

p-ISSN 1815-7459

e-ISSN 2415-3508

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

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

# СЕНСОРА ЕЛЕКТРОНІКА І МІКРОСИСТЕМНІ ТЕХНОЛОГІЇ 2026 – Т. 23, № 1

# SENSOR ELECTRONICS AND MICROSYSTEM TECHNOLOGIES 2026 – VOL. 23, No. 1

*Науково-технічний журнал*

*Scientific and Technical Journal*

Заснований 13.11.2003 року  
Виходить 4 рази на рік

Established on 13.11.2003  
Published 4 times a year

УДК 681.586

UDC 681.586

Засновник Одеський національний  
університет імені І. І. Мечникова

Founded by Odesa I. I. Mechnikov  
National University

За підтримки Українського фізичного  
товариства і Академії наук вищої школи  
України

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

Ідентифікатор медіа: R30-03678  
(zareestrovano Natsionalnoiu Radoiu  
Ukrainy z pytanyh telebachennya  
i radiomovlennya vid 28.03.2024 za № 1050)

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

Журнал внесено до категорії «Б» Переліку  
наукових фахових видань України з фізико-  
математичних, технічних та біологічних наук

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

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

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

Видається за рішенням Вченої ради  
Одеського національного університету  
імені І. І. Мечникова  
*Протокол № 7 від 24.03.2026 р.*

Published as per the resolution of the Academic  
Council of Odesa I. I. Mechnikov National  
University  
*Minutes No. 7 dated 24.03.2026*

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

Editorial Board address:  
2 Zmiiienka Vsevoloda St, ISEPTC,  
Odesa I. I. Mechnikov National University,  
Odesa, 65082, Ukraine  
Tel/Fax: +38(048)723-34-61

E-mail: [semst-journal@onu.edu.ua](mailto:semst-journal@onu.edu.ua), [semst.onu.edu.ua](http://semst.onu.edu.ua)  
© ОНУ імені І. І. Мечникова, 2026

## Редакційна колегія

Головний редактор:

**Лепіх Я. І.** (Одеса, Україна)

Заступник головного редактора:

**Жуков С. О.** (Одеса, Україна)

Відповідальний секретар:

**Балабан А. П.** (Одеса, Україна):

Члени редколегії:

**Андрієвський Б. В.** (Кошалін, Польща)

**Беляєв О. Є.** (Київ, Україна)

**Вербицький В. Г.** (Київ, Україна)

**Віш Гжегож** (Жешув, Польща)

**Голомб Р. М.** (Ужгород, Україна)

**Гусовський Марек** (Вроцлав, Польща)

**Дзядевич С. В.** (Київ, Україна)

**Єралієва Бахит** (Астана, Казахстан)

**Жолудов Ю. Т.** (Харків, Україна)

**Ільченко В. В.** (Київ, Україна)

**Ільчук Г. А.** (Львів, Україна)

**Калінчак В. В.** (Київ, Україна)

**Коваленко О. В.** (Дніпро, Україна)

**Лабуз Мірослав** (Жешув, Польща)

**Мельник В. Г.** (Київ, Україна)

**Міца В. М.** (Ужгород, Україна)

**Музыка К. М.** (Харків, Україна)

**Никируй Л. І.** (Івано-Франківськ, Україна)

**Оліх О. Я.** (Київ, Україна)

**Рябченко С. М.** (Київ, Україна)

**Сеті Ю. О.** (Львів, Україна)

**Скришевський В. А.** (Київ, Україна)

**Сліпченко М. І.** (Харків, Україна)

**Стріха М. В.** (Київ, Україна)

**Черненко О. С.** (Одеса, Україна)

## Editorial Board

Editor-in-Chief:

**Lepikh Ya. I.** (Odesa, Ukraine)

Vice Editor-in-Chief:

**Zhukov S. O.** (Odesa, Ukraine)

Responsible Editor:

**Balaban A. P.** (Odesa, Ukraine):

Editorial Board Members:

**Andriyevskyy B. V.** (Koszalin, Poland)

**Belyaev A. E.** (Kyiv, Ukraine)

**Verbitsky V. G.** (Kyiv, Ukraine)

**Wis Grzegorz** (Rzeszow, Poland)

**Holomb R. M.** (Uzhhorod, Ukraine)

**Gusowski Marek** (Wroclaw, Poland)

**Dzyadevych S. V.** (Kyiv, Ukraine)

**Yeraliyeva Bakhyt** (Astana, Kazakhstan)

**Zholudov Yu. T.** (Kharkiv, Ukraine)

**Ichenko V. V.** (Kyiv, Ukraine)

**Ichuk H. A.** (Lviv, Ukraine)

**Kalinchak V. V.** (Kyiv, Ukraine)

**Kovalenko O. V.** (Dnipro, Ukraine)

**Labuz Mirosław** (Rzeszow, Poland)

**Melnyk V. G.** (Kyiv, Ukraine)

**Mitsa V. M.** (Uzhhorod, Ukraine)

**Muzyka K. M.** (Kharkiv, Ukraine)

**Nykyruy L. I.** (Ivano-Frankivsk, Ukraine)

**Olikh O. Ya.** (Kyiv, Ukraine)

**Ryabchenko S. M.** (Kyiv, Ukraine)

**Seti Yu. O.** (Lviv, Ukraine)

**Skryshevsky V. A.** (Kyiv, Ukraine)

**Slipchenko M. I.** (Kharkiv, Ukraine)

**Strikha M. V.** (Kyiv, Ukraine)

**Chernenko O. S.** (Odesa, Ukraine)

## ЗМІСТ CONTENTS

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

*V. M. Loktev, V. V. Hladkovskyi*  
MAIN RESULTS OF THE ACTIVITIES OF THE DIVISION OF PHYSICS AND ASTRONOMY OF THE NAS OF UKRAINE IN 2020–2025..... 4

*В. М. Локтев, В. В. Гладковський*  
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДІЯЛЬНОСТІ ВІДДІЛЕННЯ ФІЗИКИ І АСТРОНОМІЇ НАН УКРАЇНИ У 2020–2025 РОКАХ

### **Проектування і математичне моделювання сенсорів Sensors design and mathematical modeling**

*Ya. I. Lepikh, A. O. Karpenko, A. P. Balaban*  
METHODS OF FRACTAL ELECTRODYNAMICS FOR EFFICIENCY ENHANCEMENT AND MINIATURIZATION OF RADIATORS (REVIEW)..... 17

*Я. І. Леніх, А. О. Карпенко, А. П. Балабан*  
МЕТОДИ ФРАКТАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ І МІНІАТЮРИЗАЦІЇ ВИПРОМІНЮВАЧІВ (ОГЛЯД)

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

*I. B. Olenych, L. S. Monastyrskii, A. Yu. Kozak, V. Ya. Boiko, O. O. Sinkevych*

OPTIMIZATION OF THE STRUCTURE OF FIELD EFFECT TRANSISTORS BASED ON REDUCED GRAPHENE OXIDE FILM FOR PHOTO- AND GAS-SENSING APPLICATIONS ..... 27

*І. Б. Оленич, Л. С. Монастирський, А. Ю. Козак, В. Я. Бойко, О. О. Сінкевич*  
ОПТИМІЗАЦІЯ СТРУКТУРИ ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ НА ОСНОВІ ПЛІВКИ ВІДНОВЛЕНОГО ОКСИДУ ГРАФЕНУ ДЛЯ ФОТО- ТА ГАЗОЧУТЛИВИХ ЗАСТОСУВАНЬ

*Yu. A. Nitsuk, S. F. Huseynova*  
ENERGY STATES OF Fe IONS IN ZINC OXIDE NANOCRYSTALS..... 35

*Ю. А. Ніцук, С. Ф. Гусейнова*  
ЕНЕРГЕТИЧНІ СТАНИ ІОНІВ ЗАЛІЗА В НАНОКРИСТАЛАХ ОКСИДУ ЦИНКУ

**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

УДК 53,52

<https://doi.org/10.18524/1815-7459.2026.1.355909>

### ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДІЯЛЬНОСТІ ВІДДІЛЕННЯ ФІЗИКИ І АСТРОНОМІЇ НАН УКРАЇНИ У 2020–2025 РОКАХ

*В. М. Локтев*, <https://orcid.org/0000-0002-0673-4174>

*В. В. Гладковський*, <https://orcid.org/0000-0003-4491-0287>

Національна академія наук України,  
вул. Володимирська, 54, м. Київ, 01601, Україна  
e-mail: [vloktev@bitp.kiev.ua](mailto:vloktev@bitp.kiev.ua)

*Немає слави у кровопролиття.*  
Борис Джонсон, британський політик

#### Від редакції

І цього разу знайшла продовження традиція публікації в нашому журналі статті за матеріалами доповіді академіка-секретаря Відділення фізики і астрономії НАН України академіка Локтева Вадима Михайловича за результатами діяльності установ Відділення.

Відмінність полягає в тому, що звіт зроблено не річний, а за більш тривалий час 2020–2025 роки. Відсутній також аспект існуючих проблем у вітчизняній науці і освіті загалом, хоча частково це відображено в аналізі кадрових проблем лише Відділення.

В статті відображені значні досягнення в різних наукових напрямках фізики різними інститутами, а це для нашого мультидисциплінарного журналу дуже актуально і цікаво. З цього приводу редакція отримує від авторів і читачів позитивні відгуки. Впевнені, що і цього разу буде така ж реакція, і за це ми від імені читачів і редакції висловлюємо шановному Вадиму Михайловичу щиро вдячність.

**Анотація.** У статті подано огляд діяльності Відділення фізики і астрономії НАН України у 2020–2025 роках. Розглянуто основні напрями наукових досліджень та найважливіші результати, отримані установами Відділення у галузях фізики конденсованого стану, нанофізики, астрофізики, радіофізики та квантових технологій.

**Ключові слова:** фізика, астрономія, наукові дослідження, наукові установи, наукова діяльність

## ВСТУП

Період 2020–2025 років став одним із найскладніших етапів у новітній історії української науки. Наукові установи України функціонували в умовах одночасного впливу кількох кризових чинників: глобальної пандемії COVID-19, економічних обмежень та повномасштабної війни, розв’язаної російською федерацією проти України. Незважаючи на ці обставини, наукові колективи продовжували дослідження, забезпечуючи збереження та розвиток фундаментальних наукових шкіл.

Відділення фізики і астрономії Національної академії наук України є одним із ключових наукових центрів країни, що об’єднує провідні інститути у галузі фізики, астрофізики, матеріалознавства та радіофізики. Його установи розташовані у провідних наукових центрах України — Києві, Харкові, Львові та Ужгороді. Упродовж звітного періоду відбулися суттєві структурні зміни у мережі установ, а також трансформації у кадровому складі та організації наукової діяльності.

Метою цієї роботи є узагальнення основних результатів діяльності Відділення фізики і астрономії НАН України у 2020–2025 роках, аналіз ключових наукових досягнень установ, а також оцінка тенденцій розвитку кадрового потенціалу та публікаційної активності.

## ОСНОВНА ЧАСТИНА

Насамперед коротко охарактеризуємо сучасний стан Відділення фізики і астрономії НАН України. До його складу входять 12 наукових установ (у 2020 році їх було 16), розташованих у чотирьох ключових наукових центрах України: Києві, Харкові, Львові та Ужгороді.

До структури Відділення також інтегровано Миколаївську астрономічну обсерваторію, яка увійшла до складу Головної астрономічної обсерваторії НАН України (ГАО). Це сприяло зміцненню кадрового та інфраструктурного потенціалу ГАО, а також, сподіваємося, розвитку вітчизняної астрономії загалом.

Нині у складі Відділення налічується 64 члени НАН України, серед яких 20 академіків

і 44 члени-кореспонденти. Разом із 2682 науковими працівниками установ вони формують потужну наукову спільноту, яка забезпечує розвиток фундаментальних і прикладних досліджень у галузях фізики та астрономії.

Тепер про деякі наукові результати.

Якщо говорити про них, то цього разу не будемо робити це у традиційний спосіб і згадаємо лише кілька тих, які не називалися у попередні роки, хоча того варті. Навіть ці приклади досить яскраво демонструють рівень та масштаб здобутків науковців ВФА. Перелічимо деякі у прийнятій послідовності наших установ, а не за рейтингом.

В Інституті фізики одним із важливих результатів стали дослідження процесів еволюції структурування поверхні кремнію під дією фемтосекундних лазерних імпульсів із точно контрольованою кількістю (Рис. 1). Інакше кажучи, авторам вдалося встановити, як змінюється поверхня кремнію після кожного наступного такого імпульсу.

Показано можливість отримання суттєво різних результатів лазерної обробки за допомогою обмеженої кількості ідентичних імпульсів, коли саме кількість опроміненень визначає кінцеву структуру поверхні.

У роботі також виявлено ефект поверхнево-плазмонного підсилення генерації другої гармоніки на кремнії. Він пояснюється послідовністю фізичних процесів: після поглинання фемтосекундного лазерного імпульсу поверхня кремнію «металізується»; у ній виникають вільні носії, які породжують колективні збудження — поверхневі плазмони; ці плазмони інтерферують із лазерним випромінюванням, утворюючи періодичну структуру на поверхні; утворена «металева» ґратка, у свою чергу, підсилює генерацію другої гармоніки.

Отримані результати, за твердженням авторів, мають істотне значення для створення методів діагностики процесів лазерного структурування в реальному часі, що є особливо актуальним під час обробки неплоских поверхонь.

В Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова одним із помітних результа-

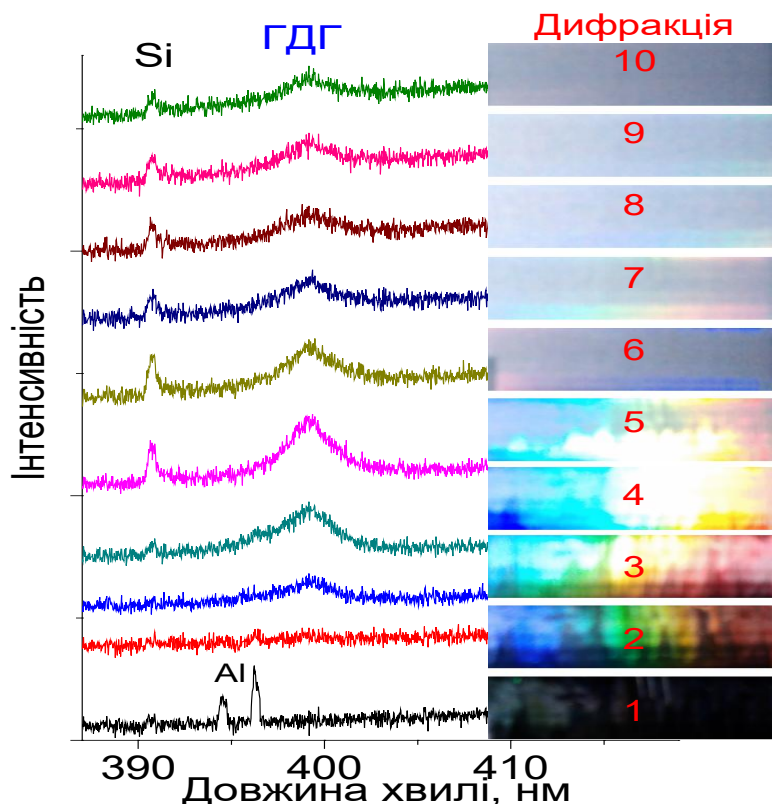


Рис. 1. Еволюція лазерно-індукованих поверхневих структур на кремнії. (A. Dmytruk et al., Optics & Laser Technology, 2024)

тів стала розробка нового методу оптичного визначення ультрамалих концентрацій речовини, аж до можливості детектування окремих молекул.

Ключовим елементом запропонованої методики є використання спеціально підготовлених підкладок. У даному випадку застосовуються поверхні, вкриті шаром нанокільок

$\text{SiO}_2$ , на які додатково напильються наночастинки благородних металів. У таких наночастинках виникають плазмонні збудження, що відіграють вирішальну роль у процесі детектування (Рис. 2).

Особливістю структури підкладки є те, що досліджувані молекули концентруються у впадинах між сферами  $\text{SiO}_2$ , саме там, де

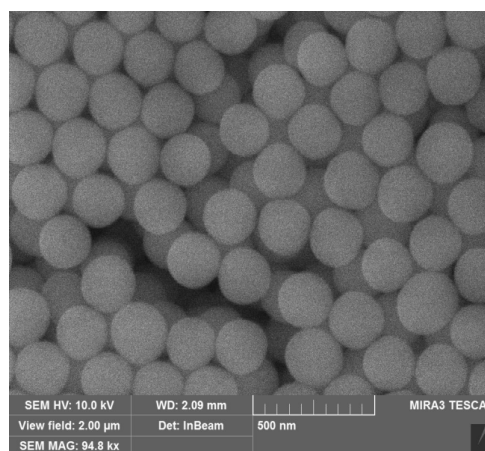
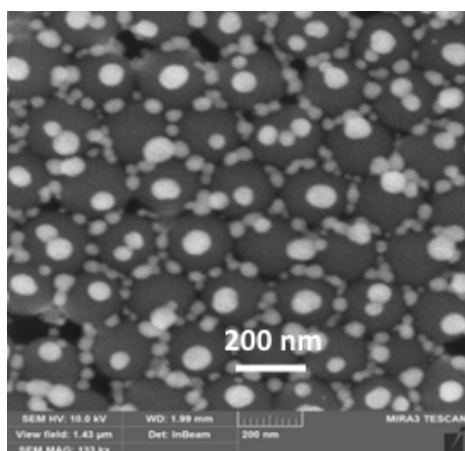


Рис. 2. SERS підкладки.  
(V. Dzhagan, N. Mazur, O. Kapush et al. ACS Omega, 2024)

локалізуються і металеві наночастинки. За збудження плазмонних резонансів лазерним випромінюванням електричне поле в цих областях різко зростає — на кілька порядків. Саме це дозволяє реєструвати надзвичайно малі кількості речовини.

Завдяки такому підсиленню сигналу стає можливим визначення концентрацій на рівні приблизно  $10^{-10}$ – $10^{-13}$  моль/л, а також ідентифікація молекул за їхніми характерними спектрами раманівського розсіювання світла, яке суттєво посилюється в присутності плазмонних наноструктур.

Важливо, що запропонована методика характеризується не лише високою чутливістю, яка відповідає рівню сучасних зарубіжних розробок, а й відносною простотою реалізації та невисокою вартістю виготовлення підкладок, що робить її перспективною для практичного застосування.

В Інституті металофізики імені Г.В. Курдюмова створено новий клас функціональних матеріалів – так звані високоентропійні інтерметаліди з ефектом пам’яті форми. Ці дослідження, за які автори були удостоєні Національної премії України імені Бориса Патона 2021 року, показали, що завдяки цілеспрямованим змінам в електронній структурі та контрольованій деформації кристалічної ґратки можна істотно розширити температурний інтервал їхнього застосування і величини актуальних параметрів.

Отримані високоентропійні сполуки TiZrHfCoNiCu демонструють стабільний ефект пам’яті форми при 3 % оборотної деформації. Це відкриває перспективи для створення високонадійних сенсорів, силових приводів і систем гасіння вібрацій, що знаходять застосування в авіакосмічній, автомобільній та інших високотехнологічних галузях, включаючи, що важливо, оборонну (Рис. 3).

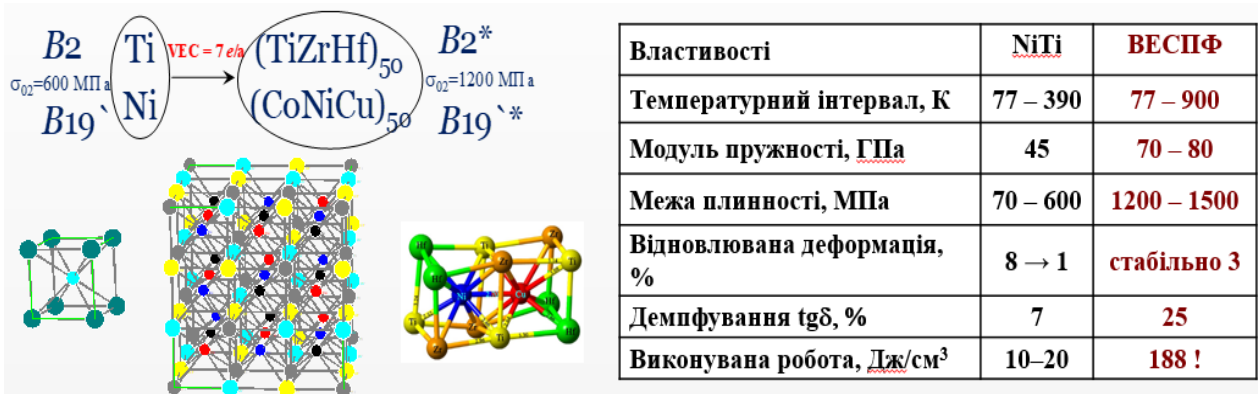


Рис. 3. Високоентропійні інтерметалічні сполуки з пам’яттю форми. (G. Firstov et al., Progress in Physics of Metals, 2023)

У Головній астрономічній обсерваторії одним із найбільш знакових досягнень ВФА стала модернізація лазерної станції «Голосіїв-Київ» (Рис. 4). Ця станція є Національним надбанням України та одночасно частиною міжнародної мережі, яка об’єднує близько тридцяти таких об’єктів у світі. Модернізація, яка виконувалася власними силами ГАО, включала заміну телескопа, створення нових електронних модулів обробки сигналів, приймального модуля з надширокопосмуговим підсилювачем і швидкодіючого помножувача. Цей вражаючий результат

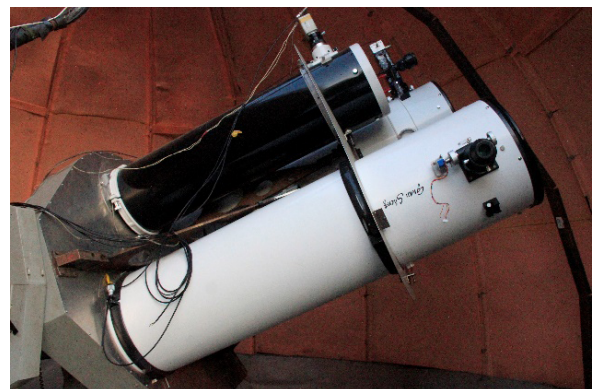


Рис. 4. Модернізований телескоп станції «Голосіїв-Київ».

свідчить, що українська астрономія залишається на передньому краї світових досліджень.

Попри складні умови – і природні, пов'язані з погодою, і соціальні, зумовлені війною, співробітники виконали понад 2000 вимірювань (Рис. 5), досягнувши точності, не гірше 4 см, при статистичній похибці, менше 1 см.

В Інституті фізики конденсованих систем тепер ім. І.Р. Юхновського (ІФКС) проведено дослідження квантових точок – нанокристалічних утворень розміром усього 5–10 нанометрів. Найбільшу увагу було приділено наночастинкам галюїдних перовскитів.

Ці матеріали мають виняткові оптоелектронні властивості: вони яскраво світяться, породжуючи електромагнетні хвилі у дуже

вузькому спектрі, що забезпечує недосяжну для інших випромінювачів чистоту кольорів.

Але є інша, ще не розв'язана, проблема – деградація їхніх унікальних оптоелектронних властивостей, яка відбувається через проникнення різних речовин крізь відносно велику у наночастинках поверхню. Тому збереження властивостей квантових точок, які насправді точками у фізичному сенсі не є, вимагає реального захисту їхніх поверхонь. Відповідні спеціальні покриття називають лігандами (Рис. 6).

Зазвичай, експериментальний підбір ефективних лігандів відбувається методом спроб і помилок і часто нагадує пошук наосліп. В ІФКС пішли іншим шляхом, а саме: вперше було розроблено систематичний підхід на основі комп'ютерного моделювання.

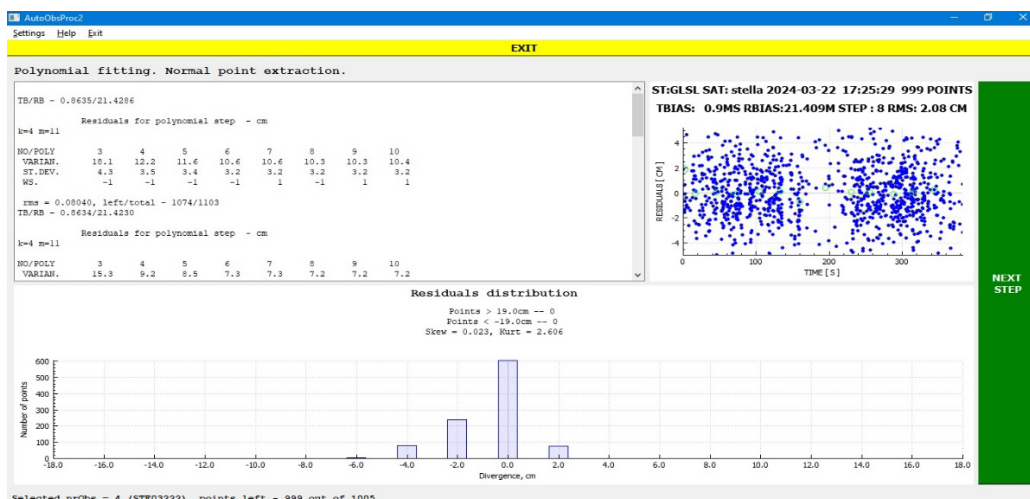


Рис. 5. Приклад обробленої локації штучних супутників Землі.  
(P. Lazorenko et al., Astronomy & Astrophysics, 2024)

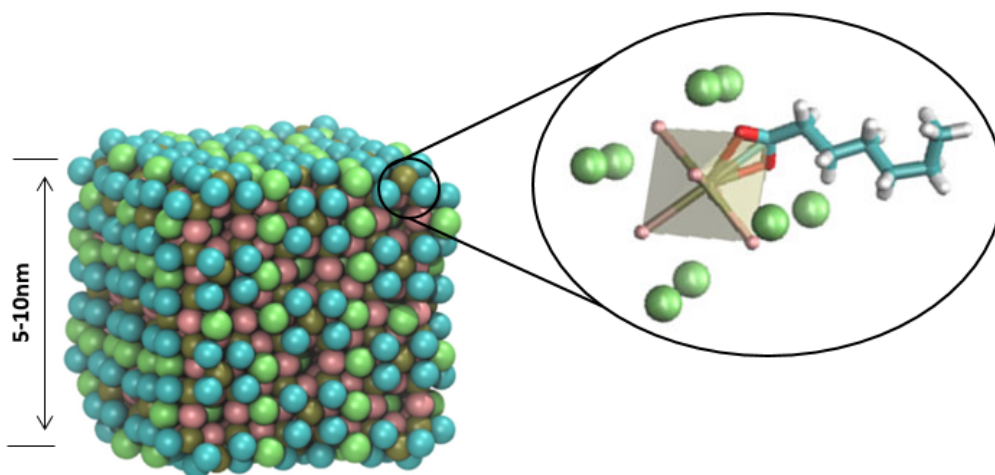


Рис. 6. Модельне зображення наночастинки. (A. Baumketner et al. Nature, 2024)

Тим самим було досліджено взаємодію цвітеріонних лігандів – молекул, що одночасно містять позитивно й негативно заряджені групи.

Саме вони виявилися найнадійнішими речовинами з точки зору зв'язування з поверхнею і забезпечення вищої розчинності, що забезпечило кращу стабільність квантових точок.

Розрахунки показали, що такі ліганди здатні утворювати на поверхні квантових точок впорядковані структури. Це було підтверджено експериментально: наночастинки з такими покриттями зберігали свої властивості протягом кількох тижнів, тоді як без них втрачали їх за 2-3 дні.

Результати опубліковані в журналі *Nature* і стали прикладом того, як поєднання комп'ютерного моделювання та експерименту відкриває нові горизонти в нанофізиці.

У харківському Інституті радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова (ІРЕ) проводились дослідження проблеми виявлення маловисотних БПЛА та інших об'єктів з захищеними від радіолокаційних сигналів покриттями з можливістю використання для цього акустичних сигналів від них. Розроблено експериментальний зразок такої мобільної акустичної системи (Рис. 7).



Рис. 7. Акустична система моніторингу повітряних об'єктів. (V.I. Lutsenko et al., *Akadempriodyka*, 2024)

Наразі проблема виявлення та ідентифікації безпілотних літальних апаратів є надзвичайно актуальною і радіометоди боротьби з ними є вкрай необхідною. Проте, що нормально, під час війни швидкого розвитку зазнають не тільки проблеми РЕБ, а й методики захисту радіоапаратури дронів, шахедів, ракет тощо. Через це традиційні методи РЕБ інколи втрачають свою ефективність проти нових типів БпЛА, передовсім тих, що працюють із застосуванням оптико-волоконних систем керування.

Запропонований в ІРЕ акустичний підхід дозволяє розв'язати цю проблему, адже кожен об'єкт має власний акустичний «почерк». Колектив науковців, використовуючи свій досвід у радіолокації, звідки взяв деякі знахідки, створив експериментальний зразок мобільної акустичної системи, здатної виявляти вертольоти на відстані до 3000 метрів, дрони літакового типу – на відстані до 600 метрів, а важкі квадрокоптери – до 100 метрів.

Оскільки всі явища відбуваються в атмосфері Землі, було розроблено алгоритми пригнічення завад і врахування впливу метеофакторів, також запропонована методика визначення акустичних сигнатур.

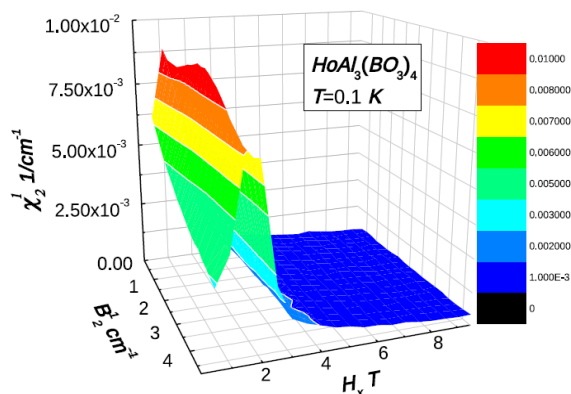
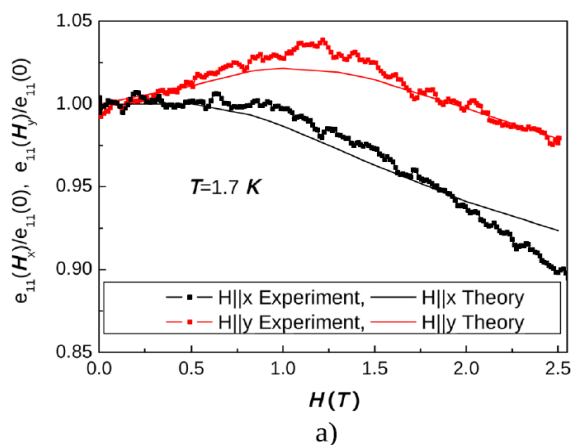
Особливу увагу приділено температурі повітря, від якої, як з'ясували автори, найбільше залежить точність визначення координат цілі.

Ця робота має велике практичне значення для обороноздатності України й демонструє, як фундаментальні знання однієї області трансформуються у прикладні рішення іншої. Хоча залишаються і складні задачі для подальших досліджень. Зокрема, узагальнення, або масштабування, методики на випадок скінченної кількості цілей, що летять одночасно. Тим не менш, можна додати, що і в розробленому вигляді акустична система реєстрації БпЛА викликала зацікавленість у певній кількості оборонних інстанцій, причому з різних родів військ ЗСУ.

Нарешті, ще один результат, який теж отримано у Харкові у Фізико-технічному інституті низьких температур ім. Б.І. Веркіна (ФТІНТ), попри всі труднощі воєнного часу.

Маємо на увазі створення у 2024 році за підтримки НАН України та міжнародної програми IMPRESS-U Харківського квантового центру.

Один із головних напрямів його діяльності – розробка елементів для квантових обчислень, зокрема кубітів на основі магнетних іонів. Причому не будь-яких, а таких, що знаходяться у так званих топологічних ґратках. Відповідні кубіти мають суттєву перевагу – вони значно довше зберігають когерентний, тобто істинно квантовий, стан, що дозволяє зменшити потребу у складних системах виправлення помилок у квантових пристроях, зокрема квантових комп'ютерах, зробивши їх більш стабільними та масштабованими (Рис. 8).



**Рис. 8.** Залежність деяких властивостей топологічних кубітів від магнетного поля при низьких температурах (А. Zvyagin, V. Slavin, *Scientific Reports*, 2024)

У здійснених у ФТНТі експериментах показано, що такі кубіти можуть існувати в алюмоборатах рідкоземельних елементів, де існує

міцний зв'язок між магнетною, електричною та пружною підсистемами. У нормальному (вихідному) стані магнетні іони в алюмоборатах між собою практично не взаємодіють, і саме це дає змогу достатньо легко керувати їхньою взаємодією (або взаємодією між кубітами), що здійснюється за допомогою зовнішніх факторів – магнетного чи електричного полів, а також механічного стискання.

Результати роботи опубліковані в журналах *Nature Communications*, *Scientific Reports* та інших провідних виданнях.

В Інституті електронної фізики відкрито ефект оптичного світіння, що виникає під час фазового переходу речовини з аморфного у кристалічний стан. Це явище було зафіксовано в нанорозмірних плівках складу  $(\text{LiF})_x(\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7)_{1-x}$  отриманих методом напилення на холодні нікелеві підкладки (Рис. 9).

У ході досліджень було виявлено новий канал релаксації енергії під час структурних перетворень у таких матеріалах. Проведені вимірювання показали, що інтенсивність структурно-оптичного випромінювання істотно залежить від товщини плівок. Зокрема встановлено, що ця залежність має характер, протилежний до залежності для термостимульованого випромінювання. Якщо інтенсивність останнього зростає зі збільшенням товщини плівки, то максимум структурно-оптичного випромінювання, навпаки, зменшується і за певних товщин – близько одного мікрметра – практично зникає.

Автори пояснюють виникнення такого випромінювання вивільненням енергії під час переходу системи з метастабільного аморфного стану до більш стабільного кристалічного.

Плівки  $\text{LiF}$  і  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  широко використовуються в радіаційній дозиметрії, тому отримані результати відкривають можливість створення нових типів дозиметрів. У таких приладах поряд із традиційним термостимульованим випромінюванням може бути використано також структурно-оптичне випромінювання.

Окрім суто наукових здобутків, Відділення приділяло увагу й організаційним питанням. Так, відбулася оптимізація мережі наукових установ ВФА.

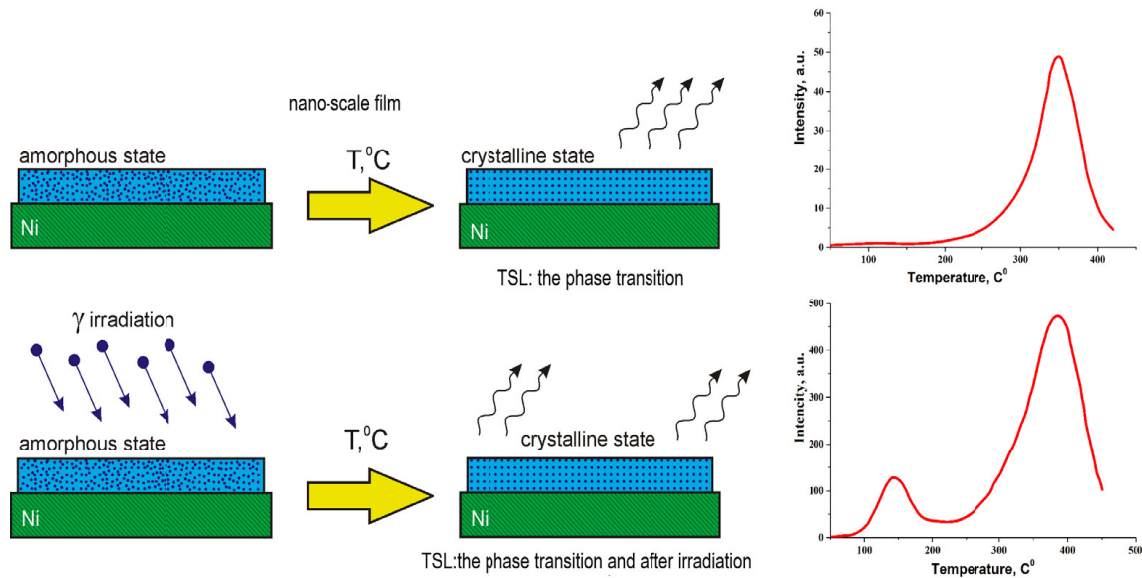


Рис. 9. Структурно-оптичний ефект у тонкоплівкових структурах  $\text{LiF-Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  при кристалізації. (V. Maslyuk et al., *Luminescence*, 2024.)

Вона передбачала кілька шляхів. Перш за все, це об'єднання та приєднання інститутів. Так, Інститут фізики гірничих процесів був приєднаний до Інституту геотехнічної механіки, а Міжнародний інститут «Інститут прикладної оптики» – до Інституту фізики. Крім того, до складу ГАО увійшов, як зазначалося, Науково-дослідний інститут «Миколаївська астрономічна обсерваторія» МОН України. Розпочато також процес приєднання ДП «Науково-телекомунікаційний центр «Українська академічна і дослідницька мережа» ІФКС НАН України» до Інституту фізики конденсованих систем ім. І.Р. Юхновського НАН України.

Інший спосіб реорганізації – це передача установ до сфери управління інших міністерств.

Зокрема, Інститут іоносфери НАН України та МОН України був переданий до МОН України. В свою чергу, до виключного відання НАН України був переданий Інститут магнетизму тепер ім. Віктора Григоровича Бар'яхтара.

Окреме місце займала ліквідація установ. Так, одна установа, а саме: Інститут прикладних проблем фізики і біофізики був припинений, але, що дуже важливо, його співробітники були переведені до інших установ НАН України, що дозволило зберегти кадровий потенціал.

Все це робилося з великою увагою до реорганізованих інститутів, виходячи з припущення, що це поліпшить їхню або Відділення роботу. Варто зауважити, що у нас немає критеріїв, за якими було б видно, що реорганізація дала позитивний результат. Принаймні, наукові результати залишилися на тому ж рівні, фінансування решти установ також, бо всі дії з передачі і припинення відбувалися при строгому виконанні закону збереження коштів – вони йшли за реорганізацією. Тому позитив від впорядкування системи установ ще має бути встановлений. На рівні Відділення те, що було 16, а стало 12 установ, практично відчуті не вдалося, та й бюрократична робота навряд чи зменшилася.

Навпаки, явно позитивним елементом визнання наших установ вважаємо присвоєння їм імен видатних науковців, які були їхніми батьками-засновниками.

У звітному періоді Інститут фізики конденсованих систем НАН України отримав ім'я академіка Ігоря Юхновського, а Інститут магнетизму – академіка Віктора Бар'яхтара.

Реорганізація мережі установ супроводжувалася удосконаленням системи управління науковими інститутами. Важливим кроком у цьому напрямі – створення Наглядових рад при наукових установах.

Зокрема, з 2021 року були прийняті чотири постанови Президії НАН України, які затвердили створення Наглядових рад при Інституті фізики, Інституті фізики напівпровідників, Інституті металофізики та Інституті фізики конденсованих систем.

Як відомо і вважається, що створення Наглядових рад є важливим етапом у підвищенні прозорості та ефективності діяльності наукових установ.

Ці ради покликані забезпечити стратегічне планування, посилити контроль за використанням ресурсів оптимально розподіляти кошти та сприяти розвитку інститутів у довгостроковій перспективі. Рішення Академії відображає прагнення адаптувати систему управління до сучасних вимог, що є необхідним для успішного розвитку української науки.

Водночас, не можна не сказати, що Наглядові ради створювалися лише при бажанні мати таку раду самим інститутом, а їхні члени підбиралися теж інститутами. Тому робота Наглядових рад поки що не набула високої західної ефективності, хоча обговорення роботи установ на них носить, як правило, серйозний характер, але без жодних наслідків.

Не виключено, це пов'язано з тим, що повноваження наших Наглядових рад не можна порівняти з повноваженнями таких рад в наукових організаціях розвинутих країн, де їхня (рад) відсутність неможлива.

Продовжуючи розгляд діяльності нашого Відділення, доцільно зупинитися на динаміці його кадрового складу. Гляньмо на порівняльний графік структури наукових кадрів за 2020 та 2024 роки (Рис. 10).

Головний висновок, який ми можемо легко зробити, – це загальне скорочення чисельності працівників. Якщо у 2020 році у відділенні працювало 3110 осіб, то станом на 2024 рік ця цифра зменшилася до 2682 (на – 428).

Зменшення чисельності спостерігається і в ключовій категорії – наукових працівників: їх кількість знизилася з 1971 до 1742 (на – 229). Загалом, спад зафіксовано в усіх категоріях працівників, і це особливо помітно серед молодих і старших наукових співробітників.

Крім того, ми бачимо зміни у кадровому складі за науковими ступенями. Кількість докторів наук зменшилась із 420 до 380 (– 40), а кандидатів наук – із 901 до 858 (на – 43).

Найбільш суттєве скорочення, як показує графік, відбулося у категорії працівників без наукового ступеня, де чисельність зменшилася з 650 до 504 (на – 146).

Наступний ключовий індикатор наукової продуктивності – кількість виданих монографій за період з 2017 по 2024 рік. Цей графік дозволяє нам простежити динаміку публікаційної активності Відділення (Рис. 11).

Аналіз показує, що до 2020 року Відділення демонструвало стабільно високий рівень

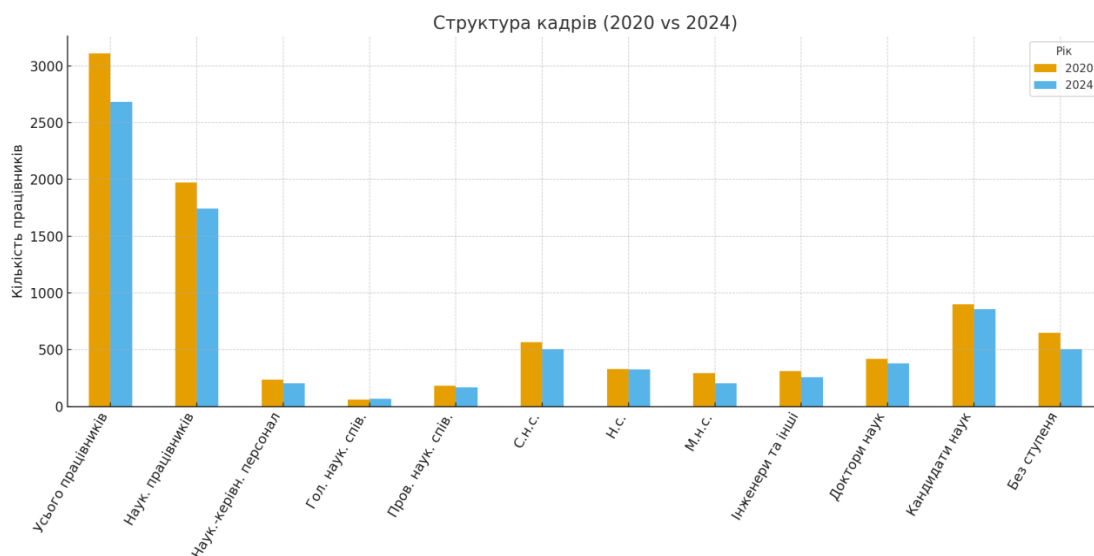


Рис. 10. Динаміка кадрового складу (2020, 2024 рр.).



Рис. 11. Кількість виданих монографій (2017–2024 рр.).

продуктивності: у 2017 році було видано 28 монографій, у 2018 – 31, а у 2019 – 30.

Це свідчить про системну роботу колективів та їхню здатність до створення узагальнюючих наукових праць.

Натомість, починаючи з 2020 року, відбулося значне зниження показників. Кількість виданих монографій різко впала до 20, а у 2022 році досягла найнижчої позначки – лише 11.

Цей спад можна пояснити впливом зовнішніх факторів, зокрема пандемії, а також, імовірно, початком повномасштабної війни з ерефією.

У 2023 році публікаційна активність, напевно символічно відновилася до 12 моногра-

фій. Проте вже у 2024 році ми знову бачимо ту ж тенденцію до падіння – 9 монографій. Ця кількість є найнижчою за весь звітний період і попереджає про серйозні виклики українській науці в умовах війни. За 2025 рік ми офіційних даних ще не маємо, проте очевидно, що ситуація навряд чи поліпшиться.

Ще одна красномовна залежність – динаміка захисту дисертацій як кандидатських (разом з PhD), так і докторських за останні роки. Ці цифри відображають здатність наукових шкіл до самозбереження та їхню спроможність готувати нові покоління дослідників (Рис. 12).

До 2020 року показники, як видно, зростали: кількість захистів кандидатських дисерта-

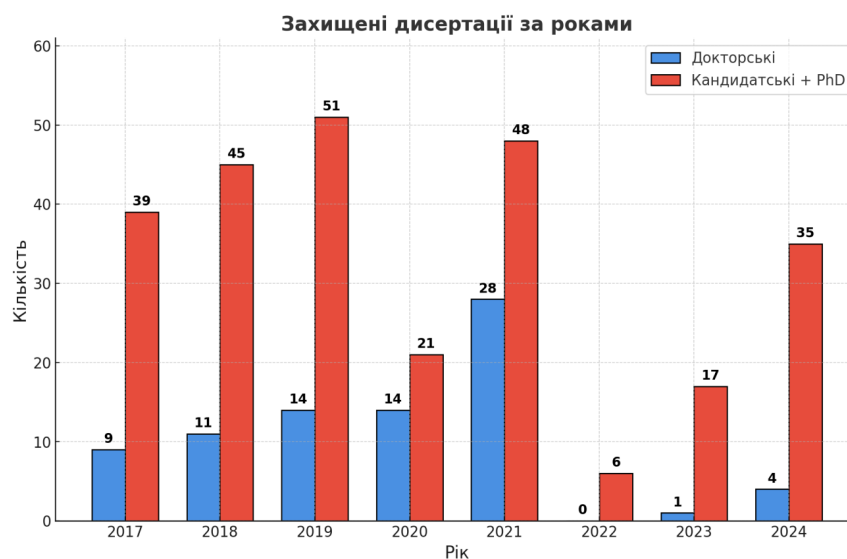


Рис. 12. Динаміка захисту дисертацій (2017–2024 рр.).

цій досягла свого піку (51) у 2019 році, а докторських (28) – у 2021. Це доводило стабільну та продуктивну роботу відділення.

Проте з 2020 року також почали впливати зовнішні чинники. У 2020 році кількість захистів кандидатських дисертацій суттєво зменшилась, мабуть, знову через пандемію. Але справжній провал стався у 2022 році, коли показники рухнули майже до нуля: було захищено лише 6 кандидатських дисертацій, докторських не було жодної. Ця драматична, навіть вбивча, ситуація, без сумнівів, викликана початком повномасштабного рашистського вторгнення на нашу територію і руйнуванням нашої наукової інфраструктури.

Але колективи, які зазнали значних матеріальних втрат, поступово оговтались і, незважаючи на колосальні зусилля і допомогу центру, почали відновлювати те, що може бути відновлено, повертаючи наукове життя. Вже у 2023 та 2024 роках стало помітним повільне зростання. Особливо приємно бачити повернення захистів кандидатських дисертацій: у 2024 році їхня кількість зросла до більш-менш пристойної цифри 35. Це дає підстави для обережного оптимізму – попри негаразди, молоді вчені рухаються вперед.

На жаль, темпи відновлення поки далекі від бажаних, або довоєнних. Це мета, яка заслуговує системної підтримки – як з боку Академії, так і з боку держави.

На думку Відділення, про що не втомлюється говорити президент НАН України академік А. Г. Загородній, особливу увагу варто приділяти проектам Національного фонду досліджень України і державному замовленню на науково-технічну продукцію, адже саме вони допомагають отримувати додаткові до неконкурсних бюджетні кошти і покращувати умови життя і діяльності науковців, передовсім, молодих.

Відповідна динаміка показана на рисунку 13, який демонструє внесок грантового фінансування в роботу установ ВФА у 2020–2025 роках. Якщо точніше, то у 2020 році було реалізовано 26 проектів із загальним фінансуванням 22,7 млн грн.

Вже в 2021-му їхня кількість зросла до 30, а обсяги фінансування – до 73,8 млн грн. 2022 рік став переломним: через воєнні обставини вдалося реалізувати лише один проект із мінімальним фінансуванням.

Проте на диво, відновлення відбулося дуже швидко. У 2024 році було досягнуто рекордних показників – 31 проект і 66,6 млн грн. А у 2025 році, навіть за меншої кількості проектів – 25, обсяги фінансування сягнули абсолютного максимуму у 97,7 млн грн.

Таким чином, наші установи не лише відновили позиції після 2022 року, а й змогли вийти на новий рівень ефективності, поєднуючи зростання як кількості проектів, так і обсягів залученого фінансування.

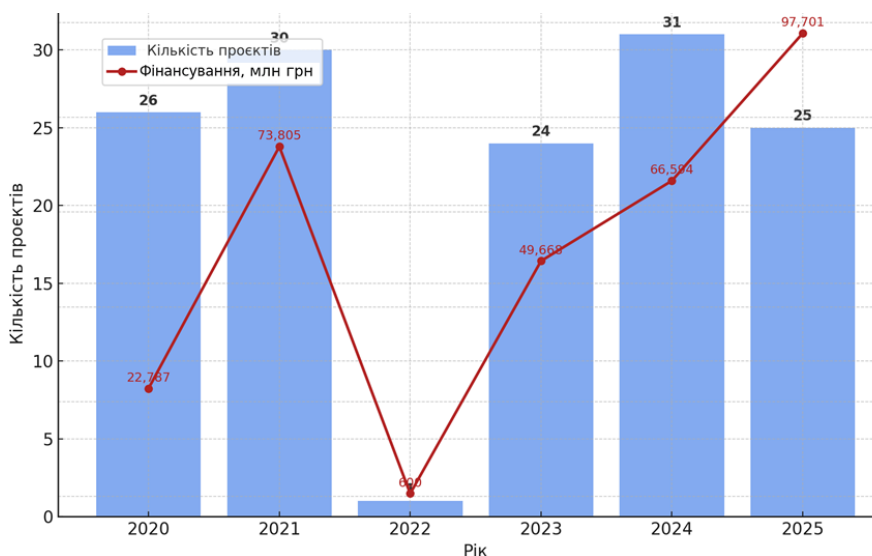


Рис. 13. Динаміка грантової діяльності у 2020–2025 рр.

Згадуючи про успіхи і проблеми, не можна не назвати справді колосальні втрати, які понесло Відділення за звітні роки. Тобто за відносно короткий період часу у вічність відійшли такі величні постаті, як перший віцепрезидент А. Г. Наумовець, Герой України І. Р. Юхновський, Герой України В. Г. Бар'яхтар, головний учений секретар В. Ф. Мачулін, директори інститутів М. С. Бродин, Л. М. Литвиненко, О. Б. Шпеник, В. М. Яковенко, заступник директора В. М. Шульга, які були гордістю української науки, забезпечили її високе світове визнання і повагу. Забути їх неможливо.

На завершення варто ще раз згадати про повсякденну діяльність Відділення. Значна її частина пов'язана з організаційною та адміністративною роботою – листуванням з інститутами, зовнішніми організаціями, а також із дописувачами, які намагаються довести, що сучасна фізика спирається на хибні теорії і що фізики насправді нічого не розуміють.

Іноді підготовка відповідей на такі звернення потребує значного часу, оскільки вони вимагають уважного та коректного розгляду. Це пов'язано також із тим, що подібні листи нерідко надходять через офіційні канали – від керівництва держави або через відповідні державні установи, куди їхні автори люблять звертатися. Серед таких дописувачів, як відомо, трапляються люди, які, за відомим висловом, люблять не стільки науку в собі, скільки себе в науці.

Крім того, у продовж цього періоду було проведено близько 100 засідань Бюро ВФА, прийнято до виконання після рецензування понад 90 тем відомчого замовлення, розглянуто

велику кількість кадрових та організаційних питань.

Вчені наших установ отримували визнання не лише у вигляді академічних, але й державних та міжнародних нагород і відзнак, що є свідченням високого авторитету наших науковців.

На завершення наведемо свіжу інформацію про результати державної атестації наукових установ, оприлюднені Міністерством освіти і науки України. Із 12 установ Відділення фізики і астрономії НАН України 7 отримали оцінку «А», 4 – «Б», і одна установа – «В».

## ВИСНОВКИ

Як видно, більшість наведених результатів опубліковано в журналах першого квартала, що відповідає сучасним міжнародним стандартам оцінювання наукової діяльності. Водночас суспільні очікування часто зосереджені переважно на прикладних результатах, тоді як фундаментальні дослідження – або basic research – потребують довшої перспективи для усвідомлення їхньої реальної цінності.

У сучасних умовах перед українською наукою постає подвійне завдання: з одного боку – зберегти глибину та системність фундаментальних досліджень, з іншого – забезпечувати їхній зв'язок із актуальними потребами держави. Представлені результати демонструють, що установи Відділення фізики і астрономії НАН України здатні поєднувати ці два виміри наукової діяльності, формуючи основу для подальшого розвитку як фундаментальної, так і прикладної фізики в Україні.

Стаття надійшла до редакції: 04.03.2026

прийнята до друку: 20.03.2026

опублікована: 20.04.2026

UDC 53,52

<https://doi.org/10.18524/1815-7459.2026.1.355909>

**MAIN RESULTS OF THE ACTIVITIES OF THE DIVISION OF PHYSICS  
AND ASTRONOMY OF THE NAS OF UKRAINE IN 2020–2025**

*V. M. Loktev, V. V. Hladkovskiy*

National Academy of Sciences of Ukraine  
54 Volodymyrska St, Kyiv, 01601, Ukraine,  
e-mail: vloktev@bitp.kiev.ua

**Abstract.** The article presents an overview of the activities of the Division of Physics and Astronomy of the National Academy of Sciences of Ukraine during 2020–2025. The main directions of scientific research, and the most significant results obtained by institutions of the Division in the fields of condensed matter physics, nanophysics, astrophysics, radiophysics, and quantum technologies are considered.

**Keywords:** physics, astronomy, scientific research, research institutions, scientific activity

# ПРОЕКТУВАННЯ І МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СЕНСОРИВ

## SENSORS DESIGN AND MATHEMATICAL MODELING

PASC 84.40.Ba

<https://doi.org/10.18524/1815-7459.2026.1.355910>

### МЕТОДИ ФРАКТАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ І МІНІАТЮРИЗАЦІЇ ВИПРОМІНЮВАЧІВ (ОГЛЯД)

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

*А. О. Карпенко*, <https://orcid.org/0009-0002-9577-9928>

*А. П. Балабан*, <https://orcid.org/0000-0002-6372-479X>

Науково-дослідний інститут фізики  
Одеського національного університету імені І. І. Мечникова  
вул. Змієнка Всеволода, 2, м. Одеса, 65082, Україна  
e-mail: [ndl\\_lepikh@onu.edu.ua](mailto:ndl_lepikh@onu.edu.ua)

**Анотація.** Проведено аналіз розвитку фрактальних методів в електродинаміці для удосконалення перетворювачів, головним чином на прикладі антен з акцентом на їх інтеграцію в безпілотні літальні апарати (БПЛА). Ключова проблема проектування таких антен полягає у протиріччі між вимогами надширокополосності (400–7000 МГц) і жорсткими обмеженнями на масогабаритні та аеродинамічні характеристики, яким традиційні геометричні параметри не відповідають.

Проаналізовано гібридні підходи, що об'єднують геометрії Коха, Серпінського та Мінківського, а також способи розширення смуги пропускання через використання дефектних структур заземлення (DGS) та метаматеріалів.

Виявлено спеціалізовані конструкції, такі як FeathR™, оптимізовані для радіоелектронних завдань боротьби при збереженні низької радіолокаційної видимості. Представлені в огляді рішення підтверджують можливість ефективного безперервного покриття спектру частот від 400 МГц до 7 ГГц та вище.

**Ключові слова:** фрактальні методи, управління діаграмою спрямованості, мініатюризація антен, дефектні структури заземлення

## Вступ

Фрактальна електродинаміка відкриває нові можливості для вирішення проблем удосконалення перетворювачів різних за принципами побудови і призначення, використовуючи принципи самоподібності та заповнення простору для створення електрично довгих структур в обмеженому фізичному обсязі [1].

Наведемо кілька прикладів. В електроніці для підвищення ємності конденсаторів необхідно збільшувати площу поверхні електродів. Застосування фрактальних візерунків при проектуванні електродів дозволяє максимізувати цю площу, зберігаючи компактність виробу. [2]. В авіабудуванні [3] фрактальні структури використовуються для зниження аеродинамічного опору. Фрактальні принципи застосовуються і при створенні акустичних метаматеріалів для ефективної вібро- та звукоізоляції. Впровадження фрактальної геометрії (наприклад, ієрархічних стільників) у структуру метаматеріалу дозволяє гнучко налаштувати його характеристики: змінювати коефіцієнт Пуассона, керувати положенням та шириною заборонених зон [4].

Розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) протягом останнього десятиліття характеризується переходом від простих радіокерованих моделей до складних автономних систем, що вимагають високошвидкісної передачі даних, стійкості до перешкод та багатодіапазонної роботи. Одним із ключових компонентів цього технологічного стрибка є бортова антенна система, що визначає дальність зв'язку, рівень радіомаскування та ефективність управління бортом БПЛА [5].

Традиційні евклідові геометрії антен часто виявляються нездатними задовольнити суперечливі вимоги до БПЛА: мала вага, компактність, аеродинамічна обтічна форма і надширокополосність в діапазоні 400-7000 МГц.

### 1. Основи фрактальної електродинаміки та управління частотним спектром

Нагадаємо – **Фрактал** – це геометричний об'єкт, що рекурсивно генерується, має дро-

бову розмірність і властивість самоподібності. Фрактальна фігура складається з частин, кожна з яких є зменшеною копією всієї структури загалом [1, 6].

Основні переваги від застосування теорії фракталів у проектуванні НВЧ-антен наступні.

Мініатюризація: Властивість заповнення простору дозволяє розмістити велику електричну довжину провідника в малому фізичному обсязі, що значно зменшує габарити антени без втрати резонансних властивостей [1, 6, 7].

– Багатодіапазонність: Завдяки самоподібній структурі антена може працювати на кількох частотах одночасно, які не обов'язково є кратними гармоніками, що ідеально підходить для мультистандартних систем зв'язку.

– Широкополосність: Складна порізана форма фракталів створює додаткові резонансні шляхи, що дозволяє антені ефективно працювати у дуже широкому діапазоні частот.

– Стабільність характеристик: Фрактальні конструкції (наприклад, синусоїдальні) можуть зберігати постійну діаграму спрямованості (ДС), посилення та вхідний опір у всьому робочому діапазоні [8].

– Поліпшення посилення та коефіцієнта корисної дії (ККД): Фрактальні структури часто забезпечують вищий коефіцієнт посилення та ефективність випромінювання порівняно з класичними з евклідовою геометрією антенами того ж розміру.

– Зниження взаємного впливу: У фазованих антенних ґратах використання фракталів допомагає зменшити небажаний електромагнітний зв'язок між окремими елементами [8, 9].

– Спрощення ланцюгів узгодження: Геометрія фракталу може виступати в ролі розподіленої ємності або індуктивності, що дозволяє узгодити антену з трактом без використання додаткових зовнішніх компонентів.

Фрактальні антени базуються на концепції геометрії з дробовою розмірністю, запропонованою Бенуа Мандельбротом [7]. Для антени найбільш важливими є дві властивості фракталів: самоподібність і здатність до заповнення простору [1, 6, 7].

Незважаючи на очевидні переваги, фрактальні антени стикаються із низкою проблем. Складність геометрії потребує прецизійних методів виготовлення, таких як лазерне пряме структурування (LDS) або аерозольний друк [10]. З іншого боку, зі збільшенням кількості ітерацій фрактала ефект мініатюризації уповільнюється, а втрати у провіднику зростають через збільшення електричної довжини [11].

Самоподібність дозволяє антені резонувати на кількох частотах, які масштабуються відповідно до ітерацій фрактальної структури, що забезпечує багатодіапазонність. Властивість заповнення простору дозволяє збільшити довжину шляху струму поверхні випромінювача, що знижує резонансну частоту антени за збереження її габаритних параметрів, сприяючи мініатюризації [7, 6, 12].

Проектування фрактальних антен в останнє десятиліття базувалося на системі ітераційних функцій (Iterated Function Systems (IFS)). Кожна ітерація додає нових резонансних рішень, розширюючи смугу пропускання [6].

Процес створення фрактальної антени завжди складається із двох елементів:

1. "Ініціатор" - вихідна проста фігура (нульова ітерація). Для дротяних антен це звичайний прямий відрізок лінії, для патч-антен – квадрат або трикутник.

2. "Генератор": - геометричне "правило", яке застосовується до ініціатора на кожному кроці. Генератор визначає, як саме буде зламана чи розділена лінія. Після першої ітерації ініціатор перетворюється на генератор, але в наступних кроках генератор застосовується кожному маленькому сегменту фігури.

Окремий випадок опису розмірності подібності фрактальної структури Хаусдорфа для строго самоподібних структур представлено формулою [7, 13]. Вона є результатом узагальнення правил звичайної евклідової геометрії на об'єкти з дробовою структурою та має строгий математичний висновок. В антенній техніці ця залежність дозволяє заздалегідь розрахувати, наскільки сильно знизиться резонансна частота антени при додаванні нових ітерацій фракталу:

$$D = \frac{\ln(N)}{\ln(1/s)}$$

де:

$D$  – дробова розмірність, яка є мірою складності структури та її здатності заповнювати простір. Чим вище  $D$ , тим щільніше провідник "упакований" об'ємом антени;

$N$  – кількість ідентичних копій самого себе, з яких складається фрактал на наступному етапі ітерації;

$s$  – коефіцієнт масштабування (або зменшення). Він показує, у скільки разів кожна нова частина більша / менша за вихідну.

Математично цей підхід був закладений Феліксом Хаусдорфом у 1918 році і пізніше розвинений Бенуа Мандельбротом, який застосував його для опису порізаних природних форм.

Для антен БПЛА, що працюють у нижньому діапазоні частот від 400 до 800 МГц, критично важливе високе значення  $D$ , оскільки воно дозволяє "згорнути" довгий провідник (необхідний для роботи на низьких частотах) в компакту структуру, порівнянну з розмірами малих БПЛА [7]. Дослідження показують, що використання самоподібної фрактальної структури кривої Коха [1, 6, 7, 14] 4 ітерації дозволяє скоротити фізичний розмір антени на 68% в порівнянні з класичним диполем [14]. У табл. 1. Наведено основні типи фракталів та їх переваги для БПЛА.

В антенній техніці крива Коха використовується для збільшення електричної довжини випромінювача без істотної зміни його фізичних габаритних розмірів. Це дозволяє створювати компактні антени (монополі, диполі, петлеві антени), що резонують на нижчих частотах у порівнянні з їх класичними аналогами того ж розміру.

Діапазон 400-7000 МГц охоплює ключові частоти керування (433 МГц), навігації (1.2/1.5 ГГц), передачі відео (2.4/5.8 ГГц) та сучасні мережі 5G [15]. Розробка єдиної антени, що покриває цей спектр, вимагає застосування сучасних підходів до проектування антен, які передбачають або поєднання декількох різних фрактальних геометрій в одній структурі або інтеграцію фрактальних елементів з іншими

Таблиця 1

**Основні типи фракталів та їх застосування**

Тип фракталу	Розмірність, $D$	Основна перевага для БПЛА	Типове застосування
Крива Коха	1.2619	Значна мініатюризація	Малорозмірні FPV-дрони [11]
Килим Серпінського	1.8928	Багатодіапазонність (LTE, Wi-Fi, 5G)	Мультиспектральна розвідка [6]
Фрактал Мінковського	1.5000	Управління вхідним опором	Системи широкосмугового зв'язку [17]
Крива Гільберта	2.0000	Максимальне заповнення простору	Надкомпактні маяки [18]

радіотехнічними технологіями. Головною проблемою є подолання обмеження класичних фракталів (наприклад, вузька смуга пропускання чи складність узгодження на певних частотах) та досягнення параметрів, недоступних класичним евклідовим антенам [1, 16].

**2. Інтеграція фрактальних структур та дефектних структур заземлення (Defective Ground Structures (DGS))**

Одним із найбільш значущих досягнень десятиліття стало використання DGS у поєднанні з фрактальними випромінювачами. DGS – це технологія проектування НВЧ-пристроїв, при якій у суцільній площині заземлення (екрані) вирізаються отвори певної форми: від простих геометричних фігур (кола, прямокутники) до складних фрактальних візерунків. Основна ідея полягає у навмисному створенні "дефекту" у мідному шарі заземлення. Це призводить до таких ефектів:

– Зміна розподілу струмів: Вирізи змушують зворотні струми текти довгими і складнішими траєкторіями, що змінює ефективну індуктивність і ємність антени.

– Фільтрація сигналів: DGS поводяться як смугово-загороджувальні фільтри, дозволяючи блокувати певні частоти або пригнічувати небажані гармоніки.

– Розширення смуги пропускання: Використання DGS (наприклад, у вигляді фрактальних вирізів) дозволяє досягти надширокополосності, необхідної для охоплення діапазону 400-7000 МГц.

– Мініатюризація: За рахунок збільшення електричної довжини шляху струму резонансна частота антени знижується, що дозволяє зробити саму антену фізично менше [16, 1, 6, 7].

– Поліпшення характеристик випромінювання: Правильне розташування слотів у заземленні допомагає оптимізувати ДС, посилення та ефективність прийому/передачі сигналу.

– Підвищення ізоляції в системах із кількома антенами (Multiple Input Multiple Output (MIMO)). DGS перешкоджають поширенню поверхневих хвиль, значно знижуючи взаємний вплив (перешкоди) між сусідніми випромінювачами [1].

MIMO – це метод бездротового зв'язку, у якому передачі і прийому даних використовується кілька антен як із боку передавача, і за приймача [18]. У БПЛА використання фрактальних MIMO-решіток (наприклад, конфігурації 2x2 або 4x4) дозволяє досягти компактності при збереженні високої пропускної спроможності, необхідної для трансляції відео високої роздільної здатності та роботи в умовах міських перешкод.

У дослідженнях останнього десятиліття DGS часто комбінують із фрактальними випромінювачами для створення гібридних антен, які одночасно є компактними та працюють у надширокому діапазоні частот [19, 8]. Шляхом вирізування фрактальних візерунків (наприклад, трикутників Серпінського) у площині заземлення інженерам вдалося придушити небажані гармоніки та розширити смугу пропускання [10].

Наприклад, пентагональна фрактальна антена з подвійним кільцем (Double-Pentagonal Fractal Antenna) (DPFA) показала надширокополосність з відносною смугою пропускання 141.5% (від 3.84 до 22.4 ГГц) [20].

DPFA є конструкцією, оптимізованою для компактних пристроїв. Антена складається з основного п'ятикутного випромінювача (патча), усередині якого коаксіально розміщено (або вирізане у вигляді слота) друге п'ятикутне кільце меншого розміру. Структура розміщується на діелектричній підкладці (наприклад, марки FR4) та живиться через мікросмужкову лінію або копланарний хвилевід (CPW). Використання самоподібних вкладених фігур дозволяє антени резонувати на декількох частотах, що масштабуються одночасно. Кожне кільце відповідає за свій сегмент частотного спектру, що в сукупності забезпечує надшироку смугу пропускання (до 141,5% і вище). Фрактальна геометрія дозволяє "упакувати" довгий шлях перебігу струму в обмеженому фізичному просторі. Це забезпечує роботу на низьких частотах за збереження малих габаритів (наприклад, розмір антени може становити всього  $0,38 \times 0,52 \lambda_0$ , де  $0$  – частота середини робочого діапазону).

Зазори між зовнішнім та внутрішнім кільцями працюють як розподілені ємності, які разом із індуктивністю фрактальних країв допомагають узгодити вхідний опір антени у всьому робочому діапазоні без громіздких зовнішніх схем. Завдяки такій архітектурі антена здатна перекривати величезний діапазон частот (від С- до К-діапазону, приблизно 3.84-22.4 ГГц) з піковим посиленням до 10.2 дБі.

Аналогічні принципи масштабування та впровадження "Т" - образних слотів під меандровими елементами дозволили оптимізувати антени для роботи в нижчому частотному сегменті 400-7000 МГц [21].

### 3. Гібридні фрактальні випромінювачі

Для досягнення безперервного покриття діапазону 400-7000 МГц пропонується комбінувати різні типи фракталів. Гібридизація кривих Коха та Мінковського на піввосьмикутно-

му патчі дозволила створити МІМО-антену зі смугою пропускання від 1.0 до 21.4 ГГц. [22]. Основою служить напіввосьмикутний патч, на краї якого нанесені гібридні фрактальні криві Мінковського (з кутом  $90^\circ$ ) та Коха (з кутом  $60^\circ$ ) [22]. Використовується друга ітерація фракталу для досягнення балансу між мініатюризацією та ефективністю. Для мінімізації втрат часто використовується високочастотний ламінат (наприклад, Rogers RT / duroid 5880) товщиною близько 1.6 мм. Заживлюється патч мікрополосковою лінією, що звужується, яка забезпечує краще узгодження імпедансу в широкому діапазоні частот порівняно зі стандартними лініями. Для зниження взаємного впливу між елементами МІМО-системи площа заземлення модифікується спеціальними шлейфами, що дозволяє досягти ізоляції на рівні від -20 до -50 дБ [22]. Антена здатна перекривати безперервний діапазон від 1.0 до 21.4 ГГц (відносна смуга пропускання близько 182%). Завдяки фрактальній структурі та модифікованому заземленню забезпечується висока ізоляція між портами (від -20 до -50 дБ), що критично для систем зв'язку БПЛА, які працюють в умовах інтенсивних перешкод [22], а також високий коефіцієнт посилення ( $DG > 9.99$  дБ). Використання напіввосьмикутної форми у поєднанні з фракталами дозволяє суттєво зменшити площу антенної решітки (наприклад, до 45 x 75 мм для системи 2 x 2). У табл. 2. наведені параметри широкосмугових фрактальних систем, розроблених для інтеграції до платформ БПЛА.

Для БПЛА критично важливо не тільки приймати сигнал, а й керувати напрямом випромінювання підвищення рівня радіомаскування і мінімізації енерговитрат [8].

Використання активних компонентів, таких як PIN-діоди та варикапи, інтегрованих безпосередньо у фрактальну структуру антени, дозволяє динамічно змінювати розподіл струмів [8]. Це дає можливість перемикати робочі частоти та змінювати форму ДС. Наприклад, гнучка антена на підкладці з поліімиду (PI) товщиною 0.05 мм може працювати у трьох режимах: дводіапазонному (2.4/5.8 ГГц), од-

Таблиця 2

**Широкопasmові фрактальні системи для антен БПЛА**

Геометрія антени	Діапазон частот (ГГц)	Коефіцієнт посилення (дБі)	Застосування в БПЛА
Sinuous + Meander Fractal	0.51 – 10.72	-3.5 – 8.2	Пеленгація та РЕБ [17]
Moore-Koch Hybrid	3.5 - 19.78 (7 резонансів)	1.98 – 4.23	Багатоцільовий зв'язок 5G/ Ku [15]
Koch Snowflake + Sierpinski	2.11 – 9.56	3.92 – 19.38	Високошвидкісна телеметрія [12]
Ізольований трикутний фрактал	4.2 – 6.4	До 4.38	Збір енергії (Energy Harvesting) [23]

нодіапазонному та режимі безперервної перебудови [8].

Така гнучкість дозволяє БПЛА адаптуватися до електромагнітної обстановки, що змінюється, переключаючись на вільні канали зв'язку в режимі реального часу. Крім того, конформне розміщення антени на крилі дрону вирішує проблему аеродинамічного опору, яка особливо гостро стоїть для малих безпілотників. [8].

**4. Фазовані антенні решітки на основі фракталів**

Фрактальні антенні решітки забезпечують переваги у вигляді зниження рівня бічних пелюсток ДС та зменшення кількості елементів у порівнянні з традиційними ґратами при збереженні тієї ж спрямованості [24]. Дослідження 2022 – 2025 років зосереджені на використанні розріджених фрактальних ґрат для створення систем інтелектуального формування електро-

магнітного променя [16]. При використанні рою БПЛА такі антени дозволяють підтримувати стабільні зв'язки між апаратами навіть за їх хаотичного руху, використовуючи алгоритми адаптивного управління ДС [24]. Застосування фрактальних елементів знижує взаємний вплив між антенами у ґратках, що спрощує проектування систем МІМО для високошвидкісної передачі відеоданих [22].

**5. Конформні та гнучкі антени**

Для аерокосмічних систем критичним фактором є вага. Перехід на гнучкі друковані схеми (FPC) дозволив створювати антени, які можуть бути вбудовані безпосередньо в обшивку БПЛА або ракет [8]. Використання таких матеріалів, як Rogers RT/ duroid 5880 і Karton забезпечує стабільність характеристик в умовах екстремальних температур і вібрацій [8] табл. 3.

Таблиця 3

**Гнучкі діелектрики**

Властивість матеріалу	FR4 (стандарт)	Rogers RT/ duroid 5880	Поліімід (PI)
Діелектрична проникність	4.3 – 4.7	2.2	3.5
Тангенс кута втрат	0.019 – 0.025	0.0009	0.008
Гнучкість	Низька	Середня	Висока [8]
Вага	Висока	Середня	Мінімальна [9]

## 6. Спеціалізовані рішення для РЕБ та скритності

Одним з найбільш яскравих прикладів практичного застосування фрактальних технологій є антена FeathR, розроблена для придушення роїв дронів. [19]. Завдяки фрактальній структурі, оптимізованій за допомогою штучного інтелекту, антена має надшироку смугу пропускання при мінімальній помітності для радарів. Її малий розмір дозволяє розміщувати потужні передавачі завад на борту малих дронів, які можуть влітати всередину ворожого рою і пригнічувати зв'язок зсередини, не створюючи завад власним системам навігації.

Для комерційного сектора та державних структур стали доступні антени серії UAVee (наприклад, UAVee 4160), що забезпечують всеспрямоване покриття від 400 до 16 ГГц МГц, що робить їх ідеальними для інтеграції в наземні станції управління і бортові ретранслятори [5].

## 7. Теоретичні обмеження чисельного моделювання і методи оптимізації

Незважаючи на очевидні переваги, фрактальні антени стикаються із низкою викликів. Складність геометрії потребує прецизійних методів виготовлення, таких як лазерне пряме структурування (LDS) або аерозольний друк [21]. З іншого боку, зі збільшенням кількості ітерацій фрактала ефект мініатюризації уповільнюється, а втрати у провіднику зростають через збільшення електричної довжини [13].

Ефективне проектування антен для діапазону 400–7000 МГц сьогодні неможливе без використання передових електромагнітних симуляторів, таких як CST Microwave Studio та HFSS, що застосовують методи кінцевих елементів (FEM) та інтегральних рівнянь (MoM) [6]. У 2024–2025 роках намітився тренд використання машинного навчання для оптимізації фрактальних параметрів. Створені алгоритми дозволяють прогнозувати S-параметри та форму ДС, скорочуючи час розробки прототипу з місяців до тижнів [19]. S-параметри (параметри розсіювання) - це коефіцієнти, що харак-

теризують поведінку високочастотних пристроїв (включаючи антени) через опис того, як електромагнітні хвилі відбиваються від портів системи та поширюються між ними.

У контексті проектування антен ключове значення мають такі параметри:  $S_{11}$  (коефіцієнт відображення): визначає ступінь узгодження антени з лінією живлення. Значення  $S_{11}$  нижче -10 дБ вважається стандартним показником хорошого імпедансного узгодження, у якому антена ефективно випромінює енергію.

$S_{21}$ ,  $S_{12}$  (ізоляція): у багатоантенних системах МІМО ці параметри описують коефіцієнт зв'язку між портами. Для стабільної роботи зв'язку на БПЛА та мінімізації перешкод прагнуть досягти високого рівня ізоляції – зазвичай у діапазоні від -20 дБ до -50 дБ. Аналіз S-параметрів дозволяє оптимізувати геометрію фрактальних антен для роботи в надшироких діапазонах частот (наприклад від 400 до 7000 МГц), забезпечуючи стабільний резонанс і високу ефективність випромінювання.

## Висновок

Аналіз досягнень у галузі розробки електромагнітних перетворювачів, зокрема, антен для БПЛА, що базуються на застосуванні методів фрактальної електродинаміки показує, що дана технологія є визначальною для наступного покоління систем зв'язку та управління БПЛА. Використання цих методів дозволяє успішно розв'язати проблеми мініатюризації антен і розширити діапазон робочих частот від 400 МГц до 16 ГГц. Ключові інновації, такі як інтеграція DGS, використання гнучких конформних підкладок та впровадження активних елементів для перебудови ДС забезпечують перетворення антени з пасивного компонента на адаптивну інтелектуальну систему.

## Список використаної літератури

[1]. JEM Engineering Company (Blog). Fractal Antennas, Explained - JEM Engineering <https://jemengineering.com/blog-fractal-antennas-explained/>

- [2]. Benjamin Barnes, Othman Suleiman, JeanPaul Badjo, Kausik S Das. Fractal-based electrolytic capacitor electrodes: Scaling behavior with respect to fractal order and complexity // arXiv preprint arXiv:1810.00221. – 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1810.00221>
- [3]. Nedić J., Vassilicos J. C. Vortex shedding and aerodynamic performance of airfoil with multiscale trailing-edge modifications // *AIAA Journal*. – 2015. – Vol. 53. – No. 11. – pp. 3240-3250. <https://doi.org/10.2514/1.J053834>
- [4]. Li J. et al. Study on the Complex Band Structure and Auxetic Behavior of Fractal Re-Entrant Honeycomb Metamaterials // *Materials*. – 2025. – Vol. 18. – No. 24. – pp. 5695. <https://doi.org/10.3390/ma18245695>
- [5]. Fractal Antenna Systems, Inc. Products Catalog: Symphony-SP, UAVEe, UACM series. Fractenna Official Website. 2025. <https://www.fractenna.com/product/all.html>
- [6]. Khurana S., Rajni Kumar, Y. Emerging Perspectives on Multiband Fractal and Hybrid Fractal Antennas for Wireless Applications: A Comprehensive Analysis // *Advances in Systems Science and Applications*, Vol. 25, No. 1. pp. 23–51. (2025). <https://ijassa.ipu.ru/index.php/ijassa/article/download/1686/30>
- [7]. Jena M. R., Mishra G. P., Sahoo A. B., Mangaraj B. B. Fractal Geometry and Its Application to Antenna Designs // *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, Vol. 9, No. 1. 3726–3743, (2019). <https://doi.org/10.35940/ijeat.A9793.109119>
- [8]. Teng Bao, Mingmin Zhu1, Zhifeng He, Yi Zhang, Guoliang Yu, Yang Qiu1, Jiawei Wang, Yan Li, Haibin Zhu and Hao-Miao Zhou. Design of Tri-Mode Frequency Reconfigurable UAV Conformal Antenna Based on Frequency Selection Network // *Journal of Low Power Electronics and Applications*, 15(3), 51 (2025), <https://doi.org/10.3390/jlpea15030051>
- [9]. Market Glass, Inc. FPC in Aerospace and Defense Market – Global Strategic Business Report. March 2026, ID: 6093731 <https://www.researchandmarkets.com/reports/6093731/fpc-in-aerospace-defense-market-global>
- [10]. Naik V. M., Rao A. P. Design and Analysis of Fractal Antenna Geometry for Wideband Applications // *Proceedings of the International Conference on Emerging Trends in Engineering (ICETE 2023)*, pp. 836–844, (2023). [https://doi.org/10.2991/978-94-6463-252-1\\_84](https://doi.org/10.2991/978-94-6463-252-1_84)
- [11]. Behera S. K., K. Patel. Design of Koch Curve-Based Fractal Antenna for Ultra-Wideband Applications // *IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference (MAPCON)*, pp. 1–5, (2023). [http://dspacspace.nitrkl.ac.in/dspacspace/bitstream/2080/4153/1/2023\\_MAPCON\\_SKBehera\\_Design2.pdf](http://dspacspace.nitrkl.ac.in/dspacspace/bitstream/2080/4153/1/2023_MAPCON_SKBehera_Design2.pdf)
- [12]. Azzouz A., Bouhmidi R., Munir M. E., Nasralla M. M., Chetoui M. Characterization and Analysis of Hybrid Fractal Antennas for Multi-band Communication and Radar Applications // *Fractal and Fractional (MDPI)*, Vol. 10, No. 1. Art. No. 47. (2026). <https://doi.org/10.3390/fractalfract10010047>
- [13]. Vinoy K. J. Fractal Shaped Antenna Elements for Wide-and Multi-band Wireless Applications // The Pennsylvania State University. The Graduate School. College of Engineering. A Thesis in Engineering Science and Mechanics. Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, August 2002. <https://scispace.com/pdf/fractal-shaped-antenna-elements-for-wide-and-multi-band-1uw9bbewqe.pdf>
- [14]. MathWorks Team. Multiband Nature and Miniaturization of Fractal Antennas. MATLAB & Simulink Documentation. (2024). <https://ww2.mathworks.cn/help/antenna/ug/multiband-nature-and-miniaturization-of-fractal-antennas.html>
- [15]. Rishi Parasher, Dinesh Yadav, Ankur Saharia. Design and analysis of hybrid fractal frequency-band reconfigurable metamaterial antenna for multi-standard wireless applications // *Results in Engineering*, Vol. 26, 104696, (2025). <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104696>
- [16]. Hakmin Lee, Ye-Bon Kim, Han Lim Lee. Reconfigurable Antenna for UAV-Assisted Wide Coverage Air-to-Ground Communications // *IEEE Access*, Vol: 10, 88034 - 88042 (2022). <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3199700>

- [17]. Junghyeon Kim, Jongho Keun, Taehoon Yoo and Sungjoon Lim. Miniaturization and Bandwidth Enhancement of Fractal-Structured Two-Arm Sinuous Antenna Using Gap Loading with Meandering // *Fractal and Fractional* (MDPI), Vol. 7, No. 12, 841, (2023). <https://doi.org/10.3390/fractalfract7120841>
- [18]. Jaume Anguera, Aurora Andújar, Je-evani Jayasinghe, et al. Fractal Antennas: An Historical Perspective // *Fractal and Fractional* (MDPI), Vol. 4, No. 1. Art. No. 3, (2020). <https://doi.org/10.3390/fractalfract4010003>
- [19]. Fractal Antenna Systems Develops Miniaturized Wideband Antenna to Jam Swarms of Drones // *Everything RF News*. (2025). <https://www.everythingrf.com/news/details/19915-fractal-antenna-systems-develops-miniaturized-wideband-antenna-to-jam-swarms-of-drones>
- [20]. Kim J., Jang T., Lim S. Ultra-Wideband Double-Pentagonal Fractal Antenna for C-, X-, Ku- and K-Band Wireless Applications // *Micromachines* 16 (11), 1237, (2025). <https://doi.org/10.3390/mi16111237>
- [21]. Norun Abdul Malek, Nur Hamizah Muhamad Mokhtar, Khamis Ali, Farah Mohd Isa. Design of Small Antennas for 400 MHz Applications // *Conference: 2018 7th International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE)*, September 2018. <https://doi.org/10.1109/ICCCE.2018.8539246>
- [22]. Sidhu A. K., Sivia J. S. Design of Wideband Fractal MIMO Antenna using Minkowski and Koch Hybrid Curves on Half Octagonal Radiating Patch with High Isolation and Gain for 5G Applications // *Advanced Electromagnetics*, Vol. 12, No. 1. pp. 58–69, (2023). <https://doi.org/10.7716/aem.v12i1.1982>
- [23]. Mohamed Guermal, Jamal Zbitou, Ridouane Er-Rebyiy, Fouad Aytouna, Aziz Oukaira, Otman Oulhaj. A New Design of a Wideband Fractal Antenna for RF Energy Harvesting Applications at 5.8 GHz // *EPJ Web Conferences*, Vol. 326, 01001, (2025). <https://doi.org/10.1051/epjconf/202532601001>
- [24]. Mandal P., Kashyap C. S., Roy L. P., Das S. K. Reconfigurable Radar Antenna Design for UAV Application // *In 2023 International Conference for Advancement in Technology (ICONAT) IEEE Xplore*, pp. 1-6, (2023, January). <https://doi.org/10.1109/ICONAT57137.2023.10080058>

Стаття надійшла до редакції: 06.03.2026

прийнята до друку: 23.03.2026

опублікована: 20.04.2026

PASC 84.40.Ba

<https://doi.org/10.18524/1815-7459.2026.1.355910>

## METHODS OF FRACTAL ELECTRODYNAMICS FOR EFFICIENCY ENHANCEMENT AND MINIATURIZATION OF RADIATORS (REVIEW)

*Ya. I. Lepikh, A. O. Karpenko, A. P. Balaban*

Research Institute of Physics of Odesa I. I. Mechnikov National University

2 Vsevoloda Zmiienka St, Odesa, 65082, Ukraine

e-mail: [ndl\\_lepikh@onu.edu.ua](mailto:ndl_lepikh@onu.edu.ua)

**Abstract.** This paper analyzes the development of fractal methods in electrodynamics for the improvement of transducers, primarily using antennas as an example, with a focus on their integration into unmanned aerial vehicles (UAVs). The key challenge in designing such antennas lies in the contradiction between the requirements for ultra-wideband operation (400–7000 MHz) and strict

constraints on mass, dimensions, and aerodynamic characteristics, which traditional geometric parameters cannot satisfy.

Hybrid approaches combining the Koch, Sierpinski, and Minkowski geometries are analyzed, as well as methods for extending the passband through the use of defective ground structures (DGS) and metamaterials.

Specialized designs, such as FeathR™, optimized for electronic warfare tasks while maintaining low radar visibility, have been identified. The solutions presented in this review confirm the possibility of effective continuous coverage of the frequency spectrum from 400 MHz to 7 GHz and above.

**Keywords:** fractal methods, beam pattern control, antenna miniaturization, defective grounding structures

# МАТЕРІАЛИ ДЛЯ СЕНСОРІВ

## SENSOR MATERIALS

PACS 73.50.Pz, 73.63.-b

<https://doi.org/10.18524/1815-7459.2026.1.355911>

### ОПТИМІЗАЦІЯ СТРУКТУРИ ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ НА ОСНОВІ ПЛІВКИ ВІДНОВЛЕНОГО ОКСИДУ ГРАФЕНУ ДЛЯ ФОТО- ТА ГАЗОЧУТЛИВИХ ЗАСТОСУВАНЬ

*І. Б. Оленич*, <https://orcid.org/0000-0002-6642-0222>

*Л. С. Монастирський*, <https://orcid.org/0000-0003-4782-9978>

*А. Ю. Козак*, <https://orcid.org/0009-0006-3626-9433>

*В. Я. Бойко*, <https://orcid.org/0009-0003-4112-0201>

*О. О. Сінькевич*, <https://orcid.org/0000-0001-9834-2700>

Львівський національний університет імені Івана Франка  
вул. Драгоманова, 50, м. Львів, 79005, Україна  
Тел. (032)239-45-64, e-mail: [igor.olenych@lnu.edu.ua](mailto:igor.olenych@lnu.edu.ua)

**Анотація.** Досліджено особливості використання польових транзисторів на основі плівки відновленого оксиду графену (RGO), нанесеної на поверхню анодно та термічно окисненого поруватого кремнію, як фотодетекторів і газоадсорбційних сенсорів. Виявлено підвищення ефективності створених польових транзисторів у результаті термічного окиснення поруватого шару або осадження додаткового шару  $\text{SiO}_2$  на поверхню анодно окисненого поруватого кремнію. Встановлено, що фото- та адсорбційна чутливість польових транзисторів з RGO-каналом залежить як від якості ізоляційного шару, так і наявності захисного  $\text{SiO}_2$  покриття на плівці RGO. Зокрема, найбільшою фоточутливістю характеризуються польові транзистори з ізоляційним шаром анодно окисненого поруватого кремнію. І навпаки, графеновий польовий транзистор з термічно окисненим поруватим кремнієм майже нечутливий до видимого світла, проте демонструє максимальний відгук на адсорбцію молекул води. Захисний шар  $\text{SiO}_2$  майже не впливає на фоточутливість польових транзисторів на основі RGO, але суттєво зменшує вплив атмосфери на їхню провідність.

**Ключові слова:** графеновий польовий транзистор, відновлений оксид графену, поруватий кремній, фоточутливість, газоадсорбційний сенсор

## Вступ

Унікальне поєднання надвисокої рухливості носіїв заряду, високої прозорості у широкому спектральному діапазоні, механічної міцності та гнучкості забезпечує виняткові перспективи графену та матеріалів на основі  $sp^2$ -зв'язаних атомів вуглецю у сенсорній електроніці. Здатність графену реагувати на незначні зміни електричного поля, механічного тиску чи хімічного складу середовища зміною електропровідності робить його ідеальним матеріалом для створення високочутливих первинних перетворювачів портативних газових детекторів, біосенсорів, сенсорів деформації, оптоелектронних та дозиметричних пристроїв нового покоління [1-5]. Можливість функціоналізації поверхні вуглецевого моношару різними хімічними групами робить графен надзвичайно ефективною платформою для виявлення різних біомаркерів, ідентифікації екологічно важливих газів або токсичних речовин без використання складного лабораторного обладнання [6,7]. Інтеграція чутливих елементів на основі графену з малопотужними IoT-платформами дає змогу зменшити розміри та споживану потужність портативних діагностичних систем і їх функціонування в режимі реального часу [8,9].

Попри привабливість графену для сенсорних застосувань є низка викликів, які стримують розвиток багатофункціональних графенових сенсорів і їх масове промислове застосування. Однією з перешкод залишається масштабування виробництва високоякісного графену та забезпечення його однорідності на великих площах. Рішенням цієї проблеми може бути використання відновленого оксиду графену (RGO), технологія виготовлення якого є доволі простою та недорогою [10,11]. Польові транзистори на основі плівки RGO демонструють високу чутливість до електромагнітного й іонізуючого випромінювання [12] та адсорбції різних молекул [13]. Використання поруватого кремнію (por-Si) з надзвичайно розвинутою поверхнею як підкладки для осадження плівки RGO забезпечує підвищення чутливості таких сенсорів [14,15].

З іншого боку, значна реакція електропровідності графену на мінімальні зміни електричного поля зумовлює не тільки його високу чутливість, але й низьку природну вибірковість – різні фактори впливу можуть викликати подібний електричний відгук матеріалу. Це ускладнює точне розпізнавання як фактора впливу, так і конкретної речовини серед схожих за властивостями газів-аналітів у разі використання графенового польового транзистора як газочутливого сенсорного елемента. Для підвищення селективності газових сенсорів було запропоновано підходи, пов'язані з хімічною функціоналізацією графену, яка дає змогу “налаштувати” його поверхню на взаємодію з конкретними аналітами [6], чи використанням алгоритмів машинного навчання для аналізу “сенсорних відбитків” адсорбованих газів [15-17]. Значно менше уваги приділялося проблемі сепарування відгуку багатофункціональних сенсорних елементів на основі графену на вплив різних чинників. Тому мета роботи полягала у вивченні зв'язку між структурними особливостями польових транзисторів на основі плівки RGO, їхніми електричними характеристиками та фото- і газочутливими властивостями.

## Експеримент

Як підкладку і затвор графенових польових транзисторів використано слаболеговані кремнієві пластини товщиною 400 мкм. Тонка плівка золота, що слугувала електричним контактом затвора, була термічно осаджена на тильну поверхню пластин і відпалена за температури 600°C упродовж 30 хв. На протилежному боці пластини фотоелектрохімічним методом було сформовано шар por-Si. Як електроліт використано етанольний розчин фтористоводневої кислоти з співвідношенням компонентів  $\text{HF}:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = 1:1$ . Густина струму і тривалість анодного травлення становили 30  $\text{mA}/\text{cm}^2$  і 5 хв, відповідно. Для генерації носіїв заряду позитивного знаку, необхідних для перебігу хімічних реакцій травлення кремнію, робоча поверхня пластини освітлювалася лампою розжарення потужністю 500 Вт упродовж

всього процесу електрохімічного травлення. Після промивання дистильованою водою одна частина зразків піддавалася термічному окисненню поруватого шару за температури 1050°C упродовж 2 годин, а інша частина – десятихвилинному електрохімічному окисненню  $\text{por-Si}$  у розчині  $\text{H}_2\text{O}_2$  при густині струму 15  $\text{mA}/\text{cm}^2$  для стабілізації поверхні і формування тонкої діелектричної плівки.

Оскільки  $\text{por-Si}$  використовувався як ізоляційний шар між затвором і RGO-каналом польового транзистора, для покращення його діелектричних властивостей на поверхню анодно окисненого поруватого шару окремих зразків було додатково осаджено плівку  $\text{SiO}_2$  ВЧ-магнетронним розпиленням кварцової мішені в атмосфері аргону. Умови осадження, а саме потужність височастотного генератора 100 Вт, індукція магнітного поля 0,1 Тл, час розпилення 90 хв, відстань між мішенню і підкладкою 60 мм, забезпечили формування плівки  $\text{SiO}_2$  товщиною близько 170 нм.

Провідний канал графенових польових транзисторів був утворений у результаті висушування на повітрі нанесеної на поверхню ізоляційного шару плівкоутворювальної суспензії RGO, отриманої відновленням оксиду графену (у вигляді водної суспензії виробництва Sigma-Aldrich) моногідратом гідразину за впливу ультразвукової обробки упродовж 20 хв з додаванням 0,2 М розчину додецилбензолсульфонату натрію для запобігання агрегації наночастинок RGO. На поверхню утвореної плівки RGO було термічно напилено срібні контакти витіку та стоку на відстані 1 мм один від одного, як це показано на рис. 1.

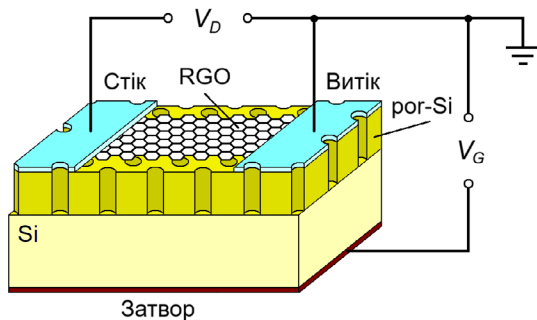


Рис. 1. Схематичне зображення польового транзистора на основі плівки RGO та  $\text{por-Si}$ .

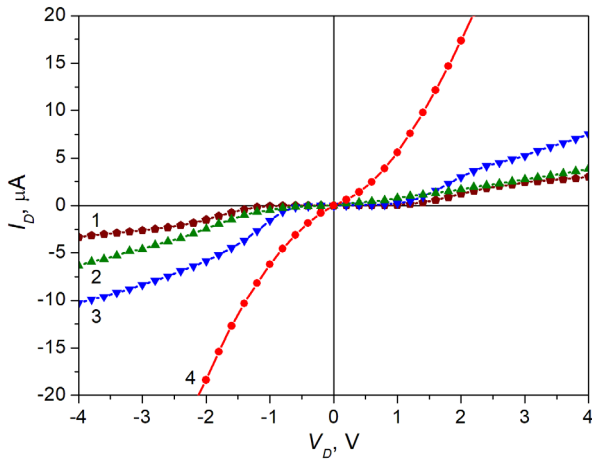
Додатково були сформовані експериментальні зразки графенових польових транзисторів із захисним шаром  $\text{SiO}_2$  товщиною 170 нм, осадженим на поверхню плівки RGO методом ВЧ-магнетронного розпилення.

Дослідження електричних і фотоелектричних характеристик створених польових транзисторів здійснювалося у режимах постійного та змінного струмів. Зокрема, залежності струму стоку  $I_D$  від напруги зміщення  $V_D$  і напруги затвора  $V_G$  виміряно з використанням мультиметра Siglent SDM 3045. Ємнісно-резистивні характеристики RGO-каналу досліджувалися за допомогою RLC-вимірювача Hantek 1833C у частотному діапазоні  $10^2$ – $10^5$  Гц. Для вивчення фотоелектричних явищ було використано світловипромінювальний діод білого світла FYLP-1W-UWB-A з потужністю 1 Вт і світловим потоком 76 люмен. Газоадсорбційні властивості польових транзисторів на основі плівки RGO досліджувалися в герметичній камері з контрольованою зміною вологості повітря. Контроль відносної вологості повітря здійснювався за допомогою сенсора Honeywell НН-4000-004. Всі вимірювання проводилися за кімнатної температури.

### Результати та їх обговорення

Залежності струму стоку  $I_D$  від різниці потенціалів між контактами витік і стік  $V_D$  створених польових транзисторів за відсутньої напруги затвора ( $V_G = 0$ ) мають нелінійний характер (рис. 2), що вказує на складні процеси перенесення заряду у плівці RGO. Найменшою провідністю характеризується плівка RGO, осаджена на поверхню анодно окисненого поруватого шару (структура  $\text{Si-por-Si}_{\text{aox}}-\text{RGO}$ ). Дещо більша провідність плівок RGO спостерігається у структурах з додатковим шаром  $\text{SiO}_2$  ( $\text{Si-por-Si}_{\text{aox}}-\text{RGO}-\text{SiO}_2$  та  $\text{Si-por-Si}_{\text{aox}}-\text{SiO}_2-\text{RGO}$ ). Найвищу провідність демонструє плівка RGO, сформована на поверхні термічно окисненого поруватого шару (структура  $\text{Si-por-Si}_{\text{tox}}-\text{RGO}$ ). Хоча різні значення провідності найімовірніше спричинені різною кількістю шарів вуглецевих наноаркушів у плівці RGO,

нелінійний характер залежностей  $I_D-V_D$  може мати декілька причин.

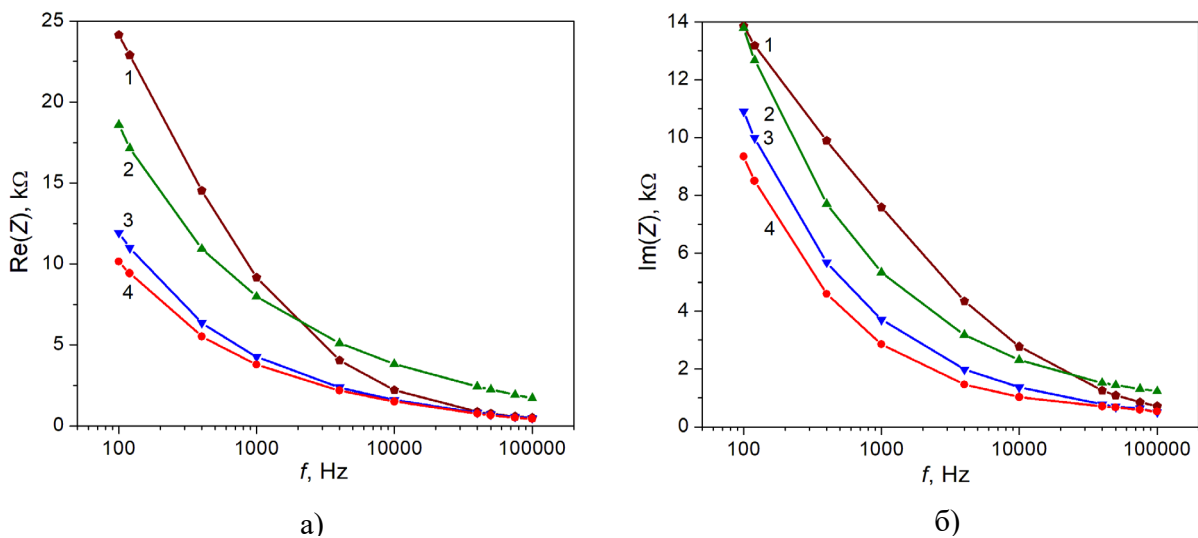


**Рис. 2.** Залежність струму стоку  $I_D$  від напруги зміщення  $V_D$  польових транзисторів на основі структур Si-por-Si<sub>aox</sub>-RGO (1), Si-por-Si<sub>aox</sub>-RGO-SiO<sub>2</sub> (2), Si-por-Si<sub>aox</sub>-SiO<sub>2</sub>-RGO (3) та Si-por-Si<sub>tox</sub>-RGO (4) за напруги затвора  $V_G = 0$ .

Враховуючи, що графен характеризується омичним контактним опором з металами [18], можна припустити, що виявлена нелінійність зумовлена як неоднорідністю утворених плівок, так і впливом шару por-Si на провідність RGO. Перш за все, електричні властивості плівки RGO визначаються не тільки провідністю 2D вуглецевих наночастинок, але й елек-

тричними бар'єрами між ними, які ймовірно утворюються через наявність поверхнево-активної речовини у плівкоутворювальній суспензії. Крім того, через структурну недосконалість шару SiO<sub>2</sub> і пов'язані з нею електрично активні дефекти на електропровідність плівки RGO можуть впливати носії заряду, локалізовані у цьому шарі чи на межі SiO<sub>2</sub>/RGO. З огляду на малу товщину оксидної плівки, також не слід повністю виключати можливість інжекції носіїв з анодно окисненого шару por-Si<sub>aox</sub>.

Для отримання додаткової інформації про процеси перенесення заряду у RGO-каналі створених польових транзисторів було досліджено їхні ємнісно-резистивні властивості у режимі змінного струму. На рис. 3 зображені частотні залежності дійсної та уявної частин імпедансу плівки RGO, виміряні між контактами витoku і стоку. Виявлено зменшення дійсної та уявної частин імпедансу зі збільшенням частоти від 100 Гц до 100 кГц. Найбільші зміни резистивних і ємнісних характеристик плівки RGO спостерігалось у разі її нанесення на поверхню анодно окисненого шару por-Si<sub>aox</sub>. Покращення ізоляційних властивостей шару por-Si шляхом його термічного окиснення чи осадження додаткового шару SiO<sub>2</sub> забезпечує зменшення діапазону зміни імпедансу плівки RGO у досліджуваному частотному діапазоні.



**Рис. 3.** Частотні залежності дійсної (а) та уявної (б) частин імпедансу RGO-каналу польових транзисторів на основі структур Si-por-Si<sub>aox</sub>-RGO (1), Si-por-Si<sub>aox</sub>-RGO-SiO<sub>2</sub> (2), Si-por-Si<sub>aox</sub>-SiO<sub>2</sub>-RGO (3) та Si-por-Si<sub>tox</sub>-RGO (4) за напруги затвора  $V_G = 0$ .

Дисперсія електричних характеристик RGO-каналу створених польових транзисторів може бути додатковим підтвердженням неоднорідності плівки RGO, утвореної з вуглецевих наоаркушів.

Вимірювання залежності струму стоку  $I_D$  від напруги затвора  $V_G$  дає змогу оцінити ефективність створених польових транзисторів на основі плівки RGO. Виміряні криві  $I_D-V_G$  за напруги зміщення  $V_D = \pm 1,5$  В зображені на рис. 4. Виявлено майже лінійне збільшення струму  $I_D$  при зміні напруги затвора від приблизно 1 до -4 В для напруги зміщення  $V_D = 1,5$  В. Аналогічно, провідність RGO-каналу польових транзисторів лінійно збільшується зі збільшенням  $V_G$  від 1 до 4 В для  $V_D = -1,5$  В. Мінімум провідності польових транзисторів на основі плівки RGO за напруги затвора близько 1 В зумовлений особливостями зонної структури графену у формі конусів Дірака й асоціюється з точкою нейтральності заряду, яка розділяє профіль провідності на діркову та електронну складові [19]. Загалом, положення точки нейтральності заряду та форма профілю провідності визначається як якістю діелектричного шару, на який нанесена плівка RGO [12], так і впливом зовнішніх факторів, зокрема, електричним полем адсорбованих молекул чи фотогенерованих носіїв заряду [14,15].

Аналіз вимірних залежностей  $I_D-V_G$  свідчить, що найвищу ефективність демонструє польовий транзистор на основі структури Si-por-Si<sub>tox</sub>-RGO, який характеризується найбільшим діапазоном зміни струму стоку при зміні напруги затвора. І навпаки, найнижча ефективність була властива польовим транзисторам, у яких як ізоляційний шар використовувався анодно окиснений por-Si<sub>aox</sub>. Виявлені особливості електричних характеристик польових транзисторів на основі RGO та por-Si можуть бути зумовлені електрично активними дефектами у поруватому шарі та/або на інтерфейсі з плівкою RGO, адже продуктивність графенових пристроїв на основі ефекту поля суттєво залежить від дефектів у опорному діелектричному шарі [20]. Слід зазначити, що наноструктури por-Si мають рівні захоплення різної природи з квазінеперервним енергетичним розподілом [21]. Електричне поле захоплених у поруватому шарі носіїв заряду може суттєво впливати на провідність плівки RGO.

Висока чутливість провідності RGO-каналу до локальних змін електричного поля забезпечує можливість застосування запропонованих польових транзисторів у сенсорній електроніці. Зокрема, внаслідок опромінення робочої поверхні транзисторів білим світлом спостерігалось збільшення струму стоку  $I_D$  за

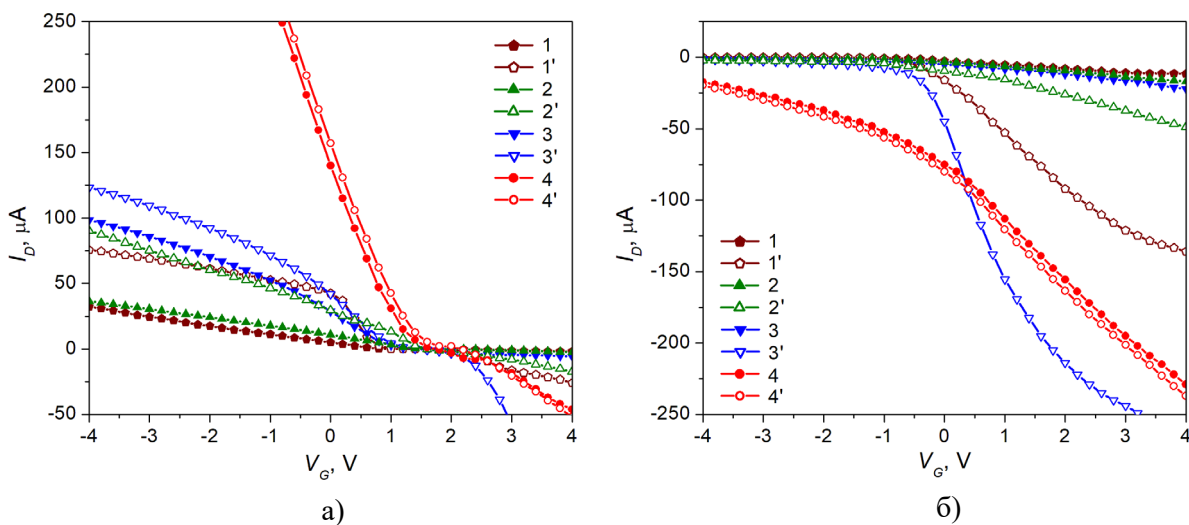


Рис. 4. Залежність струму стоку  $I_D$  від напруги затвора  $V_G$  польових транзисторів на основі структур Si-por-Si<sub>tox</sub>-RGO (1, 1'), Si-por-Si<sub>tox</sub>-RGO-SiO<sub>2</sub> (2, 2'), Si-por-Si<sub>aox</sub>-SiO<sub>2</sub>-RGO (3, 3') та Si-por-Si<sub>aox</sub>-RGO (4, 4') за напруги зміщення  $V_D = 1,5$  В (а) та  $V_D = -1,5$  В (б). Криві (1, 2, 3, 4) виміряні у темноті, а (1', 2', 3', 4') – за умови опромінення світлодіодом FYLP-1W-UWB-A.

напруги зміщення  $V_D = \pm 1,5$  V. Найбільшу фоточутливість демонструють структури з анодно окисненим поруватим шаром, у той час як фотовідгук польових транзисторів на основі структури  $\text{Si-por-Si}_{tox}\text{-RGO}$  є надто слабким (див. рис. 4). Виявлені особливості фотоелектричних властивостей польових транзисторів на основі RGO та  $\text{por-Si}$  зумовлені різним ступенем окиснення поруватого шару електрохімічним та термічним методами. Товстий шар  $\text{por-Si}_{tox}$  просторово розділяє фотогенеровані носії заряду і плівку RGO, зменшуючи тим самим їхній вплив на провідність RGO-каналу польового транзистора. Осадження додаткового шару  $\text{SiO}_2$  на поверхню  $\text{por-Si}_{aox}$  з одного боку підвищує ефективність польових транзисторів на основі RGO, а з іншого не перешкоджає впливу фотогенерованих у поруватому шарі носіїв заряду. Захисний шар  $\text{SiO}_2$  на поверхні плівки RGO також є достатньо прозорим для видимого світла.

Дослідження газочутливих властивостей створених польових транзисторів здійснювалося шляхом вимірювання відношення опору RGO-каналу за різної вологості повітря до його початкового значення  $R/R_0$  на частоті 1 кГц. Як можна побачити на рис. 5, збільшення відносної вологості повітря спричиняє зменшення опору досліджуваних польових транзисторів.

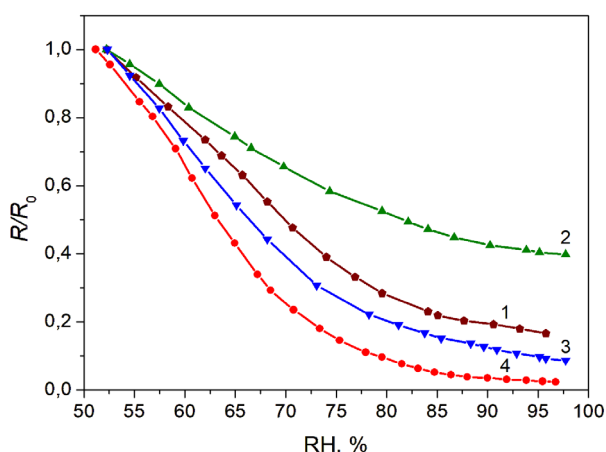


Рис. 5. Залежність зміни опору RGO-каналу польових транзисторів на основі структур  $\text{Si-por-Si}_{aox}\text{-RGO}$  (1),  $\text{Si-por-Si}_{aox}\text{-RGO-SiO}_2$  (2),  $\text{Si-por-Si}_{aox}\text{-SiO}_2\text{-RGO}$  (3) та  $\text{Si-por-Si}_{tox}\text{-RGO}$  (4) на частоті 1 кГц від відносної вологості повітря.

Незважаючи на однаковий характер залежностей  $R/R_0$  від відносної вологості повітря, величина спричиненої адсорбцією молекул води зміни опору RGO-каналу польових транзисторів на основі різних структур була різною. Найменша чутливість до адсорбованих молекул спостерігалася для структури  $\text{Si-por-Si}_{aox}\text{-RGO-SiO}_2$ . Зокрема, за однакових умов зміни вологості повітря опір польового транзистора із захисним шаром  $\text{SiO}_2$  на поверхні плівки RGO зменшувався приблизно у 2,5 рази, тоді як структури  $\text{Si-por-Si}_{aox}\text{-RGO}$ ,  $\text{Si-por-Si}_{aox}\text{-SiO}_2\text{-RGO}$  і  $\text{Si-por-Si}_{tox}\text{-RGO}$  демонстрували зменшення опору RGO-каналу у 6, 10 і понад 30 разів, відповідно. Найбільшою газоадсорбційною чутливістю характеризувався польовий транзистор з термічно окисненим поруватим шаром, попри його найменшу чутливість до світла.

## Висновки

У роботі вивчено особливості використання польових транзисторів на основі плівки RGO з різними ізоляційними шарами для реєстрації видимого випромінювання та адсорбованих молекул води. Виявлено нелінійні залежності струму стоку від напруги зміщення створених польових транзисторів, які зумовлені неоднорідністю плівки RGO, сформованої з 2D вуглецевих наночастинок. Як ізоляційний шар використано термічно та анодно окиснений  $\text{por-Si}$ , а також анодно окиснений  $\text{por-Si}$  з додатковим шаром  $\text{SiO}_2$ , отриманим ВЧ-магнетронним напыленням. На основі аналізу залежностей струму стоку від напруги затвора встановлено, що осадження додаткового шару  $\text{SiO}_2$  як і термічне окиснення поруватого шару підвищує ефективність польових транзисторів з RGO-каналом. Зареєстровано суттєво нижчу фоточутливість польового транзистора з термічно окисненим шаром  $\text{por-Si}$ , зумовлену зменшенням впливу фотогенерованих носіїв заряду на провідність плівки RGO. Продемонстровано, що ВЧ-магнетронне напылення захисного шару  $\text{SiO}_2$  майже не впливає на фоточутливість польових транзисторів на основі RGO, але суттєво зменшує вплив атмосфери на їхню провідність.

## Список використаної літератури

- [1]. M. R. Farani, H. Kim, M. Alhammadi, Y. S. Huh. The detection of toxic gases (CO, FN<sub>3</sub>, HI, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, and O<sub>3</sub>) using a wearable Kapton–graphene biosensor for environmental and biomedical applications // *Carbon Lett.*, 35, pp. 839–848 (2025). <https://doi.org/10.1007/s42823-024-00834-x>
- [2]. J. P. Ramoso, M. Rasekh, W. Balachandran. Graphene-Based Biosensors: Enabling the Next Generation of Diagnostic Technologies – A Review // *Biosensors*, 15(9), 586 (2025). <https://doi.org/10.3390/bios15090586>
- [3]. Z. Zhang, Q. Liu, H. Ma, N. Ke, J. Ding, W. Zhang, X. Fan. Recent Advances in Graphene-Based Pressure Sensors: A Review // *IEEE Sensors Journal*, 24(16), pp. 25227–25248 (2024). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.02256>
- [4]. S. Ishida, Y. Anno, M. Takeuchi, M. Matsuoka, K. Takei, T. Arie, S. Akita. Highly photosensitive graphene field-effect transistor with optical memory function // *Sci. Rep.* 5, 15491 (2015). <https://doi.org/10.1038/srep15491>
- [5]. I. B. Olenych, Y. V. Boyko, O. S. Dzendze-lyuk. Ionizing radiation detectors based on graphene field effect transistors // *Journal of Physical Studies*, 28(4), 4702 (2024), <https://doi.org/10.30970/jps.28.4702> [in Ukrainian].
- [6]. A. M. Teli, S. M. Mane, S. A. Bknalkar, R. K. Mishra, W. Jeon, J. C. Shin. Graphene-Based Gas Sensors: State-of-the-Art Developments for Gas Sensing Applications // *Micromachines*, 16(8), 916 (2025). <https://doi.org/10.3390/mi16080916>
- [7]. N. Alzate-Carvajal, A. Luican-Mayer. Functionalized Graphene Surfaces for Selective Gas Sensing // *ACS Omega*, 5, pp. 21320–21329 (2020). <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02861>
- [8]. I. Olenych, R. Yaremyk, P. Parandiy. Microprocessor system for measuring sensor characteristics of gas-sensitive field-effect transistors based on porous silicon and reduced graphene oxide film // *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*, No. 61, pp. 171–177 (2025), <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-61-24> [in Ukrainian].
- [9]. P. G. Steeneken, M. Soikkeli, S. Arpiainen, et al.. Towards wafer-scale 2D material sensors // *2D Mater.*, 12, 023002 (2025). <https://doi.org/10.1088/2053-1583/adac73>
- [10]. S. Pei, H. M. Cheng. The reduction of graphene oxide // *Carbon*, 50, pp. 3210–3228 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.11.010>
- [11]. A. A. Abakumov, I. B. Bychko, O. O. Voitsihovska, R. M. Rudenko, P. E. Strizhak. Tuning the surface area of reduced graphene oxide by modulating graphene oxide concentration during hydrazine reduction // *Materials Letters*, 354, 135417 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.135417>
- [12]. I. B. Olenych, L. S. Monastyrskii, B. S. Sokolovskii, B. I. Turko, O. S. Dzendze-lyuk. Field-effect transistors based on reduced graphene oxide film for photo and radiation detectors // *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, 22(2), pp. 19–26 (2025), <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2025.2.333193> [in Ukrainian].
- [13]. L. Sarkar, A. Sett, S. Majumdar, T. K. Bhattacharyya. Reduced Graphene-Oxide-Based Silk-FET: A Facile Platform for Low Power and Room Temperature Detection of Formaldehyde // *IEEE Transactions on Electron Devices*, 70(6), pp. 3275–3281 (2023). <https://doi.org/10.1109/TED.2023.3269727>
- [14]. I. B. Olenych, Yu. Yu. Horbenko. Electrical and photoelectric properties of hybrid structures based on reduced graphene oxide and Pd-doped porous silicon // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 768, pp. 135–144 (2024). <https://doi.org/10.1080/15421406.2023.2235191>
- [15]. I. B. Olenych. Field-effect transistor based on reduced graphene oxide – porous silicon hybrid structure for application in e-nose technology // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 769, pp. 1527–1537 (2025). <https://doi.org/10.1080/15421406.2025.2540098>

- [16]. T. Hayasaka, A. Lin, V. C. Copa, Jr. L. P. Lopez, R. A. Loberternos, L. I. M. Ballesteros, Y. Kubota, Y. Liu, A. A. Salvador, L. Lin. An electronic nose using a single graphene FET and machine learning for water, methanol, and ethanol // *Microsystems & Nanoengineering*, 6, 50 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41378-020-0161-3>
- [17]. O. G. Agbonlahor, M. Muruganathan, A. Banerjee, H. Mizuta. Machine Learning Identification of Atmospheric Gases by Mapping the Graphene-Molecule van Der Waals Complex Bonding Evolution // *Sens. Actuators B Chem.*, 380, 133383 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.133383>
- [18]. F. Xia, V. Perebeinos, Y. -M. Lin, Y. Wu, P. Avouris. The origins and limits of metal graphene junction resistance // *Nature Nanotechnology*, 6(3), pp. 179–184 (2011). <https://doi.org/10.1038/nnano.2011.6>
- [19]. D. Zhan, J. Yan, L. Lai, Z. Ni, L. Liu, Z. Shen. Engineering the Electronic Structure of Graphene // *Adv. Mater.*, 24, pp. 4055–4069 (2012). <https://doi.org/10.1002/adma.201200011>
- [20]. G. Imamura, K. Saiki. Modification of Graphene/SiO<sub>2</sub> Interface by UV-Irradiation: Effect on Electrical Characteristics // *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 7, pp. 2439–2443 (2015). <https://doi.org/10.1021/am5071464>
- [21]. I. Olenych, B. Tsizh, L. Monastyrskii, O. Aksimentyeva, B. Sokolovskii. Preparation and Properties of Nanocomposites of Silicon Oxide in Porous Silicon // *Solid State Phenom.*, 230, pp. 127–132 (2015). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.230.127>

Стаття надійшла до редакції: 12.03.2026

прийнята до друку: 19.03.2026

опублікована: 20.04.2026

PACS 73.50.Pz, 73.63.-b

<https://doi.org/10.18524/1815-7459.2026.1.355911>

## OPTIMIZATION OF THE STRUCTURE OF FIELD EFFECT TRANSISTORS BASED ON REDUCED GRAPHENE OXIDE FILM FOR PHOTO- AND GAS-SENSING APPLICATIONS

*I. B. Olenych, L. S. Monastyrskii, A. Yu. Kozak, V. Ya. Boiko, O. O. Sinkevych*

Ivan Franko National University of Lviv  
50 Drahomanova St, Lviv, 79005, Ukraine  
e-mail: igor.olenych@lnu.edu.ua

**Abstract.** The features of using field-effect transistors (FETs) based on a reduced graphene oxide (RGO) film deposited on the surface of anodically and thermally oxidized porous silicon as photodetectors and gas adsorption sensors have been investigated. An increase in the efficiency of the created FETs was found as a result of thermal oxidation of the porous layer or deposition of an additional SiO<sub>2</sub> layer on the surface of anodically oxidized porous silicon. It has been established that the photo- and adsorption sensitivity of the RGO-based FETs depends on both the quality of the insulating layer and the presence of a protective SiO<sub>2</sub> coating on the RGO film. In particular, the FETs with an anodic oxidized porous silicon insulating layer are characterized by the highest photosensitivity. Conversely, the graphene FET with thermally oxidized porous silicon is almost insensitive to visible light but demonstrates maximum response to the adsorption of water molecules. The SiO<sub>2</sub> protective layer has almost no effect on the photosensitivity of RGO-based FETs but significantly reduces the influence of the atmosphere on their conductivity.

**Keywords:** graphene field-effect transistor, reduced graphene oxide, porous silicon, photosensitivity, gas adsorption sensor

PACS 61.46.+w, 42.25.Bs, 07.07.Df  
<https://doi.org/10.18524/1815-7459.2026.1.355912>

## ЕНЕРГЕТИЧНІ СТАНИ ІОНІВ ЗАЛІЗА В НАНОКРИСТАЛАХ ОКСИДУ ЦИНКУ

Ю. А. Ніцук, <https://orcid.org/0000-0001-7137-1085>  
С. Ф. Гусейнова, <https://orcid.org/0009-0001-6342-6063>

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

**Анотація.** Досліджені оптичне поглинання та фотолюмінесценція нанокристалів ZnO:Fe, отриманих методом хімічного осадження. Встановлено що розмір нанокристалів визначається концентрацією прекурсорів. Показано, що легування залізом призводить до утворення енергетичних станів іону Fe<sup>2+</sup> в забороненій зоні нанокристалів оксиду цинку, що призводить до утворення ліній ультрафіолетового та видимого випромінювання. Порівнянням з розрахованими значеннями енергій в наближенні слабкого кристалічного поля ідентифікована природа внутрішньоцентрових оптичних та випромінювальних переходів.

**Ключові слова:** нанокристали ZnO:Fe, оптичне поглинання, фотолюмінесценція, домішкові дефекти

### ВСТУП

Актуальність використання нанокристалів оксиду цинку обумовлена унікальними фізико-хімічними та біологічними властивостями матеріалу. Завдяки ним нанокристали ZnO використовуються в світлодіодах, сонячних батареях, системах біомедициної візуалізації, фотокаталізу та антибактеріальної обробки[1-3]. Нанокристали оксиду цинку широко використовуються в якості сенсорів небезпечних газів та біомолекул [4-8].

Додавання домішки заліза в нанокристали оксиду цинку дозволяє зробити більш ефективним процес каталізу та світлогенерації завдяки великій кількості енергетичних станів іонів заліза у видимій області [9-11]. Відомо про підвищення антибактеріальної дії нанокристалів ZnO:Fe в порівнянні з нелегованими нанокристалами ZnO [12]. Висока чутливість люмінесцентних сенсорів на основі нанокристалів ZnO:Fe може досягатися за рахунок великої кількості внутрішньоцентрових випроміню-

вальних переходів в видимій області спектру, спектральне розташування яких не суттєво залежить від розміру наночастинок.

Основною перешкодою для використання нанокристалів ZnO:Fe в якості люмінесцентних сенсорів та фотокатализаторів є відсутність досліджень енергетичних станів іонів Fe в ZnO та відсутність простої методики легування нанокристалів залізом.

В представленій роботі запропонована методика легування нанокристалів ZnO залізом в процесі вирощування методом співосадження без додаткового нагрівання, що дозволяє отримувати нанокристали ZnO:Fe з розміром нанокристалітів 3.5 – 5 нм. Визначена природа оптичних та випромінювальних переходів в межах іону Fe<sup>2+</sup>.

Метою даної роботи є визначення природи оптичних та випромінювальних переходів іонів Fe в оксиді цинку, відповідальних за видиме поглинання та випромінювання нанокристалів ZnO:Fe.



## МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

В роботі досліджувалися нанокристали ZnO:Fe, отримані методом співосадження. В якості контрольних були використані нелеговані нанокристали ZnO, отримані при аналогічних технологічних умовах. Джерелом іонів цинку був 10% водний розчин сульфату цинку, а джерелом іонів кисню – 10% розчин гідроксиду калію виробництва компанії Merck. Джерелом домішки Fe був 1% водний розчин Fe<sub>2</sub>Cl<sub>3</sub>. В якості стабілізатора росту наночастинок використовували 5% розчин желатину. Після додавання до розчину сульфату цинку розчину желатину до нього повільно додавався розчин КОН та желатину при енергійному перемішуванні. Після завершення процесу синтезу колоїдні розчини заморожували та вимивали з них наночастинок дистильованою водою. Для дослідження оптичного поглинання та фотолюмінесценції на кварцові підкладки наносили плівки.

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

Спектри оптичного поглинання аналізувалися в координатах  $D = \ln I_0/I \div E$ , де  $I$  – інтенсивність світла, що пройшла крізь зразок (нанокристали ZnO або ZnO:Fe),  $I_0$  – інтенсивність світла, що падає на зразок (проходить крізь плівку желатину),  $E$  – енергія квантів падаючого світла.

Для збудження фотолюмінесценції використовувався світлодіод з довжиною хвилі 290 нм.

Розмір наночастинок оцінювали за зсувом краю фундаментального поглинання в наближенні ефективних мас (Таблиця 1) за формулою Вонга [13].

Отримані розміри наночастинок добре співпадають з результатами досліджень за допомогою скануючого електронного мікроскопу (СЕМ). На СЕМ-зображенні (рис. 1)

показано утворення нанокристалів ZnO розміром до 10 нм.

Таблиця 1

### Результати розрахунків оптичного поглинання

№.	ZnSO <sub>4</sub> , КОН	Fe <sub>2</sub> Cl <sub>3</sub>	E <sub>g</sub> , eВ	ΔE <sub>g</sub> , eВ	R, нм
1.	10 %	0	4.4	1.2	3.7
2.	10%	0.1%	3.97	0.77	4.5
3.	10 %	0.5%	3.83	0.63	5.2

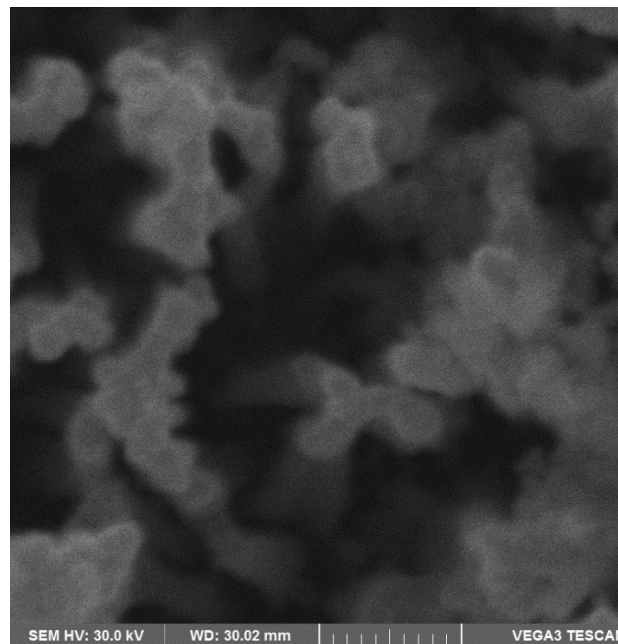


Рис. 1. СЕМ-зображення нанокристалів ZnO:Fe (зразок № 3).

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИЧНОГО ПОГЛИНАННЯ

Дослідження оптичного поглинання нанокристалів проводили в УФ-області та видимій області. Спектри поглинання нелегованих нанокристалів ZnO характеризуються краєм фундаментального поглинання на 4.13 eВ (рис. 2, крива 1) при  $T_{вим} = 300$  К та не мають будь-яких особливостей у видимій області спектру. Згідно [14], ширина забороненої зони нанокристалів ZnO, отриманих методом хімічного осадження, визначається концентрацією прекурсорів ZnSO<sub>4</sub> та КОН. Тому в зразках з домішкою Fe концентрації ZnSO<sub>4</sub> та КОН підтримувалися однаковими з нелегованими зразками.

Зразки ZnO:Fe демонструють “червоний” зсув в порівнянні з нелегованими нанокристаллами (рис. 2, криві 2,3). Величина зсуву збільшувалася із збільшенням концентрації  $\text{Fe}_2\text{Cl}_3$ . Збільшення розмірів нанокристалітів від 4.6 до 5.3 нм можна пояснити внесенням додаткової енергії зародкоутворення нанокристалів при дифузії атомів заліза. Внесення додаткової енергії відбувається при спробі заміщення іону  $\text{Zn}^{2+}$  іоном  $\text{Fe}^{3+}$  у вигляді утворення надлишкового позитивного заряду та захоплення електрону з навколишнього середовища, що супроводжується вивільненням енергії зв’язку електрону.

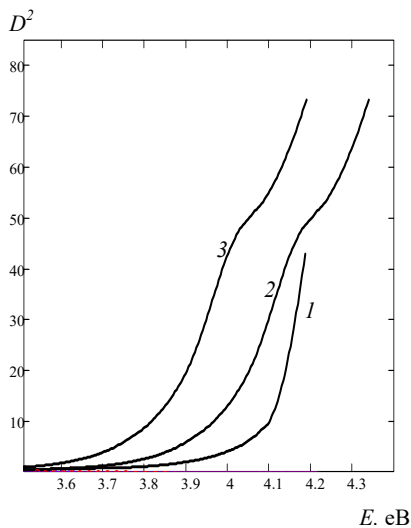


Рис. 2. Спектри поглинання нанокристалів ZnO (1) та ZnO:Fe (2,3). Зразки № 1 (1), № 2 (2) та № 3 (3).  $T_{\text{вим}} = 300$  К.

В процесі отримання розчинів нанокристалів ZnO:Fe встановлено зміни кольору зразків ZnO:Fe від жовтого у слабо легованих до коричневого у сильно легованих. Це свідчить про наявність смуг поглинання в видимій області спектру.

Дослідження оптичного поглинання нанокристалів ZnO:Fe в спектральному діапазоні 3.3-1.7 еВ (рис. 3) виявило наявність поглинання в даному спектральному діапазоні. Поглинання збільшувалося із зростанням концентрації іонів заліза в розчині.

Розкладання спектрів поглинання на елементарні гаусові складові дозволило виділити

22 елементарних спектральних ліній поглинання (Таблиця 2).

Встановлено, що спектральне розташування ліній поглинання не змінювалося при зміні концентрації домішки заліза (рис. 3) і температури нанокристалів ZnO:Fe. Така поведінка ліній поглинання свідчить про їх внутрішньоцентрову природу, тобто видиме оптичне поглинання отриманих зразків ZnO:Fe відбувається в межах іону Fe. Згідно результатів [15] найбільш поширеним зарядовим станом іонів Fe в ZnO є стан  $\text{Fe}^{2+}$ . Утворення іонів  $\text{Fe}^{2+}$  є більш енергетично вигідним в порівнянні з іонами  $\text{Fe}^{3+}$  оскільки іонний радіус  $\text{Fe}^{2+}$  ближчий за розмірами до  $\text{Zn}^{2+}$ .

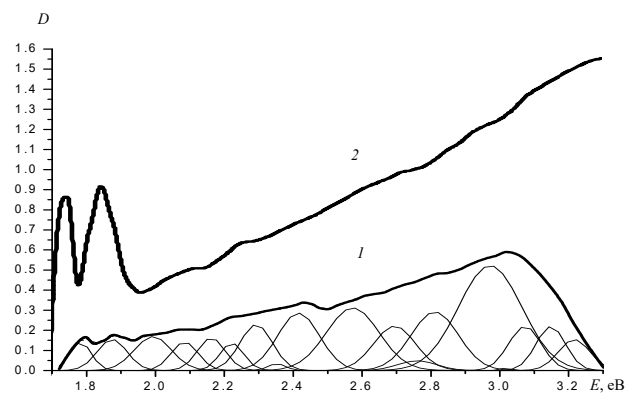


Рис. 3. Спектри поглинання нанокристалів ZnO:Fe в видимій області спектру. Зразки №2 (1) та №3 (2).  $T_{\text{вим}} = 300$  К.

Відповідно до теорії кристалічного поля, під дією кристалічного поля найближчого тетраедричного оточення відбувається розщеплення енергетичних станів іонів  $\text{Fe}^{2+}$ . Отримані розміри наночастинок ZnO:Fe (4.5-5 нм) дозволяють припустити наявність слабого кристалічного поля. Для розрахунку енергетичних станів іон  $\text{Fe}^{2+}$  ( $d^6$ ) використовувались діаграми Танабе-Сугано [16]. Використовуючи величину кристалічного поля  $3000 \text{ cm}^{-1}$  та параметр кристалічного поля  $600 \text{ cm}^{-1}$ , отримані в [17] були розраховані енергії станів іонів  $\text{Fe}^{2+}$  в кристалічному полі нанокристалів ZnO:Fe (Таблиця 2). Отримані таким способом значення енергій добре співпадають з енергіями, отриманими зі спектрів оптичного поглинання.

Таблиця 2

Оптичні переходи в межах іону Fe<sup>2+</sup>

№	$E_{Позл}, \text{eВ}$	$E_{Флр}, \text{eВ}$	$E_{Розрах}, \text{eВ}$	Переходи
1.	-	3.94	3.94	${}^5E(D) \leftrightarrow {}^1A_2(F)$
2.	-	3.82	3.86	${}^5E(D) \leftrightarrow {}^1T_2(F)$
3.	-	3.76	3.82	${}^5E(D) \leftrightarrow {}^1T_1(F)$
4.	-	3.58	3.64	${}^5E(D) \leftrightarrow {}^1A_1(S)$
5.	-	3.48	3.57	${}^5E(D) \leftrightarrow {}^1T_2(D)$
6.	3.22	3.3	3.22	${}^5E(D) \leftrightarrow {}^1T_1(G)$
7.	3.16	3.14	3.20	${}^5E(D) \leftrightarrow {}^1E(D)$
8.	3.09	3.08	3.12	${}^5E(D) \leftrightarrow {}^1A_1(G)$
9.	2.98	2.96	2.97	${}^5E(D) \leftrightarrow {}^1E(G)$
10.	-	2.9	2.92	${}^5E(D) \leftrightarrow {}^1T_2(G)$
11.	2.84	2.77	2.84	${}^5E(D) \leftrightarrow {}^3T_2(D)$
12.	2.75	2.7	2.72	${}^5E(D) \leftrightarrow {}^3E(D)$
13.	2.7	2.64	2.69	${}^5E(D) \leftrightarrow {}^1T_1(I)$
14.	-	-	2.61	${}^5E(D) \leftrightarrow {}^1T_2(I)$
15.	2.58	2.58	2.60	${}^5E(D) \leftrightarrow {}^1A_1(I)$
16.	-	2.5	2.56	${}^5E(D) \leftrightarrow {}^1A_2(I)$
17.	-	-	2.46	${}^5E(D) \leftrightarrow {}^3T_2(G)$
18.	2.44	2.42	2.45	${}^5E(D) \leftrightarrow {}^3T_1(G)$
19.	2.37	2.3	2.32	${}^5E(D) \leftrightarrow {}^1E(I)$
20.	2.3	2.26	2.3	${}^5E(D) \leftrightarrow {}^1T_2(I)$
21.	2.22	2.2	2.22	${}^5E(D) \leftrightarrow {}^3E(G)$
22.	2.18	2.15	2.19	${}^5E(D) \leftrightarrow {}^3T_2(F)$
23.	2.08	2.07	2.08	${}^5E(D) \leftrightarrow {}^3T_1(P)$
24.	2.03	1.99	2.04	${}^5E(D) \leftrightarrow {}^3A_1(G)$
25.	1.97	1.92	1.97	${}^5E(D) \leftrightarrow {}^3A_2(F)$
26.	1.88	1.86	1.85	${}^5E(D) \leftrightarrow {}^3T_2(H)$
27.	-	1.82	1.81	${}^5E(D) \leftrightarrow {}^3T_1(H)$
28.	1.77	1.76	1.70	${}^5E(D) \leftrightarrow {}^3E(H)$
29.	-	-	1.48	${}^5E(D) \leftrightarrow {}^3T_1(H)$
30.	-	-	0.44	${}^5E(D) \leftrightarrow {}^5T_2(D)$

## ДОСЛІДЖЕННЯ ФОТОЛЮМІНЕСЦЕНЦІЇ

Спектри фотолюмінесценції нелегованих нанокристалів ZnO, отриманих методом хімічного осадження по вищеписаній методиці характеризуються широкими неелементарними смугами випромінювання в синій (2.8 eV) і жовтій (2.3 eV) областях спектру. Наявність цих смуг видимого випромінювання обумовлюється [13] переходами в межах донорно-акцепторних парах, до складу яких входять власні дефекти – міжвузловинні атоми цинку та кисню, а також вакансії цинку. Синє випромінювання обумовлено переходами в межах центру ( $Zn_i^0, O_i^0$ )\*, а жовте – переходами в межах ( $Zn_i^+, V_{Zn}^-$ )\*

Легування нанокристалів ZnO залізом призводить до утворення вузьких інтенсивних ліній випромінювання в УФ та видимій областях спектру (рис. 4). Розкладання спектрів фотолюмінесценції на елементарні складові дозволило виділити 29 ліній випромінювання (Таблиця 2). Напівширина елементарних ліній випромінювання (100 меВ) є меншою в порівнянні з напівшириною ліній випромінювання нелегованих нанокристалів ZnO. Встановлено також, що із збільшенням концентрації прекурсору заліза ( $Fe_2Cl_3$ ) інтенсивність ліній випромінювання зростає, при незмінному

їх спектральному розташуванні. Також спектральне розташування ліній випромінювання нанокристалів ZnO:Fe лишається незмінним при нагріванні зразків від 300 до 430 К. Це підтверджує внутрішньоцентрову природу більшості ліній випромінювання. Порівняння енергій максимумів випромінювання з розрахованими по діаграмам Танабе-Сугано енергіями енергетичних станів іону  $Fe^{2+}$  та енергіями оптичних переходів, отриманими із спектрів оптичного поглинання, дозволило ідентифікувати природу переважної більшості випромінювальних переходів. Величина стоксового зсуву становила 10-60 меВ.

Спектри фотолюмінесценції кристалів нанокристалів ZnO легувані залізом також характеризуються ефективним випромінюванням у видимій області спектру, що являє собою набір вузьких ліній випромінювання, тобто ширина цих ліній є меншою, в порівнянні з лініями випромінювання нелегованих кристалів оксиду цинку. Лінії також не змінювали своє розташування при збільшенні концентрації заліза. Разом з цим інтенсивність цих ліній збільшувалася зі збільшенням концентрації. Тобто можемо говорити, що випромінювальні переходи в даних зразках обумовлені наявністю домішки заліза.

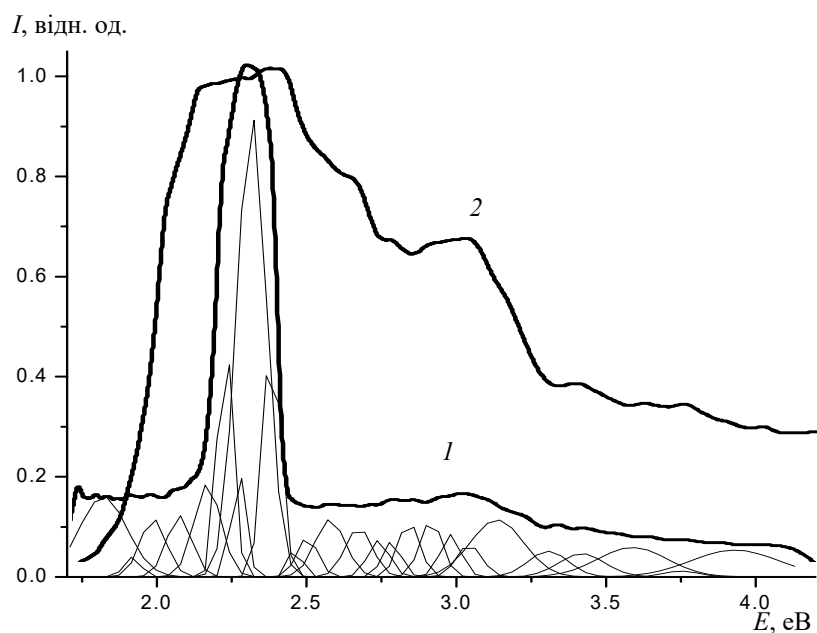


Рис. 4. Спектри фотолюмінесценції нанокристалів ZnO:Fe. Зразки № 2 (1) та № 3 (2).  $T_{вим} = 300$  К.

Порівняння енергій максимумів фотолюмінесценції та поглинання виявило їх кореляцію (Таблиця 2). Зіставлення з розрахунковими значеннями енергій дозволило ідентифікувати центри, відповідальні за випромінювальні переходи. Величина Стоксового зсуву не перевищувала 30 меВ. Лінії випромінювання на 2.82 та 2.37 еВ, що проявляються в слаблегованих нанокристалах ZnO:Fe, скоріш за все, відносяться до власно-дефектного випромінювання на донорно-акцепторних парах, що є домінуючим в нелегованих нанокристалах ZnO.

## ВИСНОВКИ

Результати проведених досліджень дозволили сформулювати наступні висновки:

Методом прямого хімічного осадження отримано нанокристали ZnO:Fe з розміром кристалітів 5-10 нм.

Показано, що легування нанокристалів ZnO іонами заліза призводить до виникнення поглинання та інтенсивного випромінювання в ультрафіолетовій та видимій областях спектра, що обумовлюються утворенням енергетичних станів іону Fe<sup>2+</sup> в кристалічному полі ZnO.

В наближення слабого кристалічного поля розраховані енергетичні стани іону Fe<sup>2+</sup> в тетраедричному оточенні оксиду цинку та ідентифікована природа оптичних та випромінювальних переходів в нанокристалах ZnO:Fe.

## Список використаної літератури

[1]. Tian Y., Qin Z.Y., Zou S. J. Efficient quantum-dot light-emitting diodes featuring the interfacial carrier relaxation and exciton recycling // *Materials Today Energy*. – 2021. – V. 20. – P. 100649. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2021.100649>

[2]. Zhou Y., Xia C., Hu X., et al. Dye-sensitized solar cells based on nanoparticle-decorated ZnO/SnO<sub>2</sub> core/shell nanoneedle arrays // *Applied Surface Science*. – 2014. – V. 292. – pp. 111–116. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.11.095>

[3]. Wibowo A., Marsudi M. A., Amal M. I., et al. ZnO nanostructured materials for emerging solar cell applications // *RSC Adv*. – 2020. –

V. 10. – pp. 42838–42859. <https://doi.org/10.1039/D0RA07689A>

[4]. Zhang Z. -Y., Xiong H. -M. Photoluminescent ZnO Nanoparticles and Their Biological Applications // *Mater*. 2015. – V. 8. – pp. 3101 – 3127. <https://doi.org/10.3390/ma8063101>

[5]. Bian, H., Ma, S., Sun, A., et al. Improvement of acetone gas sensing performance of ZnO nanoparticles // *Journal of Alloys and Compounds*// 2016. – V. 658. – pp. 629–635. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.09.217>

[6]. Yan, H., Song, P., Zhang, S., et. al. Facile synthesis, characterization and gas sensing performance of ZnO nanoparticles-coated MoS<sub>2</sub> nanosheets// *Journal of Alloys and Compounds*. – 2016. – V. 662. – pp. 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.12.066>

[7]. Umar, A., Khan, M. A., Kumar, R., Algarni, H. Ag-Doped ZnO Nanoparticles for Enhanced Ethanol Gas Sensing Application // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. – 2018. – V. 18 (5). – pp. 3557–3562. <https://doi.org/10.1166/jnn.2018.14651>

[8]. Zhang, D., Yang, Z., Li, P., Zhou, X. Ozone gas sensing properties of metal-organic frameworks-derived In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hollow microtubes decorated with ZnO nanoparticles // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2019. – V. 301. – P. 127081. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.127081>

[9]. Bousslama W., Elhouichet H., Ferid M. Enhanced photocatalytic activity of Fe doped ZnO nanocrystals under sunlight irradiation// *Optic*. – 2017. – V. 134. pp. 88–98. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.01.025>

[10]. Baqi A., Sarwer S., Hou X. et al., Tailoring iron-doped ZnO nanoparticles for photocatalytic degradation of methylene blue// *Polyhedron*. – 2026. – V. 284. – P. 117853. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2025.117853>

[11]. Abdel-Fattah, E. M., Alshehri, S. M. Impact of High Fe Doping on Structure, Optical, and Magnetic Properties of Zinc Oxide Nanostructures Synthesized by Hydrothermal Route// *Crystals*. 2026. – V. 16, № 1. – P. 55. <https://doi.org/10.3390/cryst16010055>

- [12]. Tahir, M., Shah, Z H., Butt, A F., and Imran, M. 1025. Antibacterial Efficacy of Iron-Doped Zinc Oxide Nanoparticles for the Control of Hospital-Acquired Infections// *Nature's Symphony*. – 2025. – V. 3(1). – P. 01-19. <https://doi.org/10.69547/NS.31.01>
- [13]. Sarma D., Das T. M., Baruah S. Bandgap Engineering of ZnO Nanostructures through Hydrothermal Growth // *AJET*. – 2016. – V. 4(1). -pp. 316-318. [https://journals.dbuniversity.ac.in/ojs/index.php/AJET/article/view/183/pdf\\_31](https://journals.dbuniversity.ac.in/ojs/index.php/AJET/article/view/183/pdf_31)
- [14]. Nitsuk, Y. A., Huseynova, S. F., Mamoilenko, Y. O., Lepikh, Y. I., Vaksman, Y. F., & Korenkova, G. V. (2023). Nature of zinc oxide colloidal nanocrystals photoluminescence // *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, 20(4), pp. 19–26. <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2023.4.294626>
- [15]. Hammad T.M., Griesing S., Wotosek M.O., et. al. Optical and magnetic properties of Fe-doped ZnO nanoparticles prepared by the sol-gel method// *Int. J. Nanoparticles*, – 2013. V. 6, No. 4, – pp. 324-337. <https://doi.org/10.1504/IJNP.2013.057175>
- [16]. Dorenbos P. Charge transition level energies of the 1+, 2+, 3+, and 4+ 3d<sup>n</sup> transition metals; new insight and tutorial review// *Optical Materials*. – 2025. – V.164. – P. – 117007. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2025.117007>

Стаття надійшла до редакції: 21.02.2026

прийнята до друку: 03.03.2026

опублікована: 20.04.2026

PACS 61.46.+w, 42.25.Bs, 07.07.Df  
<https://doi.org/10.18524/1815-7459.2026.1.355912>

## ENERGY STATES OF Fe IONS IN ZINC OXIDE NANOCRYSTALS

*Yu. A. Nitsuk, S. F. Huseynova*

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

**Abstract.** Optical absorption and photoluminescence of ZnO:Fe nanocrystals obtained by chemical deposition were studied. It was established that the size of nanocrystallites is determined by the concentration of precursors. It was shown that doping with iron leads to the formation of energy states of the Fe<sup>2+</sup> ion in the band gap of zinc oxide nanocrystals, which leads to the formation of ultraviolet and visible radiation lines. By comparing with the calculated energy values in the weak crystal field approximation, the nature of intracenter optical and emission transitions was identified.

**Keywords:** ZnO:Fe nanocrystals, optical absorption, photoluminescence, impurity defects

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

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

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

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

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

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

1. Рукописи повинні надсилатися українською або англійською мовою і супроводжуватися файлами тексту і малюнків. Рукописи, які пропонуються авторами з України до видання англійською мовою обов'язково доповнюються україномовною. Електронна копія може бути надіслана електронною поштою.
2. Прийнятні формати тексту: MS Word (rtf, doc, docx).
3. Прийнятні графічні формати для рисунків: EPS, TIFF, BMP, PCX, WMF, MS Word і MS Graf, JPEG. Рисунки, які створені за допомогою програмного забезпечення для математичних і статистичних обчислень, повинні бути перетворені до одного з цих форматів.
4. На статті авторів з України мають бути експертні висновки про можливість відкритого друку.

### Рукописи надсилати за адресою:

Лепіх Ярослав Ілліч,  
Головний редактор,  
Одеський національний університет  
імені І. І. Мечникова, МННФТЦ,  
вул. Змієнка Всеволода, 2,  
Одеса, 65082, Україна.

Телефон / факс +38(048) 723–34–61,  
e-mail: semst-journal@onu.edu.ua,  
<https://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.

### Титульний аркуш:

1. PACS – у верхньому лівому куті. Допускається декілька відділених комами кодів. Якщо ніякі коди класифікації не позначені, код(и) буде(-уть) визначено Редакційною Колегією.

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

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

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

5. Анотація: до 2000 символів.

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

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

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

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

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

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

9. Список літератури повинен бути надрукований через 1,5 інтервали, з літературою, пронумерованою в порядку її появи в тексті. Бібліографія

друкується лише латиницею (кирилиця подається в транслітерації). Порядок оформлення літератури повинен відповідати вимогам Акредаційної комісії України, наприклад:

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

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

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

10. Виносок, якщо можливо, бажано уникати.

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

Кожен рисунок повинен бути розташований у тексті статті після посилання на нього та мати розмір, що не перевищує 160x200 мм. Для тексту на рисунках використовуйте шрифт 10pt. Одиниці виміру повинні бути позначені після коми (не в круглих дужках). Усі рисунки повинні бути пронумеровані в порядку їх появи в тексті, з частинами позначеними як (а), (б), і т. д. Розміщення номерів рисунків і напису усередині малюнків не дозволяються.

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

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

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

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

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

Відхилені статті не повертаються.

*ДО УВАГИ АВТОРІВ*

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

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

---

# INFORMATION FOR AUTHORS. PAPER PREPARATION REQUIREMENTS

---

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

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

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

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

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

### **Manuscripts should be sent to:**

Lepikh Yaroslav Illich,  
Editor-in-Chief, Odesa National  
I. I. Mechnikov University, ISEPTC,  
2 Zmiiienka Vsevoloda St, Odesa,  
65082, Ukraine.

Phone/fax +38(048) 723-34-61,  
e-mail: [semst-journal@onu.edu.ua](mailto:semst-journal@onu.edu.ua),  
<https://semst.onu.edu.ua>

*All manuscripts are subject  
to blind peer reviewing*

## The manuscript preparation rules:

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

### *Title Page:*

1. PACS in the top left corner. Several comma-separated codes are allowed. If no classification codes are indicated, the code(s) will be assigned by the Editorial Board.

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

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

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

5. Abstract: up to 2000 characters.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

10. Footnotes should be avoided if possible.

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

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

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

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

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

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

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

Not accepted manuscripts will not be returned.

***TO AUTHORS' ATTENTION***

*The ISSN abbreviation of the journal's title is*

***«Sens. elektron. mikrosist. tehnol.»***

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

*Комп'ютерна верстка – В. Г. Вітвицька*

Підп. до друку 20.04.2026 р. Формат 60×84/8.  
Ум.-друк. арк. 5,58. Наклад 50 пр.  
Зам. № 3090.

**Видавець:**

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова  
вул. Змієнка Всеволода, буд. 2, м. Одеса, 65082, Україна  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 8592 від 23.03.2026 р.  
Тел.: (048) 723 28 39, e-mail: druk@onu.edu.ua

Надруковано з готового оригінал-макета

**Виготовлювач:**

Видавничий дім «Гельветика»  
вул. Інглезі, 6/1, м. Одеса, 65101, Україна  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
ДК № 7623 від 22.06.2022 р  
Тел.: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08  
e-mail: mailbox@helvetica.ua