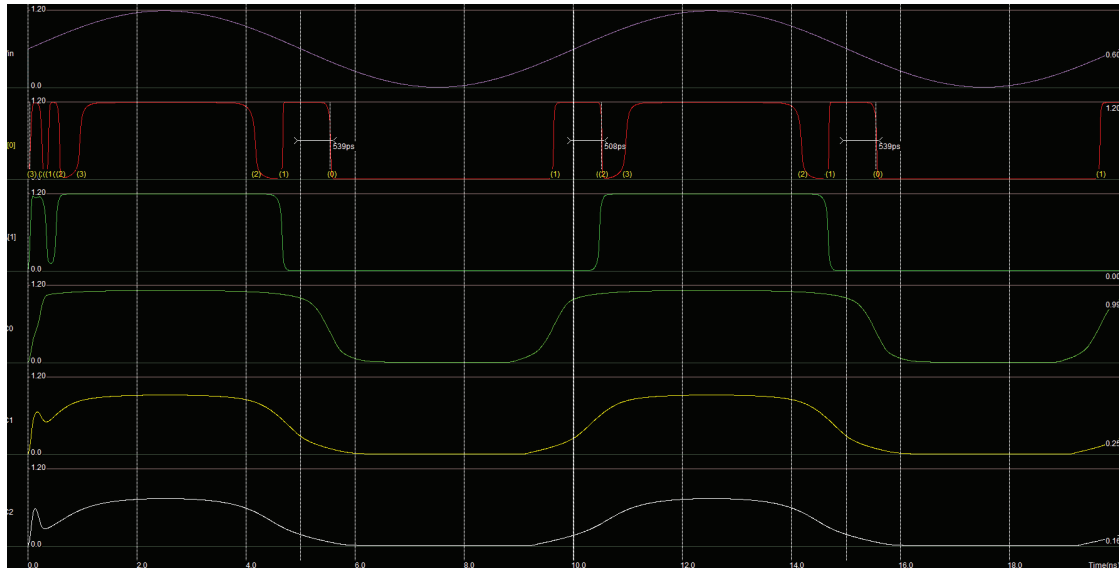


Fig. 6. SAR-ADC simulation result.

clock cycles to perform the conversion. SAR is a combination of counter and combinational logic. This helps achieve higher ADC resolution, but also changes power consumption and signal propagation delay accordingly [9].

A possible implementation of the topology of such a signal converter is presented in Fig. 7. It uses the previously mentioned function blocks: S/H, DAC, Comparator and SA Register.

**Conclusion**

For low-rate samples, we can sample from the lower bits. This therefore results in low power consumption without affecting linearity. The comparator bias voltage can also be formed as a voltage source with the output of the S/H circuit, which involves adding a bias to the analog input. But the main disadvantage of this technology is the high power consumption due to the isolated S/H circuit. These types of circuits are called internal S/H circuits and are typically implemented using a binary weighted capacitance. Thus, the MicroWind 3.1 software application

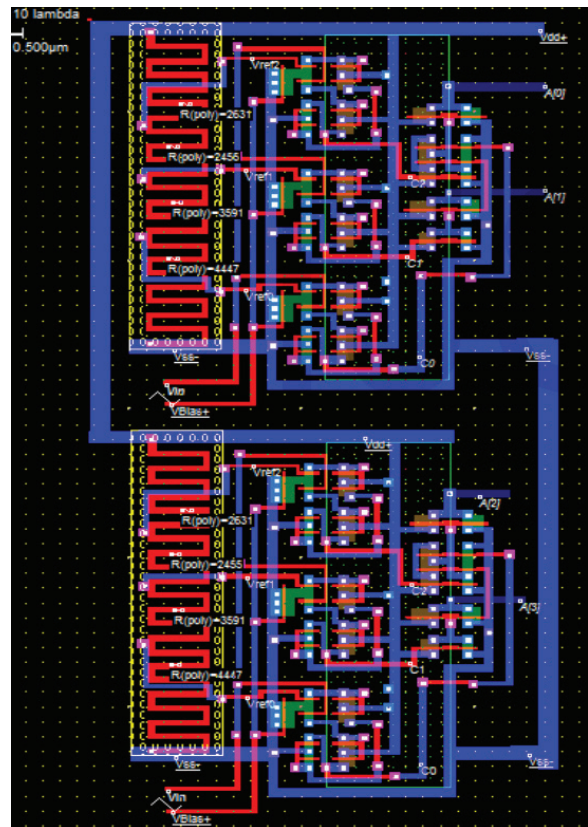


Fig. 7. Modeled SAR ADC topology in the micro wind software environment.



was used to model and design the operation of the DAC, as it is an open-source software tool for all users that allows the design and simulation of an integrated circuit at the physical description (IC) level. Also, the DSCH3.5 program is a logic editor and simulator of electronic circuits. DSCH3.5 is used to verify the architecture of the logic circuit before starting the microelectronics design.

### References

- [1]. S. Balasubramanian, V. J. Patel, & W. Khalil, Current and Emerging Trends in the Design of Digital-to-Analog Converters. In: Carbone, P., Kiaei, S., Xu, F. (eds) Design, Modeling and Testing of Data Converters. Signals and Communication Technology. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 83–118 (2014). [https://doi.org/10.1007/978-3-642-39655-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-39655-7_3).
- [2]. K. V. Ogorodnyk, B. P. Knysh, P. M. Ratushny, O. O. Lazarev Modeling in electronics: a study guide. VNTU, Vinnytsia, 118 p. (2017).
- [3]. O. Aiello, P. Crovetti, & M. Alioto. Fully synthesizable low-area analogue-to-digital converters with minimal design effort based on the dyadic digital pulse modulation // IEEE Access, 8, 70890–70899 (2020); <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2986949>.
- [4]. M. Gustavsson, J. J. Wikner, N. N. Tan, M. Gustavsson, J. J. Wikner, & N. N. Tan. Overview of D/A Converter Architectures // CMOS Data Converters for Communications, 87–124 (2002); [https://doi.org/10.1007/0-306-47305-4\\_4](https://doi.org/10.1007/0-306-47305-4_4).
- [5]. Jaime Castillo-Leon, Winnie Svendsen, Maria Dimaki, Valentina Arima, Muhammad Akram, Sandrine Miserere, Christiane Neumann, G. Kipling. Lab-on-a-Chip Devices and Micro-Total Analysis Systems A Practical Guide (2015). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-08687-3>.
- [6]. Athanasios Giannitsis. Microfabrication of biomedical lab-on-chip devices. A review // Estonian Journal of Engineering, 17, 109–139 (2011). <https://doi.org/10.3176/eng.2011.2.03>.
- [7]. P. Abgrall and A.-M. Gué. Lab-on-chip technologies: making a microfluidic network and coupling it into a complete microsystem – a review // J. Micromech. Microeng., 17 R15 (2007); <https://doi.org/10.1088/0960-1317/17/5/R01>.
- [8]. D. C. Duffy, J. Cooper McDonald, O. J. A. Schueller and G. M. Whitesides. Rapid prototyping of microfluidic systems in poly(dimethylsiloxane) // Anal. Chem., 70, 4974 (1998); <https://doi.org/10.1021/ac980656z>.
- [9]. S. Zare Harofte, et al., Recent Advances of Utilizing Artificial Intelligence in Lab on a Chip for Diagnosis and Treatment // Small, 18(42), pp. 2203169 (2022); <https://doi.org/10.1002/sml.202203169>.
- [10]. S.-I. Funano, N. Ota, and Y. Tanaka. A simple and reversible glass–glass bonding method to construct a microfluidic device and its application for cell recovery // Lab on a Chip, 21(11), p. 2244–2254 (2021) <https://doi.org/10.1039/D1LC00058F>.

Стаття надійшла до редакції 18.03.2024 р.

PACS85.40.Ry

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.1.300140>

## MODELING OF ANALOG-TO-DIGITAL SIGNAL CONVERTERS FOR SENSOR MICROSYSTEMS IN THE MICROWIND SOFTWARE

*L. I. Nykyruy<sup>1</sup>, R. V. Ilnytskyi<sup>2</sup>, M. F. Pavlyuk<sup>3</sup>*

Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Shevchenko Str. 57, Ivano-Frankivsk, 76018.  
Ukraine, +380956991785

Email: <sup>1</sup> lyubomyr.nykyruy@pnu.edu.ua, <sup>2</sup> roman.ilnitsky@pnu.edu.ua,

<sup>3</sup> myroslav.pavlyuk@pnu.edu.ua

### Summary

The purpose of the submission is a computer simulation of analog-digital converters, we chose such a converter as the serial approximation ADC (SAR ADC).

It is shown for low-rate samples, we can sample from the lower bits. This therefore results in low power consumption without affecting linearity. The comparator bias voltage can also be formed as a voltage source with the output of the S/H circuit, which involves adding a bias to the analog input. But the main disadvantage of this technology is the high power consumption due to the isolated S/H circuit. These types of circuits are called internal S/H circuits and are typically implemented using a binary weighted capacitance. Thus, the MicroWind 3.1 software application was used to model and design the operation of the DAC, as it is an open-source software tool for all users that allows the design and simulation of an integrated circuit at the physical description (IC) level. Also, the DSCH3.5 program is a logic editor and simulator of electronic circuits. DSCH3.5 is used to verify the architecture of the logic circuit before starting the microelectronics design

**Keywords:** analogue-to-digital converter, MicroWind software, submicron technology

PACS85.40.Ry

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.1.300140>

## МОДЕЛЮВАННЯ АНАЛОГО-ЦИФРОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СИГНАЛІВ ДЛЯ СЕНСОРНИХ МІКРОСИСТЕМ У ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ MICROWIND

*Л. І. Никуруй<sup>1</sup>, Р. В. Ільницький<sup>2</sup>, М. Ф. Павлюк<sup>3</sup>*

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, вул. Шевченка, 57,  
Івано-Франківськ, 76018, Україна, +380956991785,

Email: <sup>1</sup> lyubomyr.nykyruy@pnu.edu.ua, <sup>2</sup> roman.ilnitsky@pnu.edu.ua,

<sup>3</sup> myroslav.pavlyuk@pnu.edu.ua

### Реферат

Метою дослідження є комп'ютерне моделювання дизайну аналого-цифрових перетворювачів обрано перетворювач АЦП послідовного наближення (SAR ADC).

При виконанні дослідження здійснено аналіз архітектури існуючих типів цифро-аналогових перетворювачів, застосовано комп'ютерні симуляції у середовищі MicroWind.

Показано, що для низькошвидкісних вибірок можна робити вибірку з нижчих бітів. Таким чином, це призводить до низького енергоспоживання без впливу на лінійність. Напруга зміщення компаратора також може бути сформована як джерело напруги з виходом схеми S/H, що передбачає додавання зміщення до аналогового входу. Але основним недоліком цієї технології є високе енергоспоживання через ізольовану схему S/H. Ці типи електричних кіл називаються внутрішніми кола S/H, і, зазвичай реалізуються з використанням двійкової зваженої ємності. Таким чином, програмний додаток MicroWind 3.1 використовувався для моделювання та проектування роботи ЦАП, оскільки це програмний інструмент із відкритим вихідним кодом для всіх користувачів, який дозволяє проектувати та моделювати інтегральну схему на рівні фізичного опису (IC). Логічним редактором і симулятором електронних схем є програма DSCH3.5, яка використовується для перевірки архітектури логічної схеми перед початком проектування мікроелектроніки.

**Ключові слова:** цифро-аналоговий перетворювач, програмне забезпечення MicroWind, субмікронна технологія

# XI INTERNATIONAL CONFERENCE “TOPICAL PROBLEMS OF SEMICONDUCTOR PHYSICS”

---

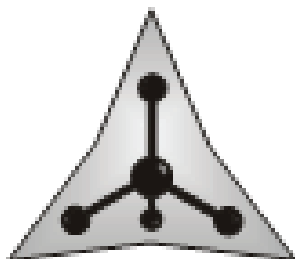
## XI МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ «АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ФІЗИКИ НАПІВПРОВІДНИКІВ»

---

---

**Ministry of Education and Science of Ukraine  
Institute of Physics of NASU  
V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine  
Scientific Council “Semiconductor and Dielectric Physics” at Physics and Astronomy Department of NASU  
Drohobych Ivan Franko State Pedagogical  
University**

### XI INTERNATIONAL CONFERENCE TOPICAL PROBLEMS OF SEMICONDUCTOR PHYSICS



**PRYKARPATTYA**

**Drohobych, UKRAINE  
MAY 27–31, 2024**

#### **INVITATION LETTER**

By this letter we inform you that  
XI International Conference on  
**Topical Problems of Semiconductor Physics**  
will take place in Drohobych  
on May 27 – 31, 2024

**Welcome to the conference!**

**THEMATIC OF THE CONFERENCE**

1. New frontiers in semiconductors and their based structures for electronics, optoelectronics, spintronic and sensing
2. Semiconductor low-dimensional structures: advances in synthesis, characterization, theoretical modeling and applications
3. The semiconductors for LEDs, solar and related energy technologies and sensor materials
4. Synthesis, processing and characterization of multifunctional oxide materials
5. Advanced strategies for smart functional and multifunctional bionanomaterials and biointerfaces
6. Laser material processing: from fundamental interactions to innovative applications
7. Modern computational methods and their applications in materials science: Synergy of theory and experiment

**LOCAL ORGANIZING COMMITTEE**

**CHAIRMAN: IHOR STOLYARCHUK**  
**VICE-CHAIRMEN: O. KUZYK, V. HOLSKYI, V. POPOVYCH**  
**COORDINATOR: V. HOLSKYI,**

Members:

V. Brytan, O. Dan'kiv, D. Karpyn, A. Kripak, R. Leshko, H. Metsan, G. Bandura, Yu. Pavlovskiy, R. Pazyuk, A. Popovych, L. Pan'kiv, Yu. Uhryn, I. Shakleina, Yu. Maturin

**ORGANIZING COMMITTEE**

**Co-chairman: Ivan Blonskyi**, Corresponding member of NAS of Ukraine, Professor

**Co-chairman: Olexander Stronskyi**, Professor

**Co-chairman: Ihor Stolyarchuk**, Professor

**Members:**

1. M. Brodyn (Kyiv, Ukraine)
2. V. Boichuk (Ivano-Frankivsk, Ukraine)
3. I. Bilynskiy, (Kryvyi Rih, Ukraine)
4. I. Dmytruk (Kyiv, Ukraine)
5. A. Dmytruk (Kyiv, Ukraine)
6. I. Hadzaman (Drohobych, Ukraine)
7. D. Korbutyak (Kyiv, Ukraine)
8. M. Krupa (Kyiv, Ukraine)
9. Ya. Lepikh (Odessa, Ukraine)
10. O. Makhanets (Chernivtsi, Ukraine)
11. A. Medvid' (Riga, Latvia)
12. S. Melnychuk (Chernivtsi, Ukraine)
13. V. Mitsa (Uzhhorod, Ukraine)

14. L. Nykyruy (Ivano-Frankivsk, Ukraine)
15. B. Pavlyk (Lviv, Ukraine)
16. R. Peleshchak (Lviv, Ukraine)
17. L. Poperenko (Kyiv, Ukraine)
18. V. Popovych (Drohobych, Ukraine)
19. V. Poroshyn (Kyiv, Ukraine)
20. A. Rovenchak (Lviv, Ukraine)
21. S. Ryabchenko (Kyiv, Ukraine)
22. V. Stadnyk (Lviv, Ukraine)
23. O. Stronskyi (Kyiv, Ukraine)
24. H. Terletska (Murfreeseboro, USA)
25. Z. Tsibriy (Kyiv, Ukraine)
26. M. Vakiv (Kyiv, Ukraine)
27. Yu. Vaksman (Odessa, Ukraine)
28. I. Virt (Drohobych, Ukraine)
29. V. Yuhymchuk (Kyiv, Ukraine)
30. D. Zayachuk (Lviv, Ukraine)

**INTERNATIONAL PROGRAM COMMITTEE**

1. M. Brodyn (Kyiv, Ukraine)
2. I. Blonskyi (Kyiv, Ukraine)
3. O. Belyaev (Kyiv, Ukraine)
4. I. Bolesta (Lviv, Ukraine)
5. P. Dluzewski (Warsaw, Poland)
6. V. Fediv (Chernivtsi, Ukraine)
7. Yu. Hnatenko (Kyiv, Ukraine)
8. V. Kadan (Kyiv, Ukraine)
9. A. Kiv (Be'er Sheva, Israel)
10. V. Kochelap (Kyiv, Ukraine)
11. D. Korbutyak (Kyiv, Ukraine)
12. I. Kogoutioug (Minnesota, USA)
13. O. Kovalenko (Dnipro, Ukraine)
14. M. Kuzma (Rzeszów, Poland)
15. Ya. Lepikh (Odessa, Ukraine)
16. V. Manzhara (Kyiv, Ukraine)
17. A. Medvid' (Riga, Latvia)
18. L. Nykyruy (Ivano-Frankivsk, Ukraine)
19. A. Perrone (Lecce, Italy)
20. L. Poperenko (Kyiv, Ukraine)
21. V. Poroshyn (Kyiv, Ukraine)
22. S. Ryabchenko (Kyiv, Ukraine)
23. V. Shenderovskiy (Kyiv, Ukraine)
24. M. Shiojiri (Kyoto, Japan)
25. O. Shpotyuk (Lviv, Ukraine)
26. F. Sizov (Kyiv, Ukraine)
27. I. Stolyarchuk (Drohobych, Ukraine)
28. O. Stronskyi (Kyiv, Ukraine)
29. H. Terletska (Murfreeseboro, USA)
30. M. Tkach (Chernivtsi, Ukraine)
31. M. Vakiv (Lviv, Ukraine)
32. A. Voloshinovskii (Lviv, Ukraine)
33. R. Zdyb (Lublin, Poland)

### CONTACT ADDRESS

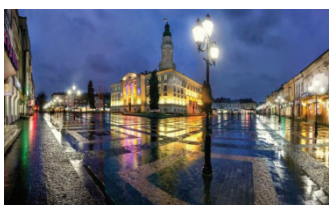
**Prof. I. Stolyarchuk**

Faculty of Physics, Mathematics, Economics  
and Innovation Technologies, DSPU  
3 Stryiska Str.  
Drohobych, LV REG 82100, Ukraine  
E-mail: ictsp@dspu.edu.ua

### CONFERENCE LANGUAGES: English, Ukraine

### IMPORTANT DATES

*April 14, 2024 – Online registration deadline*  
*April 14, 2024 – Abstracts submission deadline*  
*May 5, 2024 – Abstracts acceptant*  
*May 12, 2024 – Publication fee*  
*May 12, 2024 – Registration and payment of  
the organizational fee online*  
*May 27, 2024 – Registration and accommo-  
dation*  
*May 27, 2024 – ICTPSP-XI opening*



### CONFERENCE FORMAT

The conference will be held in a hybrid format (off-line and on-line). Its aim is to promote scientific contacts and discussions between researchers from various fields of semiconductor physics. All materials are in electronic format

The work of the conference will be heard invited plenary and oral sectional reports, a there will also be a presentation and review poster reports.

### LANGUAGE FOR SUBMISSION OF MATERIALS: English

Participant registration and abstracts submission will be **online only**:

<https://sites.google.com/dspu.edu.ua/topic-problems-semiconductor/materials-forms>

### PUBLICATION OF MATERIALS

The presented reports will be recommended by the program committee for publication in scientific and technological journals: «Journal of Physics Studies», «Physics and Chemistry of Solid State», “Visnyk of the Lviv University. Series Physics” and “Material Today: Proceedings”. Note for authors: it will be necessary to prepare your manuscripts according to journal requirements and send it to the editorial board of appropriate journal.

### CONFERENCE SPONSORS

For financial support of the conference, sponsors are invited both from Ukraine and from other countries of states Sponsors will be (if desired - from their trademark or logo) indicated in information materials of the conference. Those who wish to provide sponsorship contact the organizing committee conferences.

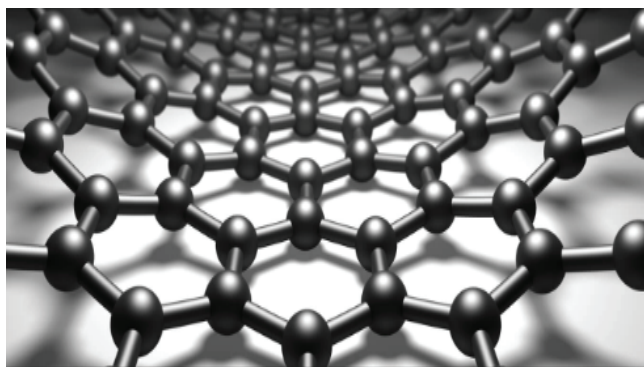
Міністерство освіти і науки України  
Одеська державна академія будівництва та архітектури  
Українське фізичне товариство  
Академія наук вищої школи України  
Міжвідомчий науково-навчальний  
фізико-технічний центр МОН і НАН України



## ЗАПРОШЕННЯ

на VI Всеукраїнську науково-практичну  
конференцію здобувачів вищої освіти  
і молодих вчених

### ФІЗИЧНІ ОСНОВИ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В БУДІВЕЛЬНІЙ ІНДУСТРІЇ



4-5 квітня 2024 р.

м. Одеса

#### ШАНОВНІ ЗДОБУВАЧІ ВИЩОЇ ОСВІТИ ТА МОЛОДІ ВЧЕНІ!

Запрошуємо Вас прийняти участь в роботі VI Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих вчених «Фізичні основи сучасних технологій в будівельній індустрії», проведення якої передбачено 4 – 5 квітня 2024 р. в Одеській державній академії будівництва та архітектури.

#### ОРГКОМІТЕТ

- Ковров А.В.** к.т.н., професор, заслужений діяч науки і техніки України, ректор Одеської державної академії будівництва та архітектури, *голова оргкомітету;*
- Кровяков С.О.** д.т.н., професор, проректор з наукової роботи Одеської державної академії будівництва та архітектури, *заступник голови оргкомітету;*
- Писаренко О.М.** к.ф.-м.н., доцент, завідувач кафедри фізики Одеської державної академії будівництва та архітектури, *заступник голови оргкомітету;*

- Лепіх Я.І.** д.ф.-м.н., професор, віце-президент Українського фізичного товариства, голова Одеського регіонального відділення Академії наук вищої школи України;
- Саницький М.А.** д.т.н., професор, завідувач кафедри будівельного виробництва Національного університету «Львівська політехніка»;
- Гоцульський В.Я.** д.ф.-м.н., професор, завідувач кафедри фізики та астрономії Одеського національного університету імені І.І. Мечникова;
- Гохман О.Р.** д.ф.-м.н., професор кафедри прикладної математики та інформатики Південноукраїнського національного університету імені К.Д.Ушинського;
- Борщак В.А.** д.ф.-м.н., ст.н.с., провідний науковий співробітник Міжвідомчого науково-навчального фізико-технічного центру МОН і НАН України;
- Шинкевич О.С.** д.т.н., професор кафедри процесів та апаратів в технології будівельних матеріалів Одеської державної академії будівництва та архітектури;
- Колохов В.В.** к.т.н., доцент кафедри технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій Придніпровської державної академії будівництва та архітектури;
- Вілінська Л.М.** к.ф.-м.н., доцент кафедри фізики Одеської державної академії будівництва та архітектури;
- Загинайло І.В.** к.ф.-м.н., доцент кафедри фізики Одеської державної академії будівництва та архітектури.

**Метою конференції** є сприяння підвищенню якості освіти, формування професійно-значущих умінь, а також поліпшення практичної і науково-теоретичної підготовки студентів та молодих вчених з фізики та інших технічних дисциплін.

#### **НА КОНФЕРЕНЦІЇ ПЕРЕДБАЧЕНА РОБОТА ЗА НАСТУПНИМИ НАПРЯМКАМИ**

- ресурсо- та енергозберігаючі технології виробництва будівельних матеріалів і конструкцій
- фізико-хімічні процеси в будівельних матеріалах на різних стадіях їх формування та експлуатації
- фізико-хімічні основи впливу багатofункціональних нанодобавок на структуру та властивості будівельних матеріалів
- електрофізичні технології у виробництві будівельних матеріалів
- тепломасообмін у будівельних матеріалах та огорожувальних конструкціях
- захист будівельних матеріалів і конструкцій від агресивних фізичних і хімічних впливів
- інноваційні рішення в будівельній фізиці для забезпечення комфортного середовища для людини в будівлях і територіях
- моделювання та оптимізація властивостей будівельних матеріалів
- моделювання та оптимізація в задачах будівельної механіки
- моделювання та оптимізація енергоефективності будівель і споруд

#### **УМОВИ УЧАСТІ**

Направити в оргкомітет до 22 березня 2024 р.:

1. Заявку на участь (зміст заявки наведено нижче);
2. Електронний файл з текстом тез доповіді в форматі MS Word (розширення «.doc»/«.docx»).

Тези на конференцію подаються українською або англійською мовами. Рішення про включення матеріалів до збірника приймає редакційна колегія, до якої входять члени Оргкомітету.



У заявці на участь в конференції потрібно вказати: прозвище, ім'я, по-батькові, місце навчання і номер академічної групи (або місце роботи) автора, прізвище, ім'я, по-батькові, місце роботи, посаду, науковий ступень і вчене звання (при наявності) наукового керівника, контактні данні (e-mail, телефон, поштову адресу), яка форма участі планується (виступ з доповіддю і друк тез, лише друкування тексту тез доповіді, лише участь в дискусії), а також тему Вашої доповіді. Для доповідей за авторством кількох авторів слід надати данні про всіх співавторів.

### ВИМОГИ ДО ЗМІСТУ ТА ОФОРМЛЕННЯ ТЕЗ ДОПОВІДЕЙ

Оргкомітетом приймаються доповіді, в яких повідомляється про **оригінальні результати наукової або конструкторської роботи за участю авторів**. Тези доповіді повинні включати: актуальність дослідження, сучасний стан проблеми, мету роботи, **оригінальні результати дослідження з позначенням особистого внеску автора**, висновки, анотації на двох мовах обсягом 4-6 строк кожна та посилання на використані джерела. **Тези, з тексту яких не буде зрозумілий особистий внесок автора в отриманні результатів, будуть відхилятися редакційною колегією.**

Обсяг тез може становити від 2 до 6 **повних** сторінок формату А4 з полями по 2 см з усіх боків, набраних шрифтом Times New Roman 14 пт. з міжрядковим інтервалом 1. Тези з незаповненими до кінця сторінками будуть повертатися на доопрацювання.

Для оформлення тез відповідно до вимог редакції **необхідно** завантажити з сайту Конференції <https://sites.google.com/site/odabaphysicsconf> файл шаблону на обраній мові та замістити його текст своїм.

### КОНТРОЛЬНІ ДАТИ

Представлення заявок і тез доповідей	до 22 березня 2024 р.
Початок роботи	4 квітня 2024 р.

Матеріали буде видано окремим збірником. Матеріали, що не відповідають встановленим вимогам до змісту, та ті, що надійшли пізніше вказаного терміну, оргкомітетом до публікації не приймаються.

### УЧАСТЬ У КОНФЕРЕНЦІЇ ТА ПУБЛІКАЦІЯ ТЕЗ Б Е З К О Ш Т О В Н І

#### АДРЕСА ОРГКОМІТЕТУ

Одеська державна академія будівництва та архітектури,  
65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4.

#### Координатори

Вілінська Людмила Миколаївна, тел. 098-267-8425

Загинайло Ігор Володимирович, тел. 048-788-1568

**E-mail** (в т.ч. для надсилання тез): [conf-phys@odaba.edu.ua](mailto:conf-phys@odaba.edu.ua)

**Сайт конференції:** <https://sites.google.com/site/odabaphysicsconf>



<http://odaba.edu.ua/>

## ІНФОРМАЦІЯ ДЛЯ АВТОРІВ. ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ У ЖУРНАЛ

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

1. Фізичні, хімічні та інші явища, на основі яких можуть бути створені сенсори
2. Проектування і математичне моделювання сенсорів
3. Сенсори фізичних величин
4. Оптичні, оптоелектронні і радіаційні сенсори
5. Акустоелектронні 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 на CD. Рукописи, які пропонуються авторами з України або країн СНД до видання англійською мовою обов'язково доповнюються україномовною або російськомовною версією. Електронна копія може бути надіслана електронною поштою.
2. Прийнятні формати тексту: MS Word (rtf, doc, 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 (НДЛ-3),  
вул. Дворянська, 2,  
Одеса, 65082, Україна.

Телефон / факс +38(048) 723–34–61,  
E-mail: [semst-journal@onu.edu.ua](mailto:semst-journal@onu.edu.ua),  
<http://semst.onu.edu.ua>

Здійснюється анонімне рецензування рукописів статей.

## Правила підготовки рукопису:

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

Авторське право переходить Видавцю.

Титульний аркуш:

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

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

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

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

5. Анотація: до 1000 символів.

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

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

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

7. До кожного примірника статті додаються реферати українською та англійською мовами (кожен реферат на окремому аркуші). Особливу увагу слід приділяти написанню резюме статті англійською мовою. Для цього доцільно користуватися послугами кваліфікованих спеціалістів-лінгвістів з подальшим науковим редагуванням тексту автором(-ами). Перед словом «реферат» необхідно написати повну назву статті відповідною мовою, УДК, прізвища та ініціали авторів, назви установ.

Реферат обсягом 200–250 слів має бути структурованим: мета (чітко сформульована), методи дослідження, результати дослідження (стисло), узагальнення або висновки.

Після тексту реферату з абзацу розміщуються ключові слова.

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

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

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

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

[1]. I. M. 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).

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

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

Кожен рисунок повинен бути 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.

Кольоровий друк можливий, якщо його вартість сплачується авторами чи їх спонсорами.

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

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

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

Після одержання коректури статті автор повинен виправити лише помилки (чітко, синьою

або чорною ручкою неправильно закреслити, а поряд з цим на полі написати правильний варіант) і терміново відіслати статтю на адресу редколегії електронною поштою.

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

Відхилені статті не повертаються.

#### *ДО УВАГИ АВТОРІВ*

*Міжнародна агенція ISSN встановила скорочену назву нашого журналу  
«Sens. elektron. mikrosist. tehnol.»*

*Просимо Вас у своїх посиланнях і бібліографічних даних статей використовувати саме таку назву оскільки по ній буде здійснюватися посилання на Вашу статтю.*

# INFORMATION FOR AUTHORS. 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 narrow-profile jargon phrase unreasonable introduction.

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

1. Manuscripts should be submitted in duplicate in Ukrainian or English, a hard copy and supplemented with a text file and figures on a CD. Manuscripts which are offered by authors from Ukraine or CIS countries to the edition in English are necessarily supplemented by Ukrainian or Russian version. An electronic copy may be submitted by e-mail.
2. Acceptable text formats: MS Word (rtf, doc, 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,  
The Vice Editor, Odesa National  
I. I. Mechnykov University, ISEPTC (RL-3),  
str. Dvoryanskaya, 2, Odesa,  
65082, Ukraine.

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

*Manuscripts of articles anonymous reviewing  
is carried out*

### The manuscript preparation rules:

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

Copyright transfer to the Publisher.

Title Page:

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

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

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

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

5. Abstract: up to 1000 characters.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

The literature registration order should conform to DAS of Ukraine requirements, for ex-ample:

[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).

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

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

Each figure should be printed on a separate page and have a size not exceeding 160x200 mm. For text inside figures, use 10pt. Measurement units should be indicated after a comma (not in blankets). All figures are to be numbered in order of its appearance in the text, with sections denoted as (a), (b), etc. Placing the figure numbers and captions inside figures is not allowed.

Color printing is possible if its cost is covered by the authors or their sponsors.

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

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

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

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

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

Not accepted manuscripts will not be returned.

***TO AUTHOR ATTENTION***

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

*Комп'ютерна верстка – В. Вітвицька*

Підписано до друку 27.03.2024 р. Формат 60×84/8.  
Ум.-друк. арк. 6,0. Тираж 50 прим.  
Зам. № 2781.

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

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

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