

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

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

**СЕНСОРНА  
ЕЛЕКТРОНІКА  
І МІКРОСИСТЕМНІ  
ТЕХНОЛОГІЇ  
2023 – Т. 20, № 2**

**SENSOR  
ELECTRONICS  
AND MICROSYSTEM  
TECHNOLOGIES  
2023 – VOL. 20, No. 2**

*Науково-технічний журнал*

*Scientific and Technical Journal*

Заснований 13.11.2003 року  
Виходить 4 рази на рік

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

УДК 681.586

UDC 681.586

Засновник Одеський національний  
університет імені І. І. Мечникова

Founded by Odesa I. I. Mechnykov  
National University

За підтримки Українського фізичного  
товариства

At support of the Ukrainian Physical  
Society

Свідоцтво про державну реєстрацію  
КВ № 8131

Certificate of State Registration  
KB № 8131

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

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

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

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

Видається за рішенням Вченої ради  
Одеського національного університету  
імені І. І. Мечникова  
*Протокол № 9 від 20 червня 2023 р.*

Publishes on the resolution of Odesa  
I. I. Mechnykov National University  
Scientific Council  
*Transaction No. 9, 20.06.2023*

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

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

## Редакційна колегія

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

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

## Editorial Board

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

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

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

## ЗМІСТ CONTENTS

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

*M. V. Strikha*  
SCIENCE, EDUCATION, WAR –  
CHALLENGES OF THE TIME ..... 4

*M. B. Стрїха*  
НАУКА, ОСВІТА, ВІЙНА – ВИКЛИКИ  
ЧАСУ

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

*I. B. Olenych, L. S. Monastyrskii*  
PHOTOSENSITIVE FIELD-EFFECT  
TRANSISTOR BASED ON REDUCED  
GRAPHENE OXIDE FILM..... 10

*І. Б. Оленич, Л. С. Монастирський*  
ФОТОЧУТЛИВИЙ ПОЛЬОВИЙ ТРАН-  
ЗИСТОР НА ОСНОВІ ПЛІВКИ ВІДНОВ-  
ЛЕНОГО ОКСИДУ ГРАФЕНУ

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

*A. S. Topchylo, I. Lysenko*  
OPTICAL PROPERTIES OF COLLOIDAL  
SOLUTIONS OF CARBON DOTS ..... 19

*А. С. Топчило, І. Лисенко*  
ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КОЛОЇДНИХ  
РОЗЧИНІВ ВУГЛЕЦЕВИХ ТОЧОК

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

*Ya. I. Lepikh*  
VHF RADIO PATH WITH  
INTERMEDIATE FREQUENCY FILTER  
AND FREQUENCY DETECTOR ON  
SURFACE ACOUSTIC WAVES ..... 31

*Я. І. Леніх*  
УКХ РАДІОТРАКТ З ФІЛЬТРОМ ПРО-  
МІЖНОЇ ЧАСТОТИ І ЧАСТОТНИМ ДЕ-  
ТЕКТОРОМ НА ПОВЕРХНЕВИХ АКУС-  
ТИЧНИХ ХВИЛЯХ

**Рішення ІХ-ї Української наукової  
конференції з фізики напівпровідників  
(УНКФН-9) ..... 36**  
**IX Ukrainian scientific conference on  
physics of semiconductors (USCPS-9).  
Decision**

**Інформація для авторів. Вимоги до  
оформлення статей у журнал..... 39**

**Information for authors. The requirements  
on papers preparation ..... 42**

# 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

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2023.2.282724>

### НАУКА, ОСВІТА, ВІЙНА – ВИКЛИКИ ЧАСУ

*М. В. Стріха*

Київський національний університет ім. Т. Шевченка  
e-mail: maksym\_strikha@hotmail.com

#### Від редакції

Наш мультидисциплінарний журнал час від часу друкує актуальні науково-технічні результати як огляди доповідей на наукових форумах чи звітних оглядових доповідей, що можуть бути цікавими для авторів і читачів нашого журналу. Таким матеріалом в даному випадку є аналітичний огляд доповідей, зроблених визначними ученими на академічних читаннях присвячених пам'яті визначного ученого фізика професора Стріхи В. І., який люб'язно погодився зробити на пропозицію Редакції журналу професор Стріха М. В.

### НАУКА, ОСВІТА, ВІЙНА – ВИКЛИКИ ЧАСУ

*М. В. Стріха*

**Анотація.** В аналітичному огляді матеріалів XX Академічних читань пам'яті проф. В. І. Стріхи тезово наводяться основні змісти доповідей учасників з питань стану різних галузей сучасної науки, освіти, системи наукометричної оцінки наукового рівня статей і породжених цим проблем, ролі науки і освіти у розв'язанні проблем воєнного стану і подальшого повоєнного відновлення, а також взаємодії науки і суспільства в цілому.

**Ключові слова:** академічні читання, наука і освіта, наукометрія, війна

### SCIENCE, EDUCATION, WAR – CHALLENGES OF THE TIME

*М. V. Strikha*

**Abstract.** The analytical review of the materials of the XX academic readings dedicated to professor V.I. Strikha memory presents the main contents of the reports of the participants on the state of affairs in various fields of modern science, education, the system of scientometric assessment

© М. В. Стріха, 2023

of the scientific level of articles and the problems generated by this, the role of science and education in solving the problems of martial law period and the subsequent post-war recovery, as well as the interaction of science and society as a whole.

**Keywords:** academic readings, science and education, scientometrics, war

8 квітня 2023 р. в конференц-залі Української спілки промисловців і підприємців вже у двадцятий раз відбулися Академічні читання пам'яті засновника й першого президента АН вищої школи України, одного з піонерів вітчизняної напівпровідникової науки професора **Віталія Іларіоновича Стріхи (1931–1999)**. Відкриваючи їх, президент АН ВШ України, відомий учений у галузі системного аналізу і теорії ухвалення рішень **О.Г. Наконечний** нагадав:

*«Перші академічні читання пам'яті В.І. Стріхи відбулися в приміщенні НДІ українознавства 7 квітня 2004 року. З того часу закладена традиція ні на рік не переривалася, а самі читання пам'яті В.І. Стріхи перетворилися на авторитетний науковий форум з унікальним форматом, на якому природничники, «технарі» та гуманітарії мають чудову нагоду почути один одного.*

*Сьогодні Академічні читання пам'яті В.І. Стріхи проходять вже в двадцятий раз.*

*Багато тем, які прозвучать сьогодні, нав'язано війною. Адже вперше ми проводимо читання тоді, коли наш народ веде боротьбу за своє національне виживання проти російської агресії. Хочу насамперед висловити подяку нашим героїчним Збройним Силам України, які дозволили всім нам зібратися в відносно мирному й безпечному тиловому Києві, поруч із яким трохи більш ніж рік тому теж ревіли гармати».*

Академік НАН України, почесний академік АН ВШ України, відомий учений-гідромеханік **В.Т. Грінченко** виголосив доповідь на тему: **Чи все гаразд у сучасній науці?** Учений розпочав її з двох тез: 1. Проблеми сьогоденної науки є не тільки результатом її внутрішнього розвитку, але й наслідком взаємодії науки і суспільства. 2. Аналізуючи проблеми української науки, слід серйозно ставитися до світового досвіту.

Досягнення сучасної науки величезні й незаперечні: завдяки новітнім агротехнологіям планета Земля виявилася здатною прогодува-

ти понад 8 млрд людей, людство поставило собі на службу енергію атому, вийшло в космос, розшифрувало геном людини, у рекордно стислі терміни розробило дієві вакцини проти Covid-19, і цей список можна продовжувати.

І водночас уперше головним стимулом для наукової творчості стала не цікавість дослідника, що прагнув пізнати нове (як це було впродовж століть), а пряме суспільне або державне замовлення. Уперше на цьому наголосив у своїй прощальній промові при залишенні посади президента США 17 січня 1961 р. **Д. Ейзенгавер**: «державний контракт приходить на заміну інтелектуальної зацікавленості». Отже, наука стала об'єктом для продажу, і цей ефект теж намагаються осмислити.

У нещодавно виданій монографії американського дослідника Девіда Льюїса «Science for Sale» («Наука на продаж») констатується: продаж науки є відносно новим явищем, і це явище породжує нові проблеми. Адже наука фактично перейшла від традицій інтелектуального співтовариства до правил бізнесу. Нова система наукометричних стимулів, яка утвердилася в науці в останні три десятиліття, породила масове написання статей, що не мають наукової цінності, і чинить постійний тиск на вченого через гасло «Публікуйся, або загинь!» Жадібність транснаціональних видавництв призвела до того, що одна стаття в «Nature» коштує вже 9,5 тисяч євро.

Паралельно далі існує псевдонаука, що особливо піднімає голову в тоталітарних державах. Так, директор Інституту загальної генетики РАН чл.-кор. РАН Олександр Кудрявцев нещодавно заявив, що «до потопу» люди жили понад 900 років, а як причину скорочення життя назвав «первородний гріх». На цьому тлі РАН ліквідувала наприкінці 2022 р. створену ще в 1998 р. комісію по боротьбі із псевдонаукою.

Але навіть у респектабельній науці без прийменника «псевдо» 75% опублікованих результатів, за оцінкою експертів, ніяк не може бути верифіковано. Процвітають журнали-

«хижаки», де за гроші може бути опубліковано будь-який сумнівний результат. Водночас 70% дослідників визнають, що відчувають тиск рецензентів з метою спонукати їх до цитування зайвих для статті, але потрібних для індексу цитованості рецензента робіт. Ця цифра ставить під сумнів довіру до основи основ сучасної науки – системи незалежного рецензування, яку було запроваджено ще в найпершому в історії науковому журналі «Філософські праці Королівського товариства» (виходить з 1665 р.) Надійно пропрацювавши понад три століття, система не витримала «випробування наукометрії».

На цьому тлі помітним є розхитування моральних критеріїв науковця. За опитуванням, проведеним у США, серед майже 3000 дослідників у сфері медицини та студентів-медиків у віковій групі 65+ про безумовну повагу до клятви Гіппократа заявили 70% опитаних, а в групі до 34 років таких було лише 39%. Все це, на думку доповідача, демонструє, що сучасна наука потерпає від глибоких системних проблем, вихід з яких може бути знайдено лише в діалозі науковців і суспільства.

Президент Української спілки підприємців і промисловців (УСПП), прем'єр-міністр України в 2001–2002 рр. **А. К. Кінах** виголосив доповідь *План відновлення України від наслідків російсько-української війни*. Він розпочав її з того, що на 409 день повномасштабного рашистського вторгнення головною проблемою для майбутнього України залишається збереження її людського потенціалу. Адже після 24 лютого 2022 року за кордон виїхали 7,2 млн українців, 5,1 млн з них отримали статус біженця в країнах ЄС. З урахуванням того, що нараховується ще 6–7 млн внутрішньо переміщених осіб, це означає, що війна вигнала з рідної домівки кожного третього українця.

Для збереження нашого людського ресурсу критичним є фактор часу. Процес асиміляції за кордоном проходить швидко, і вже 700 тисяч українських дітей ходять там до школи. Понад 45% українських біженців у Польщі висловлюють зараз бажання залишитися там принаймні на кілька років навіть після закінчення війни. Тому, на думку доповідача, ми повинні сьогодні боротися за кожне робоче



місце в тилу не менш рішуче, аніж за кожний метр української землі на фронті.

Згідно з Указом Президента створено Національну раду з відновлення України. Ще в липні 2022 року в Лугано було представлено міжнародній спільноті план відновлення вартістю в 750 млрд доларів. Проте цей план має характер «білої книги», в ньому відсутня деталізація і конкретизація. А без неї, як наголосив доповідач, реальних грошей ніхто не дасть.

Тому особливе значення, на думку А. К. Кінаха, має майбутнє засідання РНБО, на якому планується обговорити проблему стійкості національної економіки. Адже сьогодні ця економіка дає в бюджет лише 80 млрд гривень, на той час як витрати на оборону протягом того ж часу становлять 120–130 млрд гривень. Отже, ми зараз виплачуємо зарплатню бюджетникам і проводимо соціальні виплати виключно за рахунок міжнародної допомоги.

Для розробки реалістичного плану відновлення критичне значення, на думку доповідача, має взаємодія з науковцями. Тому УСПП сьогодні підтримує постійний зв'язок

із ученими НАН та АН ВШ України в пошуках правильних, науково обґрунтованих рішень.

Академік НАН України, почесний академік АН ВШ України, визначний учений-астроном і громадський діяч **Я. С. Яцків** виступив із повідомленням *Взаємодія з науковою діаспорою: досвід і потенціал*. Він розповів, як ще в 1990 р., до проголошення незалежності України при АН УРСР з його ініціативи було створено Міжнародний центр з науки і культури для зв'язків з науковою і творчою діаспорою. За понад 30 років діяльності цей Центр здійснив багато важливих ініціатив. Серед них – «Універсал» (зі встановлення меморіальної дошки на фасаді київського Будинку вчителя до 80-річчя Центральної Ради), «Елітарна світлиця», «Славетні імена науки України», «Українські вчені за кордоном: перспективи співпраці й повернення», «Україністика в Віденському університеті» тощо.

Але доповідач наголосив: з перебігом часу наукова діаспора (як і діаспора взагалі) сильно змінилася. Він починав роботу з нащадками тих, хто емігрував після поразки Визвольних змагань, і з тими, хто опинилися на Заході після Другої світової війни. Ці люди були жертвами й ентузіастичні. Нова хвиля діаспори

складається з тих, хто виїхав уже з незалежної України. Вона молода й прагматична. Але з нею теж потрібно системно співпрацювати, особливо в сьогоденних умовах протистояння з російським агресором.

Академік АН ВШ України, генерал-лейтенант, учений-правник **В. А. Тимошенко** презентував своє бачення теми *Новітні війни і збройні конфлікти*. Він наголосив: сьогодні можна виокремити понад 25 різновидів різних гідбридних, кібер- чи проксі-воєн. Новітня зброя поєднується з новітніми технологіями впливу на свідомість та підсвідомість. Як наслідок, новітні конфлікти потребують значно кращого рівня підготовки військовослужбовців. Старий досвід при цьому часто не спрацьовує. Стрімко з'являються нові спеціальності. Досить навести один приклад: донедавна жоден військовий виш України не готував операторів БПЛА, а сьогодні кожному пострілу артилерії має передувати аеророзвідка.

Тому головне для науковців-військовиків питання полягає в тому: як переформатувати військову освіту? Над вирішенням цього завдання учені з наукового відділення національної безпеки АН ВШ України, яке очолює доповідач, працюють разом із фахівцями Генштабу та Міноборони.

Академік АН ВШ України, генерал-лейтенант і засновник спецпідрозділу «Альфа» **В. В. Крутов** виголосив доповідь *Роль науки та освіти у розв'язанні сучасних проблем соціально-психологічної та медичної реабілітації*. Він наголосив: проблема реабілітації (відновлення ментального і фізичного здоров'я) після нашої перемоги стане центральною для всього суспільства. На жаль, традиційні технології реабілітації, які застосовуються зараз, ефективні в кращому разі на 20%. Сьогодні АН ВШ України створила разом з УСПП Міждисциплінарний центр, який повинен опікуватися цими питаннями. Навколо цього центру вже виникає консорціум із залученням установ НАН, НАПН, НАМН, МО, СБУ, бойових структур. Триває робота над інноваційною стратегією соціально-психологічної та медичної реабілітації. Ця стратегія розглядатиме кожного пацієнта (який досі сприймався виключно як об'єкт зовніш-



ньої дії) активним суб'єктом, відповідальним за відновлення власного здоров'я. Для цього пацієнт повинен здобути необхідні знання про власні можливості в ході такого відновлення.

Доктор історичних наук **С. А. Леп'явко**, відомий фахівець із історії Сіверщини доби Речі Посполитої та Гетьманщини, цього разу розповів про *оборону Чернігова в лютому-березні 2022 року*, активним бойовим учасником якої довелося бути йому самому. Ще об 11 вечора 23 лютого, за декілька годин до початку повномасштабного вторгнення, було створено Штаб оборони Чернігова. В його розпорядженні спершу було... 200 бійців.

Масована роздача всіма силовими структурами зброї добровольцям призвела до того, що надвечір 24 лютого цих бійців стало вже 1000, а через тиждень – 7000. Ці бійці були надзвичайно патріотичними й мотивованими (наприклад, один з добровольців добирався до Чернігова 100 км на велосипеді з Семенівки через російські блок-пости). При цьому 70–80% роботи з забезпечення оборони й точної життєдіяльності міста здійснювали волонтери. Протягом усіх 37 днів оборони всі захисники міста були одягнуті й нагодовані. Проблемою була лише нестача зброї (захисники обложеного Чернігова заздрили киянам, де, за поширеною кимось легендою, кожний начебто мав персонального «джавеліна»), і брак офіцерських кадрів.

Доповідач наголосив: військове значення того, що Чернігів вистояв, було надзвичайно високим. В іншому разі 20–30 тисяч озброєних рашистів могли б долучитися до удару на Київ, піти на Черкаси й Полтаву. Але героїзм оборонців Чернігова зірвав плани російського бліцкригу на Лівобережжі.

Академік АН ВШ України, відомий учений-агротехнолог **В. П. Лисенко** розповів у доповіді про *смарт-технології для автоматизації складних біотехнічних об'єктів (БТ)*. Такі БТ (птахофабрики, тепличні комбінати, елеватори тощо) працюють в умовах невизначеності (неможливо точно передбачити погоду чи рівень інсоляції). Від 20% (птахофабрики) до 80% (квіткарські господарства) собівартості продукції БТ складає електроенергія. Тож метою є створення такої системи

автоматизації, яка б знизила вартість енергетичної складової.

На допомогу фахівцям Національного університету біоресурсів і природокористування прийшли теорія збурень, теорія ухвалення рішень, технології нейронних мереж. Використовуючи їх, вони навчилися моделювати природні невизначеності й ухвалювати необхідні управлінські рішення. А відтак їхня розробка має велике значення для аграрного сектору України.

Академік АН ВШ України, відомий учений-історик та археограф **Г. В. Папакін** зробив доповідь на тему *Актуальні проблеми сучасної археографії і джерелознавства*. Він наголосив: джерелознавство є основою для всієї соціогуманітаристики. Сьогодні тут дедалі більше відходять від вивчення джерела в рамках тільки однієї науки. Наприклад, аргументом на користь автентичності «Слова про Ігорів похід» є не тільки історичний чи лінгвістичний, а й природознавчий аналіз пам'ятки (встановлення відповідності згаданих у ній представників фауни і флори реальній ситуації кінця XII століття).

Сьогодні в планах загарбників – або повна руйнація всіх наших пам'яток, або присвоєння їх собі. Тому особливого значення набуває завдання промаркувати всю нашу спадщину як українську. Тоді сам собою розвалиться міф про «тисячолітню росію». Доповідач коротко окреслив план такої «археографічної мобілізації» – від ретельного оприлюднення й опрацювання всіх наших джерел 14–16 століть і до актуалізації праць наших учених-класиків 19 століття, які сьогодні незаслужено призабуто. Окремим важливим завданням є формування джерельної бази для майбутніх дослідників російсько-української війни.

Академік АН ВШ України, відомий учений-іспаніст **О. В. Пронкевич** представив у доповіді розроблену ним разом із колегами з Українського католицького університету (м. Львів) *мждисциплінарну магістерська програму «Майбутнє спадщини» – як спробу відповіді гуманітаріїв на виклики часу*. Повномасштабне російське вторгнення в Україну різко підвищило суспільне значення вітчизняної гуманітаристики. Адже вона не лише



деконструює хижачькі людиноненависницькі міфи держави-агресора, але й формулює новий український порядок денний для всього світу. На жаль, наявні сьогодні освітянські наукові програми затиснуті здебільшого у вузьких рамках певної конкретної спеціальності, на той час як доба ставить потребу підготовки фахівців-гуманітаріїв широкого профілю.

Презентована нова магістерська програма пропонує свої відповіді на ці виклики. Вона ставить у центр уваги поширення образу України у світі, сприяє створенню нової освітянської філософії на засадах інтердисциплінарності та подолання кризи гуманітаристики. Важливо, що програма покликана формувати нового гуманітарія широкого профілю, що володіє базовими науковими та практичними компетенціями. У програмі зникає ідея вузької спеціалізації, вона вчить мислити і діяти, базуючись на парадигмальному синтезі.

Оскільки читання стали двадцятими і ювілейними, академік АН ВШ України фізик **М. В. Стріха** зробив меморіальну доповідь пам'яті свого батька В. І. Стріхи ***Від теорії контакту метал-напівпровідник із зазором – до створення тунельного сканувального мікроскопу.*** Він нагадав: базовий елемент сучасної електроніки – *p-n*-перехід, здатний пропускати струм в одному напрямку і не пропускати в другому, – відкрив у Києві на початку 1941 р. дослідженнями методом термозонду на кристалах закису міді **В. Є. Лашкарьов**, який незадовго перед тим повернувся з північного заслання.

На основі двох *p-n*-переходів через 10 років було створено перший біполярний транзистор, який не лише приніс трьом американцям – Джону Бардіну, Вільяму Шоклі та Волтеру Браттейну – Нобелівську премію 1956 року, але й без перебільшення змінив життя людства, давши старт стрімкому розвитку електроніки.

Недоліком *p-n*-переходу залишалася, однак, нездатність працювати на високих частотах. Тому після закінчення в 1955 році радіофізичного факультету Київського університету В. І. Стріха почав працювати під керівництвом В. Є. Лашкарьова над вивченням значно більш високочастотних діодів на основі контакту метал-напівпровідник. У 1960-ті молодий

український фізик уперше в світі побудував теорію роботи таких пристроїв з урахуванням тунельного (забороненого в класичній фізиці) струму через вакуумний зазор, який неминуче залишається між металом і напівпровідником.

Ця його робота (вперше надрукована у «Віснику КДУ» в 1967 р. і пердруквана в англomовному спецвипуску «Українського фізичного журналу» за 2008 р. серед 35 кращих робіт українських фізиків за всі роки) мала революційне значення для розвитку НВЧ електроніки. За неї молодий доктор наук В. І. Стріха став у 1970 р. одним з перших лавреатів щойно заснованої Державної премії України в галузі науки і техніки.

А в 1981 р. Герд Бінніг та Генріх Рорер створили в швейцарській філії ІВМ тунельний сканувальний мікроскоп (ТСМ), який уможливив подальший стрімкий розвиток нанотехнологій на межі двох тисячоліть. В його основі – тунельний струм між металевим вістряем і провідною поверхнею, формулу для якого вперше отримав В. І. Стріха. Творці ТСМ заслужено отримали Нобелівську премію з фізики 1986 року.

Ще через чотири роки В. І. Стріха ініціював створення АН вищої школи України – структури, побудованої, як він вірив, на справедливіших наукових принципах. Її президентом він лишився до останніх днів свого життя.

У загальній дискусії, що розпочалася після доповідей, академік АН ВШ України, відома учена-лінгвістка **О. П. Воробйова** (яка перебувала в конференц-залі УСПП) та академік АН ВШ України, відомий учений у царині педагогіки та психології **І. М. Хом'як** (який у числі ще кількох десятків учасників брав участь у читаннях дистанційно, зі стін Острозької академії), наголосили: міждисциплінарні читання пам'яті В. І. Стріхи вкотре підтвердили свою важливість і потрібність як унікальний майданчик для спілкування академічної спільноти. А президент АН ВШ України **О. Г. Наконечний** у заключному слові висловив упевненість, що наступні ХХІ читання відбудуться через рік уже після нашої перемоги.

Стаття надійшла до редакції 09.06.2023 р.

# ОПТИЧНІ, ОПТОЕЛЕКТРОННІ І РАДІАЦІЙНІ СЕНСОРИ

---

## OPTICAL AND OPTOELECTRONIC AND RADIATION SENSORS

---

---

PACS73.50.Pz, 73.63.-b; УДК 537.312, 535.215, 621.382

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2023.2.278625>

### ФОТОЧУТЛИВИЙ ПОЛЬОВИЙ ТРАНЗИСТОР НА ОСНОВІ ПЛІВКИ ВІДНОВЛЕНОГО ОКСИДУ ГРАФЕНУ

*І. Б. Оленич, Л. С. Монастирський*

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

### ФОТОЧУТЛИВИЙ ПОЛЬОВИЙ ТРАНЗИСТОР НА ОСНОВІ ПЛІВКИ ВІДНОВЛЕНОГО ОКСИДУ ГРАФЕНУ

*І. Б. Оленич, Л. С. Монастирський*

**Анотація.** Створено фоточутливий графеновий польовий транзистор шляхом нанесення плівки відновленого оксиду графену (rGO) на поверхню шару  $\text{SiO}_2$  на кремнієвій підкладці, яка слугує одночасно фоточутливим середовищем і затвором польового транзистора. Електричні та фотоелектричні властивості польового транзистора на основі плівки rGO досліджено в режимах постійного та змінного струму. На основі аналізу комутаційних характеристик одержаного польового транзистора виявлено лінійні ділянки залежності струму стоку від напруги затвору і суттєву залежність електронної складової провідності плівки rGO від опромінення білим світлом. Виявлено фотоіндуковане зменшення внутрішнього опору та збільшення ємності провідного каналу графенового польового транзистора у діапазоні  $10^2$ – $10^5$  Гц. Встановлено, що час фотовідгуку одержаного польового транзистора на світлові імпульси ІЧ, видимого та УФ випромінювання становить близько 1,5 нс. Отримані результати можуть бути використані для спрощення технології виготовлення фотодетекторів на основі графену.

**Ключові слова:** відновлений оксид графену, польовий транзистор, фоточутливість, комутаційна характеристика, імпеданс

## PHOTOSENSITIVE FIELD-EFFECT TRANSISTOR BASED ON REDUCED GRAPHENE OXIDE FILM

*I. B. Olenych, L. S. Monastyrskii*

**Abstract.** A photosensitive graphene field-effect transistor was created by depositing a reduced graphene oxide (rGO) film on the surface of the SiO<sub>2</sub> layer on a silicon substrate, which serves as both a photosensitive medium and the field-effect transistor gate. The electrical and photoelectric properties of the field-effect transistor based on the rGO film were studied in DC and AC modes. Linear sections of the drain current on the gate voltage dependence and significant dependence of the electronic component of the rGO film conductivity on the irradiation with white light were revealed based on the analysis of the switching characteristics of the obtained field-effect transistor. A photoinduced decrease in the internal resistance and an increase in the capacitance of the conducting channel of the graphene field-effect transistor in the range of 10<sup>2</sup>–10<sup>5</sup> Hz were revealed. It has been established that the photoresponse time of the obtained field-effect transistor to light pulses of IR, visible, and UV radiation is about 1.5 ms. The obtained results can be used to simplify the technology of manufacturing photodetectors based on graphene.

**Keywords:** reduced graphene oxide, field-effect transistor, photosensitivity, switching characteristic, impedance

### Вступ

Графен розглядають як надзвичайно перспективний матеріал для різних сфер практичного застосування. Унікальні властивості графену як безщілинного напівпровідника зумовлені кінчною формою електронного спектру гексагональної структури моношару sp<sup>2</sup>-зв'язаних атомів вуглецю [1, 2]. Висока електропровідність двовимірною (2D) графену та висока рухливість носіїв заряду є вагомими перевагами для створення високошвидкісних електронних пристроїв [3–5]. Крім того, положенням рівня Фермі й, як наслідок, біполярною провідністю графену можна легко керувати зовнішнім електричним полем [6]. Така властивість графену дає змогу інжектувати у 2D матеріал носії як позитивного, так і негативного заряду та може бути використана для створення нового типу польових транзисторів, які використовують моношар графену як матеріал провідного каналу [7, 8].

Ще однією перевагою графену є здатність витримувати значну густину струму, що разом з омичним контактом з металами та високою теплопровідністю розширює перспективу використання графенових польових транзисторів у потужних електричних схемах [9, 10].

Крім того, графен може бути використаний як прозорий електрод у фотоелектронних пристроях завдяки лише 2,3% поглинанню світла моношаром вуглецю [11–13]. Проте, висока прозорість графену і висока швидкість рекомбінації фотогенерованих носіїв заряду зумовлює слабкий відгук фотодетекторів на основі графену. Однією з основних стратегій покращення їх фоточутливості є гібридизація: поєднання фоточутливого матеріалу для генерації носіїв заряду та графену, як зарядочутливого елемента [14, 15]. Зокрема, як фоточутливий шар може бути використана кремнієва підкладка графенового польового транзистора. У свою чергу, локальне електричне поле фотогенерованих у підкладці носіїв зумовлює зміну електропровідності графенового каналу.

Одним із перспективних і недорогих методів виготовлення графенових наноаркушів є окиснення та хімічне відшарування графіту для одержання наночастинок оксиду графену з подальшим їх відновленням [16]. Відновлений оксид графену (rGO) зазвичай отримують за допомогою хімічних реакцій з використанням гідразину, тетрагідроборату натрію або інших відновників [17, 18]. Використання плівки, утвореної наноаркушами rGO, замість

моношару графену в польових транзисторах може спростити технологію виготовлення фотоприймачів на основі 2D вуглецевих матеріалів. Тому мета роботи полягала у вивченні особливостей застосування плівки rGO у фоточутливих графенових польових транзисторах. У роботі створено графеновий польовий транзистор шляхом осадження плівки rGO на поверхню шару оксиду кремнію на кремнієвій підкладці та досліджено його електричні та фотоелектричні властивості в режимах постійного та змінного струму.

### Експеримент

Як підкладку для графенового польового транзистора було використано поліровану пластину монокристалічного кремнію кристаліграфічної орієнтації [100] і товщиною 400 мкм. Діелектричний шар на поверхні кремнієвої підкладки одержано випаровуванням дрібнодисперсного порошку кремнію за допомогою вакуумної системи ВУП-5М із залишковим тиском повітря  $\sim 10^{-3}$  мм. рт. ст. та подальшим осадженням на підготовлену підкладку нестехіометричного  $\text{SiO}_x$  ( $x < 2$ ), який утворювався в результаті реакції парів кремнію із залишковим киснем. Виміряна за допомогою мікроінтерферометра МП-4 товщина шару  $\text{SiO}_x$  становила близько 100 нм. Термічна обробка в атмосфері повітря при температурі 1050 °C упродовж 2 годин забезпечила утворення шару діоксиду кремнію, який слугував підзатворним діелектриком у графеновому польовому транзисторі.

Для одержання наночастин rGO використано водну суспензію оксиду графену виробництва Sigma-Aldrich (США) з концентрацією основної речовини 2 мг/мл. Наночастинки оксиду графену відновлювали моногідратом гідразину під дією ультразвукової обробки упродовж 20 хв. Для запобігання агрегації одержаних наночастин rGO до суспензії був доданий 0,2 М розчин додецилбензолсульфонату натрію. Плівка rGO була одержана в результаті нанесення плівкоутворювальної суспензії rGO на поверхню шару  $\text{SiO}_2$  і по-

дальшого висушування на повітрі за кімнатної температури. Такий підхід забезпечує високий ступінь відновлення оксиду графену та формування плівки rGO товщиною до декількох десятків нанометрів [19, 20]. Утворена плівка слугувала електропровідним каналом фоточутливого польового транзистора. Електроди витіку та стоку були сформовані на поверхні плівки rGO термовакuumним осадженням срібних контактів на відстані 1 мм один від одного. Як затвор польового транзистора використовували кремнієву підкладку. Одержаний польовий транзистор на основі плівки rGO зображений на рис. 1.

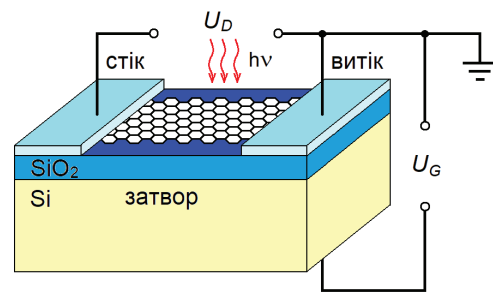


Рис. 1. Схематичне зображення фоточутливого польового транзистора на основі плівки rGO.

Електричні властивості польового транзистора на основі плівки rGO були досліджені в режимах постійного та змінного струму за допомогою прецизійного мультиметра Siglent SDM 3055 та RLC вимірювача Nantek 1833C. Залежність опору плівки rGO від напруги затвору  $U_G$  була досліджена на частоті 1 кГц. Фотоелектричні явища були досліджені за умови опромінення польового транзистора зі сторони плівки rGO випромінюванням світлодіода білого світла FYLP-1W-UWB-A з потужністю 1 Вт і світловим потоком 76 люмен. Дослідження кінетики фотовідгуку на різних довжинах хвиль проводились за допомогою генератора прямокутних імпульсів, світлодіодів FYL-5013UVC ( $\lambda=390$  нм), FYL-5013UGC ( $\lambda=570$  нм), L-53F3C ( $\lambda=940$  нм) та осцилографа Siglent SDS1104X-E. Усі вимірювання проводились за кімнатної температури.

## Результати та їх обговорення

Важливим параметром польових транзисторів є характеристика перемикання, а саме співвідношення струму в увімкненому стані до струму у вимкненому стані ( $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$ ). Слід зазначити, що проблемним місцем графенових польових транзисторів на етапі застосування у промислових масштабах є саме характеристика перемикання, яка обмежує їх використання в схемах цифрової обробки інформації. Цей недолік зумовлений нульовою шириною забороненої зони графену і може бути усунутий шляхом застосування нанострічки графену як провідного каналу польового транзистора [8, 21]. Завдяки латеральному квантовому обмеженню відкривається енергетичний розрив у електронній структурі графенової нанострічки як квазіодновимірної системи. Крім того, невелика заборонена зона була виявлена у двошаровому графені, що відкриває перспективу розробки польових транзисторів на такому матеріалі [22, 23]. Залежність струму стоку  $I_D$  від напруги між затвором і витоком  $U_G$  запропонованого польового транзистора на основі плівки rGO зображена на рис. 2.

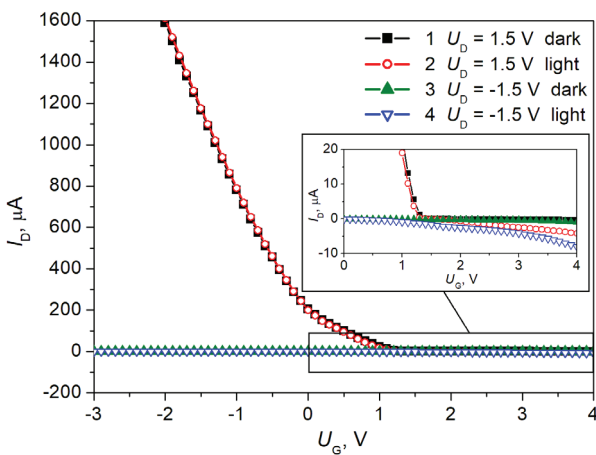


Рис. 2. Залежність струму стоку  $I_D$  від напруги затвору  $U_G$  польового транзистора на основі плівки rGO у темноті (1, 3) та за умови опромінення світлодіодом FYLP-1W-UWB-A (2, 4).

Виміряні залежності  $I_D-U_G$  характеризуються лінійними ділянками, положення яких залежить від знака напруги зміщення  $U_D$ . За допомогою напруги затвору можна керувати

провідністю каналу польового транзистора на основі плівки rGO, змінюючи її більш ніж на два порядки. Крім того, більший діапазон зміни струму стоку  $I_D$  від напруги затвору  $U_G$  спостерігався у випадку додатної напруги зміщення  $U_D$ . Аналіз залежностей  $I_D-U_G$  не виявив яскраво вираженої точки нейтральності заряду (точки Дірака), тобто мінімуму провідності графену у разі, коли рівень Фермі проходить через точку контакту зони провідності та валентної зони. Подібний характер залежності опору плівки rGO від напруги затвору  $U_G$  спостерігався також у режимі змінного струму на частоті 1 кГц, як це можна побачити на рис. 3. Після досягнення максимуму в околі  $U_G = 1,1$  В опір провідного каналу польового транзистора на основі плівки rGO майже не змінювався зі збільшенням напруги затвору.

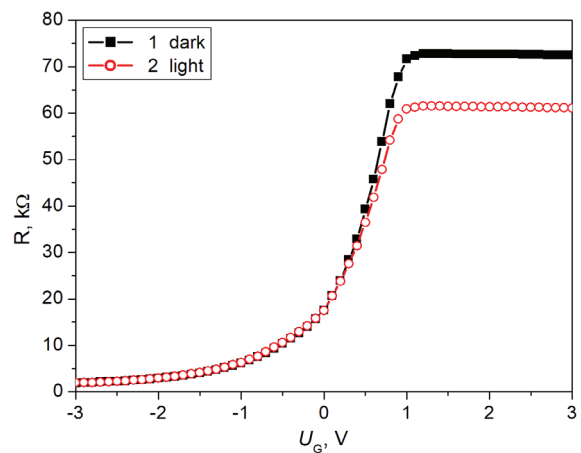


Рис. 3. Залежність опору плівки rGO від напруги затвору  $U_G$  на частоті 1 кГц у темноті (1) та за умови опромінення світлодіодом FYLP-1W-UWB-A (2).

Виявлені особливості електричних властивостей польового транзистора на основі rGO можуть бути зумовлені як неоднорідністю плівки, утвореної наноаркушами rGO, так і недосконалістю шару підзатворного діелектрика. Адже важливий вплив на рухливості носіїв у графеновому каналі мають локалізовані стани у діелектричній підкладці та на інтерфейсі графен/діелектрик [24, 25]. Зокрема, електрично-активні дефекти в шарі  $\text{SiO}_2$  на кремнієвій підкладці можуть заряджатися та розряджатися через графеновий канал, бути

центрами розсіювання носіїв заряду, а значить можуть по різному впливати на перенесення електронів та дірок. Додатковим підтвердженням цієї гіпотези може бути подібний характер залежності струму стоку від напруги затвору польових транзисторів на основі сандвіч-структури rGO – поруватий кремній – кремнієва підкладка [26]. Як наслідок, положення точки нейтральності заряду, а також та нахил лівої (діркової) та правої (електронної) гілок профілю електропровідності графенового каналу польового транзистора визначається впливом локального електричного поля на мобільність і концентрацію вільних носіїв заряду відповідного знаку [27].

Опромінення польового транзистора на основі плівки rGO білим світлом спричинило збільшення струму стоку  $I_D$  більше як у два рази при напрузі затвору  $U_G$  понад 1 В незалежно від полярності напруги між витоком і стоком  $U_D$  (див. рис. 2). На залежності опору провідного каналу польового транзистора від напруги затвору  $U_G$  спостерігалось збільшення електронної складової провідності плівки rGO під впливом випромінювання світлодіода FYLP-1W-UWB-A (див. рис. 3). Виявлені зміни опору плівки rGO ймовірно зумовлені локальним електричним полем носіїв заряду, фотогенерованих у кремнієвій підкладці та накопичених біля діелектричного шару завдяки прикладеній напрузі затвору. Крім того, на

провідність каналу польового транзистора можуть впливати електричні заряди, локалізовані у структурно недосконалому шарі  $\text{SiO}_2$ .

Особливості процесів перенесення зарядів у плівці rGO також було досліджено методом імпедансної спектроскопії. Частотні залежності електричного опору та ємності провідного каналу польового транзистора у разі проходження струму між контактами витоку та стоку показано на рис. 4.

Було виявлено зменшення внутрішнього опору та ємності польового транзистора на основі плівки rGO зі збільшенням частоти у діапазоні  $10^2$ – $10^5$  Гц. Під впливом опромінення білим світлом світлодіода FYLP-1W-UWB-A з потоком 76 люмен спостерігалось зменшення опору та збільшення ємності досліджуваної структури. Варто зазначити, що опромінення здійснювало більший вплив на електричні параметри провідного каналу графенового польового транзистора у низькочастотному діапазоні.

Для одержання додаткової інформації про фотоелектричні властивості польового транзистора на основі плівки rGO було досліджено часові параметри фотовідгуку на імпульсне електромагнітне випромінювання у широкому діапазоні спектру. Зокрема, на рис. 5 зображено результати досліджень кінетики фотовідгуку на П-подібні імпульси зеленого світла з довжиною хвилі  $\lambda=570$  нм і тривалістю 5 мс, а також

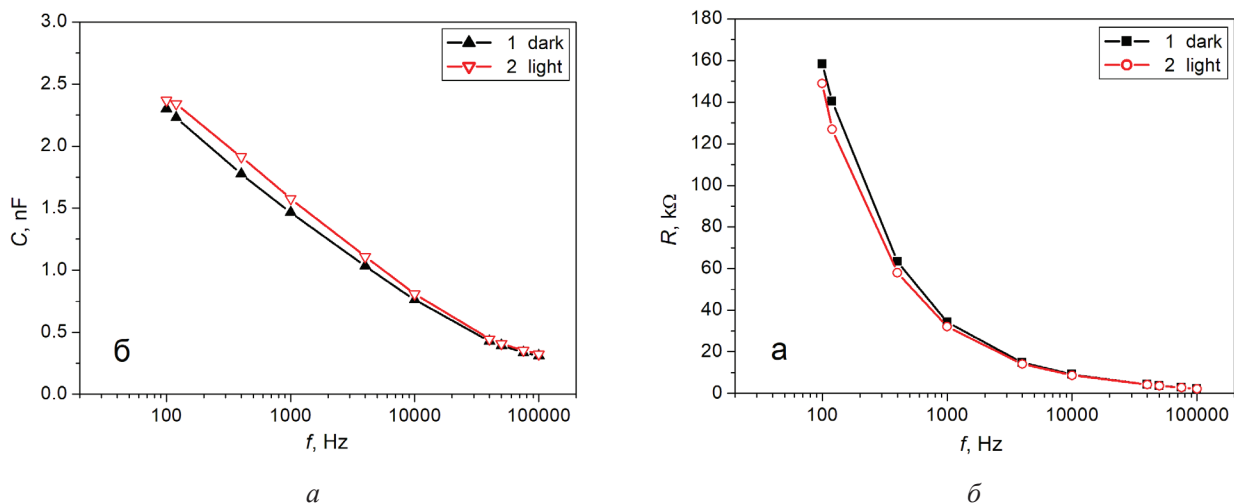


Рис. 4. Частотні залежності внутрішнього опору (а) та ємності (б) провідного каналу польового транзистора на основі плівки rGO у темноті (1) та за умови опромінення світлодіодом FYLP-1W-UWB-A (2).

ІЧ та УФ випромінювання з довжинами хвиль  $\lambda=940$  нм і  $\lambda=390$  нм, відповідно.

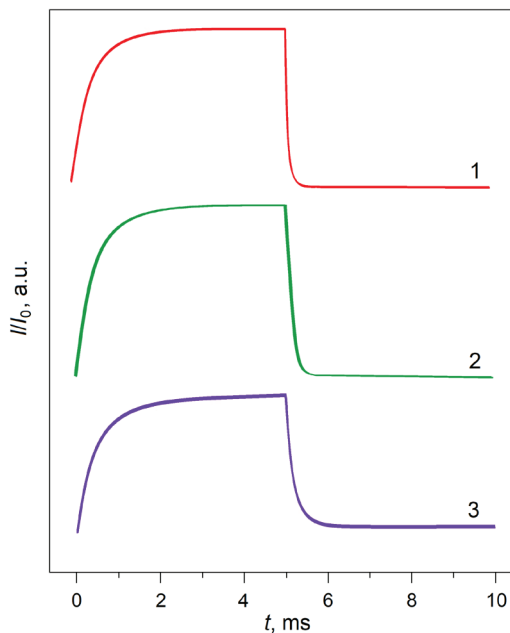


Рис. 5. Кінетика фотовідгуку польового транзистора на основі плівки rGO на П-подібні імпульси світла з довжиною хвилі  $\lambda=940$  нм (1),  $\lambda=570$  нм (2),  $\lambda=390$  нм (3).

Спостерігалися приблизно однакові часи наростання (близько 1,5 мс) і загасання фотосигналу, що свідчить про подібність генераційно-рекомбінаційних та релаксаційних процесів, які відбуваються в експериментальній структурі під впливом збуджуючого світла з різною довжиною хвилі. Різна величина фотовідгуку (відношення фотоструму до струму польового транзистора на основі плівки rGO у темноті) може бути пов'язана з спектральною залежністю фоточутливості кремнієвої підкладки та різною інтенсивністю випромінювання світлодіодів різної довжини хвилі, які використовувались для фотогенерації носіїв заряду.

### Висновки

У роботі запропоновано нові технічні рішення, пов'язані із створенням фоточутливих графенових польових транзисторів. Як провідний канал використано плівку rGO, осаджену на поверхню шару SiO<sub>2</sub> на кремнієвій підкладці, яка одночасно слугує фоточутливим середовищем і затвором польового транзистора. Плів-

ку rGO одержано висушуванням плівкоутворювальної суспензії відновлених моногідратом гідразину наночастинок оксиду графену.

Встановлено, що залежності струму стоку  $I_D$  від напруги затвору  $U_G$  характеризуються лінійними ділянками, положення яких залежить від знака напруги зміщення  $U_D$ . Комутаційні характеристики одержаного польового транзистора на основі плівки rGO демонструють відношення  $I_{on}/I_{off}$  понад два порядки і суттєву залежність від опромінення білим світлом. Крім того, в режимі змінного струму під впливом локального поля фотоіндукованих зарядів виявлено зменшення опору польового транзистора для електронної гілки профілю біполярної провідності плівки rGO. Опромінення поверхні польового транзистора на основі плівки rGO білим світлом зумовлює зменшення його опору і збільшення ємності в діапазоні  $10^2$ – $10^5$  Гц. Час фотовідгуку одержаного польового транзистора на світлові імпульси ІЧ, видимого та УФ випромінювання становить близько 1,5 мс.

### Список використаної літератури

- [1]. K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, M. I. Katsnelson, I. V. Grigorieva, S. V. Dubonos, A. A. Firsov. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene // *Nature*, 438, pp. 197–200 (2005).
- [2]. T. Chakraborty. Graphene: a nanoscale quantum playing field // *Physics in Canada*, 63, pp. 351–354 (2006).
- [3]. K. I. Bolotin, K. J. Sikes, Z. Jiang, M. Klima, G. Fudenberg, J. Hone, P. Kim, H. L. Stormer. Ultrahigh electron mobility in suspended graphene // *Solid State Commun.*, 146, 351 (2008).
- [4]. Y. Zhang, Y. -W. Tan, H. L. Stormer, P. Kim. Experimental observation of quantum Hall effect and berry's phase in graphene // *Nature*, 438, pp. 201–204 (2005).
- [5]. J. -S. Moon. Graphene Field-effect transistor for radio-frequency applications: review // *Carbon Letters*, 13, pp. 17–22 (2012).
- [6]. K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos,

- I. V. Grigorieva, A. A. Firsov. Electric field effect in atomically thin carbon films // *Science*, 306, pp. 666–669 (2004).
- [7]. B. Hähnlein, B. Händel, J. Pezoldt, H. Töpfer, R. Granzner, F. Schwier. Side-gate graphene field-effect transistors with high transconductance // *Appl. Phys. Lett.*, 101, 093504 (2012).
- [8]. S. Lone, A. Bhardwaj, A. K. Pandit, S. Gupta, S. Mahajan. A Review of Graphene Nanoribbon Field-Effect Transistor Structures // *J. Electron. Mater.*, 50, pp. 3169–3186 (2021).
- [9]. F. Xia, V. Perebeinos, Y. -M. Lin, Y. Wu, P. Avouris. The origins and limits of metal-graphene junction resistance // *Nature Nanotech.*, 6, pp. 179–184 (2011).
- [10]. K. M. F. Shahil, A. A. Balandin. Thermal properties of graphene and multilayer graphene: Applications in thermal interface materials // *Solid State Commun.*, 152, 1331–1340 (2012).
- [11]. K. S. Kim, Y. Zhao, H. Jang, S. Y. Lee, J. M. Kim, K. S. Kim, J. -H. Ahn, P. Kim, J. -Y. Choi, B. H. Hong. Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes // *Nature*, 457, pp. 706–710 (2009).
- [12]. D. H. Shin, C. W. Lee, J. S. Lee, J. H. Kim, S. Kim, S. -H. Choi. Enhancement of the effectiveness of graphene as a transparent conductive electrode by AgNO<sub>3</sub> doping // *Nanotech.*, 25, 125701 (2014).
- [13]. P. Avouris. Graphene: Electronic and Photonic Properties and Devices // *Nano Letters*, 10, pp. 4285–4294 (2010).
- [14]. K. Roy, M. Padmanabhan, S. Goswami, T. P. Sai, G. Ramalingam, S. Raghavan, A. Ghosh. Graphene–MoS<sub>2</sub> hybrid structures for multifunctional photoresponsive memory devices // *Nature Nanotech.*, 8, pp. 826–830 (2013).
- [15]. T. Palanisamy, S. Mitra, N. Batra, J. Smajic, A. -H. Emwas, I. Roqan, P. M. F. J. Costa. Carbon Nitride Thin Film-Sensitized Graphene Field-Effect Transistor: A Visible-Blind Ultraviolet Photodetector // *Advanced Materials Interfaces*, 9, 2200313 (2022).
- [16]. S. Stankovich, D. A. Dikin, R. D. Piner, K. A. Kohlhaas, A. Kleinhammes, Y. Jia, Y. Wu, S. T. Nguyen, R. S. Ruoff. Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide // *Carbon*, 45, pp. 1558–1565 (2007).
- [17]. C. K. Chua, M. Pumera. The reduction of graphene oxide with hydrazine: elucidating its reductive capability based on a reaction-model approach // *Chem. Commun.*, 52, pp. 72–75 (2016).
- [18]. D. Li, M. B. Müller, S. Gilje, R. B. Kaner, G. G. Wallace. Processable aqueous dispersions of graphene nanosheets // *Nat. Nanotechnol.*, 3, pp. 101–105 (2008).
- [19]. I. B. Olenych, O. I. Aksimentyeva, L. S. Monastyrskii, Yu. Yu. Horbenko, M. V. Partyka. Electrical and Photoelectrical Properties of Reduced Graphene Oxide – Porous Silicon Nanostructures // *Nanoscale Res. Lett.*, 12, 272 (2017).
- [20]. I. B. Olenych, L. S. Monastyrskii, O. I. Aksimentyeva, L. Orovcík, M. Y. Salamakha. Charge Transport in Porous Silicon/Graphene-Based Nanostructures // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 673, pp. 32–38 (2018).
- [21]. M. Y. Han, B. Ozyilmaz, Y. Zhang, P. Kim. Energy Band-Gap Engineering of Graphene Nanoribbons // *Phys. Rev. Lett.*, 98, 206805 (2007).
- [22]. T. Ohta, A. Bostwick, T. Seyller, K. Horn, E. Rotenberg. Controlling the Electronic Structure of Bilayer Graphene // *Science*, 313, pp. 951–954 (2006).
- [23]. E. McCann, D. S. L. Abergel, V. I. Fal’ko. The low energy electronic band structure of bilayer graphene // *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, 148, pp. 91–103 (2007).
- [24]. K. Nagashio, T. Yamashita, T. Nishimura, K. Kita, A. Toriumi. Electrical transport properties of graphene on SiO<sub>2</sub> with specific surface structures // *J. Appl. Phys.*, 110, 024513 (2011).
- [25]. 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).
- [26]. I. B. Olenych, Ya. V. Boyko. Field-effect transistor based on graphene–porous silicon hybrid structure // *Journal of Physical Studies*, 27, 1701 (2023).
- [27]. 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).

Стаття надійшла до редакції 08.05.2023 р.



PACS73.50.Pz, 73.63.-b; UDC537.312, 535.215, 621.382

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2023.2.278625>

## PHOTOSENSITIVE FIELD-EFFECT TRANSISTOR BASED ON REDUCED GRAPHENE OXIDE FILM

*I. B. Olenych, L. S. Monastyrskii*

Ivan Franko National University of Lviv  
50, Dragomanov Str., 79005 Lviv, Ukraine

E-mail: [igor.olenych@lnu.edu.ua](mailto:igor.olenych@lnu.edu.ua), [lyubomyr.monastyrskyy@lnu.edu.ua](mailto:lyubomyr.monastyrskyy@lnu.edu.ua)

### Summary

Graphene-based field-effect transistors are considered a potential alternative to metal-oxide-semiconductor transistors and may become a new elemental base of electronics in the post-silicon epoch. Increasing the functionality of graphene field-effect transistors and simplifying their production techniques are important areas of scientific research. The paper proposes new technical solutions related to the creation of photosensitive graphene-based field-effect transistors. A film of reduced graphene oxide (rGO) was used as the conducting channel of the field-effect transistor. The film-forming suspension of rGO nanosheets was deposited to the surface of the SiO<sub>2</sub> layer on a silicon substrate and dried in air at room temperature. The silicon substrate was used as a photosensitive medium and gate of the field-effect transistor.

The electrical and photoelectric properties of the field-effect transistor based on the rGO film were studied in both DC and AC modes. Linear sections of the drain current on the gate voltage dependence, the position of which depends on the bias voltage sign, were found based on the analysis of the switching characteristics of the proposed field-effect transistor. The switching characteristics demonstrate the  $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$  ratio of more than two orders of magnitude and significant dependence of the rGO film conductivity on white light irradiation. A decrease in the resistance of the field-effect transistor under the influence of the local field of photogenerated charge carriers was found for the electronic branch of the ambipolar conductivity profile of the rGO film. Besides, irradiation of the surface of the field-effect transistor based on the rGO film causes a decrease in its resistance and an increase in capacitance in the 10<sup>2</sup>–10<sup>5</sup> Hz frequency range. It has been established that the photoresponse time of the obtained field-effect transistor to light pulses of IR, visible, and UV radiation is about 1.5 ms. The obtained results can be used to simplify the technology of manufacturing photodetectors based on graphene.

**Keywords:** reduced graphene oxide, field-effect transistor, photosensitivity, switching characteristic, impedance

PACS73.50.Pz, 73.63.-b; УДК 537.312, 535.215, 621.382  
DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2023.2.278625>

## ФОТОЧУТЛИВИЙ ПОЛЬОВИЙ ТРАНЗИСТОР НА ОСНОВІ ПЛІВКИ ВІДНОВЛЕНОГО ОКСИДУ ГРАФЕНУ

*І. Б. Оленич, Л. С. Монастирський*

Львівський національний університет імені Івана Франка  
вул. Драгоманова, 50, 79005 м. Львів, Україна  
E-mail: [igor olenych@lnu.edu.ua](mailto:igor olenych@lnu.edu.ua), [lyubomyr.monastyrskyu@lnu.edu.ua](mailto:lyubomyr.monastyrskyu@lnu.edu.ua)

### Реферат

Польові транзистори на основі графену розглядаються як потенційна альтернатива транзисторам метал-оксид-напівпровідник і можуть стати новою елементною базою електроніки у посткремнієву епоху. Підвищення функціональності графенових польових транзисторів і спрощення технології їх виробництва є важливими напрямками наукових досліджень. У роботі запропоновано нові технічні рішення, пов'язані з розробкою фоточутливих польових транзисторів на основі графену. Як провідний канал польового транзистора використовували плівку відновленого оксиду графену (rGO). Плівкоутворювальну суспензію наночастинок rGO наносили на поверхню шару SiO<sub>2</sub> на кремнієвій підкладці та сушили на повітрі при кімнатній температурі. Як фоточутливе середовище і затвор польового транзистора використовувалася кремнієва підкладка.

Електричні та фотоелектричні властивості польового транзистора на основі плівки rGO досліджено в режимах постійного та змінного струму. На основі аналізу комутаційних характеристик запропонованого польового транзистора виявлено лінійні ділянки залежності струму стоку від напруги затвору, положення яких залежить від знака напруги зміщення. Комутаційні характеристики демонструють співвідношення  $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$  понад два порядки і суттєву залежність провідності плівки rGO від опромінення білим світлом. Під впливом локального поля фотогенерованих носіїв заряду виявлено зменшення опору польового транзистора для електронної гілки профілю біполярної провідності плівки rGO. Крім того, опромінення поверхні польового транзистора на основі плівки rGO призводить до зменшення його опору та збільшення ємності в діапазоні частот 10<sup>2</sup>–10<sup>5</sup> Гц. Встановлено, що час фотовідгуку одержаного польового транзистора на світлові імпульси ІЧ, видимого та УФ випромінювання становить близько 1,5 мс. Отримані результати можуть бути використані для спрощення технології виготовлення фотодетекторів на основі графену.

**Ключові слова:** відновлений оксид графену, польовий транзистор, фоточутливість, комутаційна характеристика, імпеданс

---

# МАТЕРІАЛИ ДЛЯ СЕНСОРІВ

---

## SENSOR MATERIALS

---

---

УДК 535.37, 539.184.2, 577.33

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2023.2.279746>

### ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КОЛОЇДНИХ РОЗЧИНІВ ВУГЛЕЦЕВИХ ТОЧОК

*А. С. Топчило<sup>1,2</sup>, І. Лисенко<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Навчально-науковий інститут високих технологій, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна, 03022, м. Київ, просп. Академіка Глушкова, 4г,  
е-мейл: [anna.topchylo@gmail.com](mailto:anna.topchylo@gmail.com)

<sup>2</sup> Інститут Світла – Матерії, Ліонський університет ім. Клода Бернара, Франція, 69622,  
м. Вільборбан, вул. Ада Бірон, 10

<sup>3</sup> Фізичний факультет, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна,  
03127, м. Київ, просп. Академіка Глушкова  
[ivan.lysenko305@gmail.com](mailto:ivan.lysenko305@gmail.com)

### ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КОЛОЇДНИХ РОЗЧИНІВ ВУГЛЕЦЕВИХ ТОЧОК

*А. С. Топчило, І. Лисенко*

**Анотація.** В даній роботі були вивчені оптичні властивості вуглецевих точок (ВТ), хімічно синтезованих шляхом сольвотермальної карбонізації суміші сечовини та безводної лимонної кислоти. Отримано розподіл ВТ за розмірами з аналізатора динамічного розсіювання світла та представлена їх типова хімічна структура. Були виміряні спектри поглинання, флуоресценції (ФЛ), збудження ФЛ, а також характерні часи життя ФЛ. Було запропоновано енергетичну діаграму фотостимульованих електронних переходів в даному типі мультикольорово-флуоресцентних ВТ. Була виміряна температурна залежність спектрів збудження флуоресценції (СЗФ) та спектрів випромінювання флуоресценції (СВФ) колоїдів ВТ в діапазоні 5–75 °С, що продемонструвало можливість їх використання для термометрії. Було також показано перспективність застосування даних ВТ для флуоресцентної візуалізації біологічних клітин.

**Ключові слова:** Вуглецеві точки, фотостимульовані електронні переходи, флуоресценція, флуоресцентна візуалізація клітин

## OPTICAL PROPERTIES OF COLLOIDAL SOLUTIONS OF CARBON DOTS

*A. S. Topchylo, I. Lysenko*

**Abstract.** In this work, optical properties of carbon dots (CDs) chemically synthesized by solvothermal carbonization of a mixture of urea and anhydrous citric acid were studied. Size distribution of CDs with a typical chemical structure was estimated from dynamic light scattering. Absorption, fluorescence excitation/emission spectra as well as characteristic fluorescence lifetimes were measured. An energy diagram of photostimulated electronic transitions in this type of multicolor fluorescent carbon nanoparticles was also proposed. Temperature dependence of the PL/PLE-maps of CDs colloids in the range of 5–75 °C was measured and it demonstrates the possibility of their use for thermometry purposes. We also showed a possibility of CDs using for multicolor cell fluorescence imaging.

**Keywords:** carbon dots, photoinduced electronic transitions, fluorescence, cell fluorescence imaging

### ВСТУП

Вуглецеві точки (ВТ) – це нульвимірні наноматеріали на основі вуглецю з яскраво вираженими флуоресцентними властивостями, про які вперше було повідомлено у 2004 році в роботі [1]. ВТ складаються з щільного ядра, утвореного впорядкованим або невпорядкованим укладанням кількох фрагментів графену, що функціоналізовані різними хімічними групами, розподіленими на їх поверхні [2–3]. Порівняно з іншими флуоресцентними наноматеріалами, ВТ мають такі переваги, як покращена фотостабільність, високий квантовий вихід флуоресценції (ФЛ) і низька біологічна токсичність [4–11]. Саме тому вони мають високий потенціал для міждисциплінарних застосувань в широкому діапазоні різноманітних галузей науки: біомедицині, хемо- та біосенсориці, фотоніці, візуалізації біологічних об'єктів тощо [12–14]. Зокрема, ВТ привертають дослідницький інтерес через їх оптичні властивості: спектральний діапазон довжин хвиль від блакитної до ближньої інфрачервоної області спектру фотостимульованого випромінювання; регульовану мультикольорову, залежну від збудження люмінесценцію і досить високу фотостабільність [15–21]. Наразі відомо про велику кількість технологічних підходів для хімічного синтезу ВТ, а отже, потрібно детально дослідити механізми ФЛ колоїдних розчинів на основі ВТ задля підвищення ефективності їх застосувань.

Метою даної роботи є дослідження оптичних властивостей ВТ, отриманих шляхом сольвотермального синтезу для їх подальших біологічних застосувань. У даній роботі нами було досліджено спектри поглинання та флуоресценції колоїдних розчинів ВТ та запропонована схематична енергетична діаграма фотостимульованих електронних переходів у колоїдних ВТ. Показано, що даний тип ВТ може бути застосований для фотолюмінесцентної візуалізації біологічних клітин.

## 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

### 2.1. Синтез ВТ

ВТ були синтезовані сольвотермальним методом. Для цього було використано суміш 10 г сечовини та 16 г безводної лимонної кислоти, яку далі перенесли у відкритий скляний реактор. Далі реактор з сумішшю всередині помістили в електричну піч, яку нагрівали від 25 до 135 °C протягом 30 хвилин. Після цього витримували суміш при цій температурі протягом наступних 30 хвилин, щоб отримати жовтий розплав з початкової суміші. Далі температуру збільшували до 165 °C протягом 10–15 хвилин і витримували реактор протягом 1 години. Під час термічної обробки при такій температурі відбулося перетворення розплаву на темно-коричневу блискучу тверду речовину, яку в подальшому розчиняли у 80 мл 15% ізопропанолу і потім підкислювали 10 мл 30% HCl, під час цього відбувалася коагуляція ВТ

та утворення осаду. Після витримки протягом години осад відфільтровували, а отриманий коричневий порошок висушували на повітрі. Після висушування з дрібнодисперсного порошку ВТ було приготовано колоїдний розчин ВТ.[22]

## 2.2. Методи дослідження

Розподіл за розмірами було отримано з аналізатора динамічного розсіювання світла Malvern Zetasizer Nano – ZS, ZEN3600. Рівень рН розчину регулювали за допомогою розведеного розчину NaOH (0,1N, ThermoFisher GmbH, Kandel, Німеччина) та HCl (34–37%, PlasmaPURE, SCP Science, Нью-Йорк, США).

Спектр поглинання ВТ аналізували в діапазоні довжин хвиль 200–800 нм при кімнатній температурі (20 °С) за допомогою УФ-видимого спектрофотометра Varian. Для всіх дослідів використовували кварцові кювети об'ємом 2 мл. Дані аналізували за допомогою програмного забезпечення Cary Eclipse.

Стаціонарні карти збудження/випромінювання ФЛ та спектри збудження флюоресценції (СЗФ) та спектрів випромінювання флюоресценції (СВФ) знімали за допомогою спектрофлуориметра Shimadzu RF-6000. Функції джерела збудження виконувала ксенонова дугова лампа потужності 150 Вт. Спектри ФЛ та СВФ/СЗФ – карти записували для довжин хвиль збудження в діапазоні 250–380 нм. Спек-

три випромінювання знаходилися в діапазоні 400–750 нм.

В якості джерела збудження для вимірювання часової залежності інтенсивності ФЛ ВТ використовувався пікосекундний імпульсний лазер EPL-375 (377.2 нм, ширина імпульсу 76.4 пс, період 50 мс) при 530 нм для всіх зразків, на основі спектрометра Edinburgh Instruments Ltd. FLS920.

## 3. РЕЗУЛЬТАТИ

### 3.1. Хімічна структура та розміри синтезованих ВТ

Типова хімічна структура одержаних ВТ зображена на рис. 1 (а): блакитним кольором позначені атоми вуглецю, синім – азоту, червоним – кисню та білим – водню. Розподіл ВТ за розмірами на рис. 1 (б), отриманий за допомогою аналізатора динамічного розсіювання світла, показує, що основна кількість синтезованих ВТ має розміри в діапазоні від 1 до 4 нм. При цьому найбільш вірогідні розміри знаходяться в діапазоні 1–2 нм.

### 3.2. Спектр поглинання колоїдних розчинів ВТ

На рис. 2 представлено спектр поглинання колоїдного розчину ВТ з концентрацією 1 г/л. По горизонтальній осі відкладено енергію світлового кванта, а по вертикаль-

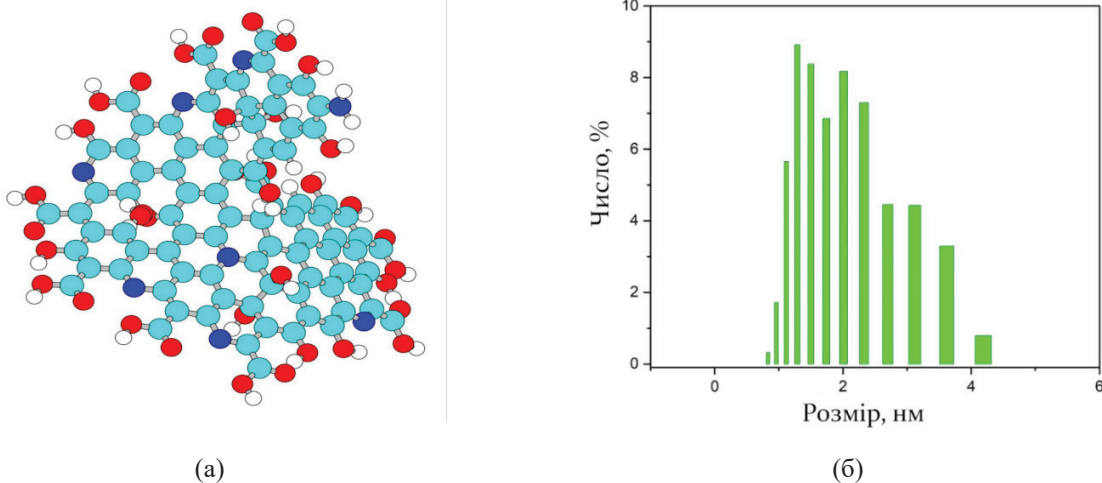


Рис. 1. Типова хімічна структура (а) та розподіл по розмірах (б) синтезованих ВТ.

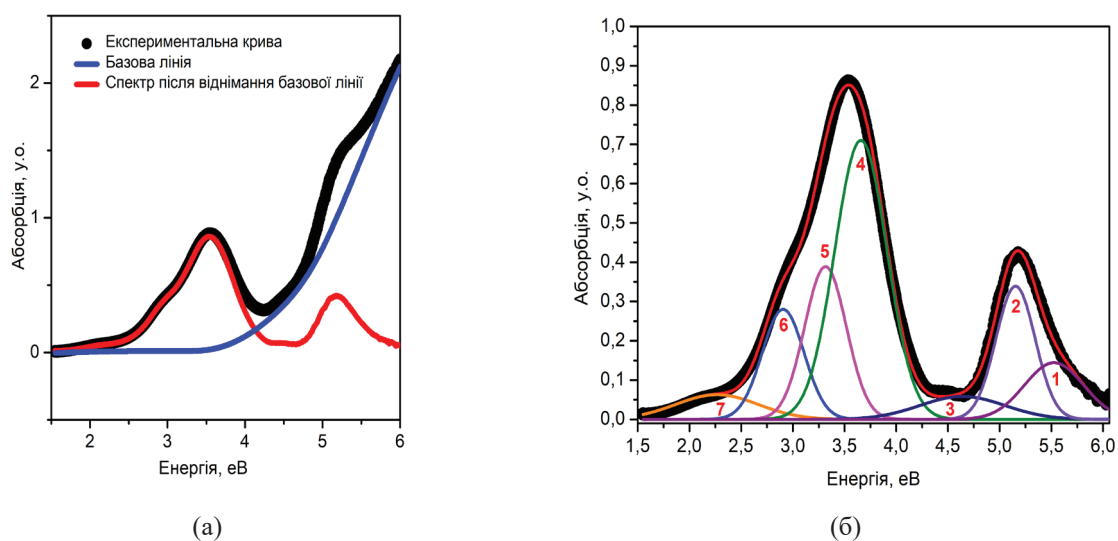


Рис. 2. УФ-видимі спектри поглинання ВТ до та після віднімання базової лінії (а). Деконволюція УФ-видимих спектрів поглинання після віднімання базової лінії (б).

ній осі – інтенсивність поглинутого світла (в умовних одиницях). Як показано на рис. 2 (а), експериментальна крива чорного кольору відповідає початковим отриманим спектрам ультрафіолетового(УФ)/видимого поглинання. Після віднімання експоненціальних базових ліній (лінії синього кольору), можна отримати складний багатокомпонентний спектр (червоні лінії) з чітко видимими спектральними особливостями. Деконволюція отриманих спектрів (виконана в програмі PeakFit) елементарними піками Гауса (див. рис. 2(б)), демонструє особливості УФ-видимого поглинання досліджуваних вуглецевих наночасток.

Відповідно до інформації, наведеної в літературі, високоенергетичні піки (1–3) відповідають переходам  $\pi \rightarrow \pi^*$  за участю ароматичних  $sp^2$ -гібридизованих вуглецевих зв'язків (ароматичні зв'язки  $C=C$ ). Наступні два піки (4, 5) відповідають електронним переходам  $n \rightarrow \pi^*$  зв'язків  $C=O/C=N$  на поверхні ВТ, а піки поглинання нижче 3 еВ – переходам поверхневих станів. Варто зазначити, що широкі піки (4, 5) зазвичай перекриваються, а не ізольовані чи розділені. Таким чином, пік 5 також може бути пов'язаний з фотостимульованим електронним переходом у поверхневому хімічному зв'язку. Що стосується піку 6, то його можна пояснити або додаванням азоту в решітку вуглецю  $sp^2$ , або поверхневими станами за участю азоту.

Пік 7 можна віднести або до характерного поглинання макроциклическої ароматичної сполученої структури [23] або до переходів  $\pi \rightarrow \pi^*$  і  $n \rightarrow \pi^*$  певних субфлуорофорів, що містяться в ВТ (наприклад,  $-NH_2$ ,  $C-N=C$ ), відповідно.

### 3.3. Карта збудження/випромінювання колоїдів ВТ.

На рис. 3 (а) зображена стаціонарна карта збудження/випромінювання ФЛ колоїдних розчинів ВТ з концентрацією 0,5 г/л, яка була отримана при 30 °С. На ній по вертикалі відкладено довжину хвилі збудження, а по горизонталі – довжину хвилі випромінювання в нанометрах. Колір карти відображає інтенсивність ФЛ. Легко бачити, що при концентрації 0,5 г/л домінує синє випромінювання з піком при 450 нм, збуджене на довжині хвилі 310 нм. В діапазоні довжин хвиль збудження 280–320 нм можна також бачити наявність ВТ, які флуоресціюють в зеленому (500–550) та червоному (600–620) діапазонах. На рис. 3 (б) продемонстрована температурна залежність максимальної за інтенсивністю ФЛ в діапазоні 5–75 °С. Можна спостерігати характерне лінійне зменшення інтенсивності ФЛ при збільшенні температури, що відповідає монотонному зростанню концентрації безвипромінювальних центрів рекомбінації.

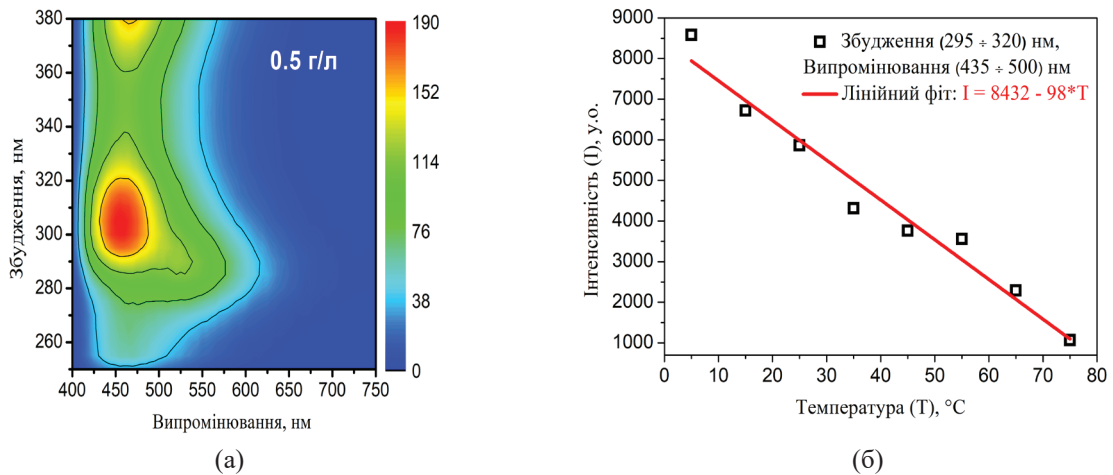


Рис. 3. Карта збудження/випромінювання колоїдів ВТ (а) та температурна залежність інтенсивності ФЛ в діапазонах збудження (295–320 нм) та випромінювання (435–500 нм) (б).

### 3.4. СВФ/СЗФ спектри колоїдних розчинів ВТ

Для детального аналізу енергетичних положень центрів випромінювальної рекомбінації були проаналізовані характерні спектри СЗФ/СВФ, показані на рис. 4 та 5.

Чорні символи відповідають експериментальним спектрам, червоні лінії – суми спектральних компонентів (кольорові лінії з позначеними спектральними положеннями максимумів), отриманих в наслідок деконволюції експериментальних спектрів.

Кожному спектру збудження ФЛ на рис. 4 відповідає по два спектри випромінювання, представлених на рис. 5.

Перший спектр збудження ФЛ (рис.4 (а)) при випромінюванні на 2.66 еВ, має два характерних піки з енергіями 3.17 та 4.08 еВ, які в свою чергу є енергіями збудження для двох відповідних спектрів випромінювання ФЛ, вказаних на рис. 5 (а, б). Другий спектр збудження з енергією випромінювання 2.36 еВ (рис. 4(б)) теж має свої два характерні піки з енергіями 2.74 та 4.25 еВ, які є енергіями збудження для

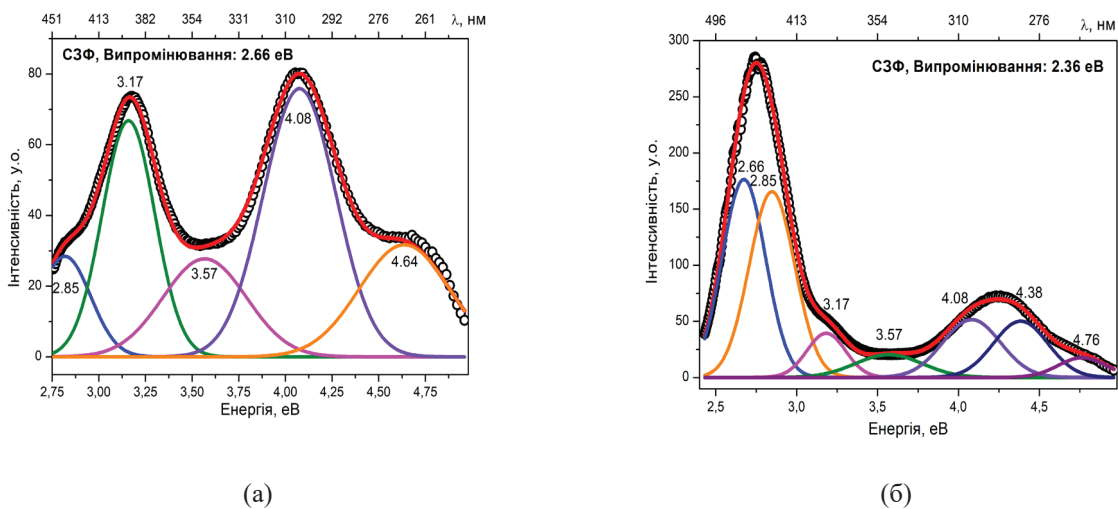


Рис. 4. СЗФ колоїдного розчину ВТ з концентрацією 1 г/л з енергією випромінювання 2.66 еВ (а), та 2.36 еВ (б).

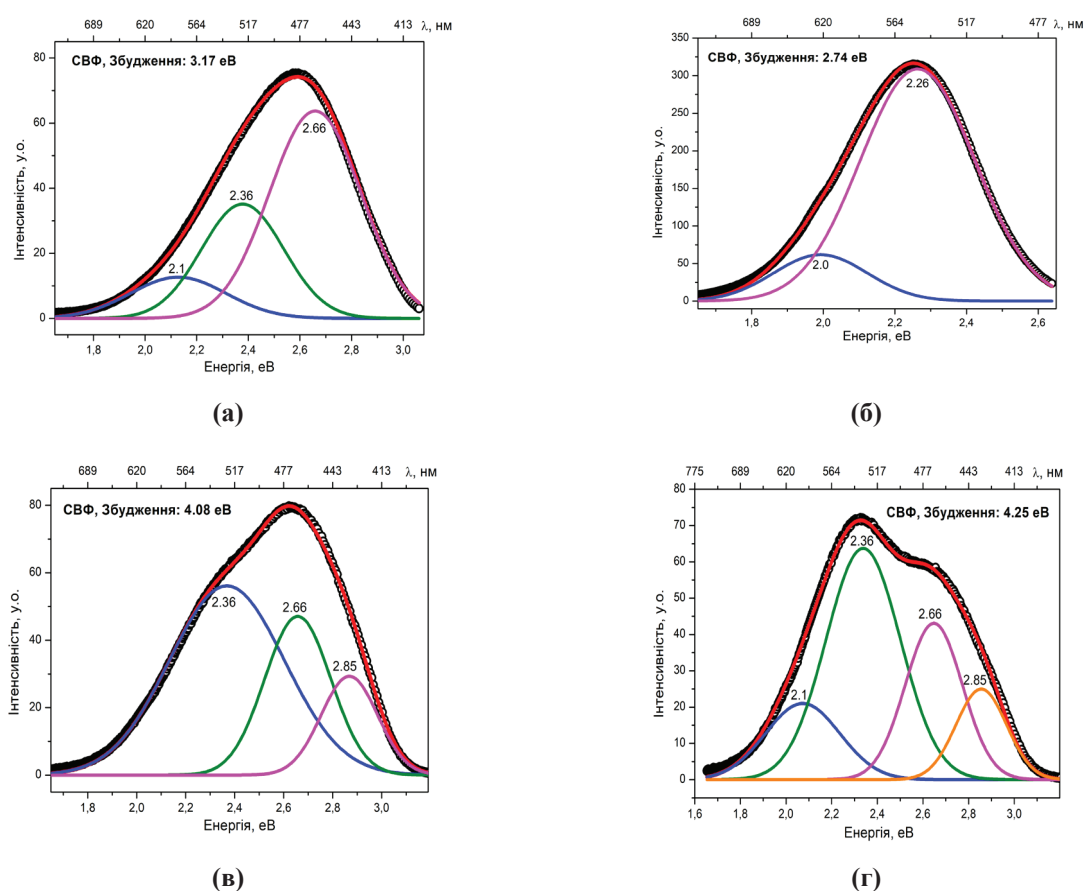


Рис. 5. СВФ колоїдного розчину ВТ з концентрацією 1 г/л при енергіях збудження: 3.17 еВ (а), 2.74 еВ (б), 4.08 еВ (в), 4.25 еВ (г).

двох наступних спектрів випромінювання ФЛ, показаних на рис. 5 (в, г). Після виконання деконволюції вищенаведених спектрів (рис. 3–5) було виявлено низку характерних фото-

стимульованих електронних переходів з відповідними рівнями енергій, які було згруповано та зображено у вигляді енергетичної діаграми (див. рис. 6).

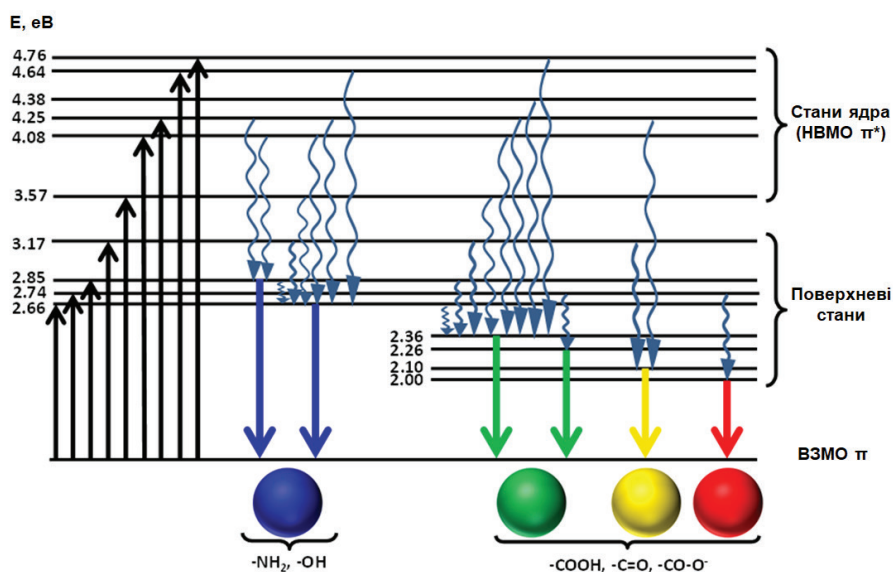


Рис. 6. Схематична енергетична діаграма фотозбуджених електронних переходів у ВТ.



Перша група енергетичних рівнів (2.0, 2.1 та 2.26, 2.36 eV) пов'язана з поверхневими станами, що відповідають хімічним групам -COOH, -C=O та -CO-O-, а відповідні переходи з цих рівнів на основний дають червону, жовту та зелену емісію, як про це вже повідомлялось в роботах [24, 25]. Друга група рівнів (2.66, 2.74 та 2.85 eV) пов'язана з поверхневими станами, що відповідають аміно- та гідроксильним поверхневим групам ( $-\text{NH}_2$ , -OH), а відповідні переходи з цих рівнів на основний дають синю емісію [25, 26].

Третя група енергетичних рівнів (3.57 eV і вище) відповідає станам ядра ВТ (енергетичні рівні  $\pi^*$ , які відповідають зв'язкам C-C та C-N в ароматичних вуглецевих кільцях і які, зазвичай, не люмінесцюють) [24].

З приведених вище даних по СВФ/СЗФ та діаграми електронних переходів можна зазначити те що, колоїдні розчини, досліджені в цій роботі, складаються з мультикольорово-флуоресцентних ВТ, які відрізняються між собою розмірами та хімією поверхні.

### 3.5. Кінетика люмінесценції колоїдних розчинів ВТ

На рис. 7 (а-г) представлено часові залежності інтенсивності ФЛ ВТ для довжин хвиль випромінювання 450, 470, 540 та 620 нм при імпульсному збудженні з довжиною хвилі 377.2 нм та ширині імпульсу 76.4 пс. Всі отримані кінетики ФЛ характеризуються єдиним характерним часом життя ( $\tau$ ). Дійсно, після апроксимації експоненційно спадаючих кінетик ФЛ були отримані часи життя: 7.90, 7.93, 8.70 та 10.60 нс для довжин хвиль випромінювання 450, 470, 540 та 620 нм, відповідно.

Як можна бачити, час життя ФЛ зростає зі зростанням довжини хвилі випромінювання, але всі значення знаходяться в достатньо вузькому діапазоні: 7–11 нс. Враховуючи абсолютні значення характерних часів ФЛ порядку 10 нс, можна зробити висновок, що в даному випадку маємо справу з явищем флуоресценції ВТ з відносно короткими часами: менше 100 нс.

Як показано на рис. 8, температурна залежність характерного часу життя  $\tau$  на довжи-

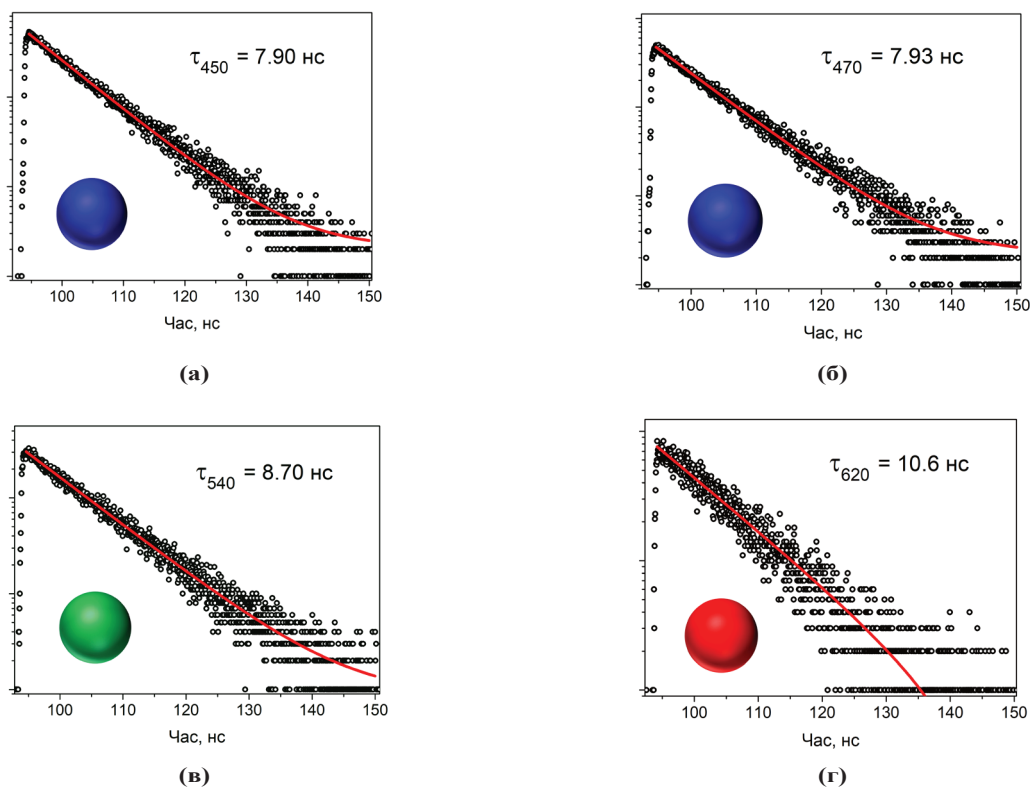


Рис. 7. Кінетики ФЛ ВТ для різних довжин хвиль випромінювання:  $\lambda = 450$  нм (а),  $\lambda = 470$  нм (б),  $\lambda = 540$  нм (в) та  $\lambda = 620$  нм (г) при імпульсному збудженні (377.2 нм, ширина імпульсу 76.4 пс).

ні хвилі випромінювання 450 нм є лінійною. З ростом температури час життя спадає від 11.7 до 7.4 нс, а отже, росте ймовірність електронного переходу через безвипромінювальні стани, що добре корелює з висновком, отриманим після аналізу рис. 3(б).

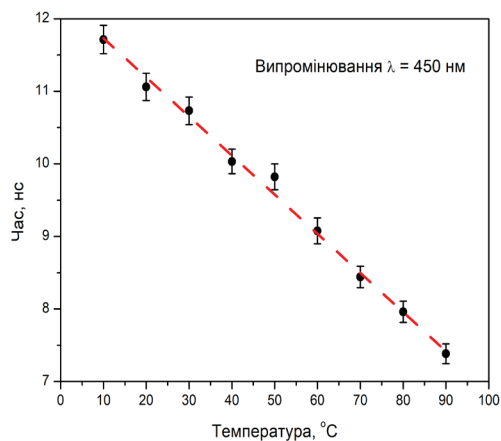


Рис. 8. Температурна залежність кінетики ФЛ ВТ на довжині хвилі 450 нм.

### 3.6. Візуалізація біологічних об'єктів з використанням ВТ

Одним із найпоширеніших застосувань ВТ є їхнє використання в якості флуоресцентних міток біологічних клітин. На рис. 9 пред-

ставлені зображення біологічних клітин 3Т3 – L1, маркованих мультикольоровими флуоресцентними ВТ.

Зокрема, на рис. 9 (а) показане зображення біологічних клітин у звичайному оптичному мікроскопі. Рис. 9 (б-г) – зображення тих самих клітин, отриманих за допомогою флуоресцентного мікроскопа при різних оптичних збудженнях. Рис. 9 (д) – це накладені одне на одне зображення (а-г). Можна бачити, що в залежності від довжини хвилі збудження, біологічні клітини, промарковані флуоресцентними ВТ, люмінесціюють в усьому видимому діапазоні, що є проявом мультикольорової флуоресценції даних ВТ, яка описувалась вище.

Одним із цікавих спостережень, яке можна зробити при детальному перегляді зображень на рис. 9 є той факт, що в результаті флуоресцентного маркування біологічних клітин найбільша інтенсивність флуоресценції, зумовленої присутністю ВТ в клітинах, відповідає локалізації ВТ в клітинних ядрах. Це означає, що ВТ, які вивчалися в нашій роботі, дуже легко проникають в ядра. Цей експериментальний факт доволі легко пояснити, враховуючи надзвичайно маленькі розміри ВТ, що не перевищують 5 нм.

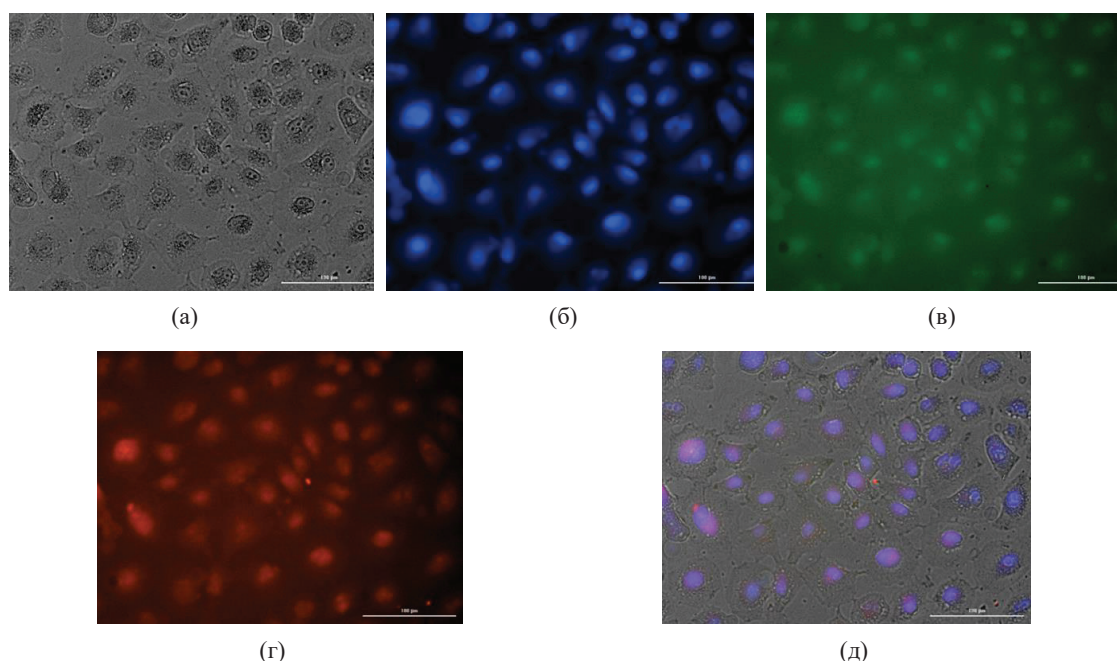


Рис. 9. Зображення біологічних клітин 3Т3-L1 в: а) оптичному мікроскопі; б) флуоресцентному мікроскопі при УФ, в) синьому та г) зеленому збудженнях, д) комбіноване зображення, на якому накладені одне на одне чотири попередні зображення.

## ВИСНОВКИ

В даній роботі були вивчені оптичні властивості ВТ хімічно синтезованих шляхом сольвотермальної карбонізації суміші сечовини та безводної лимонної кислоти. А саме, були виміряні спектри поглинання, збудження та випромінювання ФЛ. Виходячи з аналізу характерних піків в цих спектрах, було запропоновано енергетичну діаграму фотостимульованих електронних переходів в даному типі мультикольорово-флуоресцентних ВТ. Були визначені характерні часи життя видимої ФЛ досліджуваних колоїдних розчинів ВТ, які знаходились в інтервалі 7–11 нс, при чому, більші значення часу життя відповідали флуоресценції на більшій довжині хвилі.

Розподіл ВТ за розмірами демонструє, що основна кількість ВТ є меншою за 5 нм, що дозволяє їм проникати в біологічні клітини, найчастіше локалізуючись в клітинних ядрах. Таким чином бачимо, що ВТ можна використовувати як ефективні флуоресцентні мітки ядер біологічних клітин, що було продемонстровано на прикладі флуоресцентної біовізуалізації клітин.

## Список використаної літератури

[1]. X. Xu, R. Ray, Y. Gu, et al. Electro-phoretic analysis and purification of fluorescent single-walled carbon nanotube fragments. *Am Chem Soc*, 126, pp. 12736–12737. (2004).

[2]. F. Kas, S. Sahu, Y. Liu, W.K. Lewis, E.A. Guliyants, A. Jafariyan, P. Wang, C.E. Bunker, Y-P. Sun. Carbon quantum dots and applications in photocatalytic energy conversion. *ACS Appl Mater Interfaces*, 7(16), pp. 8363–8376. (2015).

[3]. P. Yang, J. Zhao, L. Zhang, L. Li, Z. Zhu. Intramolecular hydrogen bonds quench photoluminescence and enhance photocatalytic activity of carbon Nanodots. *Chem Eur*, 21(23), pp. 8561–8568. (2015).

[4]. C.K. Zhou, H.R. Lin, Y. Tian, Z. Yuan, R. Clark, B.H. Chen, L. J. van de Burgt, J.C. Wang, Y. Zhou, K. Hanson, Q.J. Meisner, J. Neu, T. Besara, T. Siegrist, E. Lambers, P. Djurovich, B. W. Ma. Luminescent zero-

dimensional organic metal halide hybrids with near-unity quantum efficiency. *Chem. Sci.*, 9, pp. 586–593. (2018).

[5]. H. Zhu, H. Zhang and Y.S. Xia. Planar Is Better: Monodisperse Three-Layered MoS<sub>2</sub> Quantum Dots as Fluorescent Reporters for 2,4,6-Trinitrotoluene Sensing in Environmental Water and Luggage Cases. *Anal. Chem.*, 90, pp. 3942–3949. (2018).

[6]. Z.Y. Wang, L.J. Wang, Q.Y. Zhang, B. Tang and C.Y. Zhang. Single quantum dot-based nanosensor for sensitive detection of 5-methylcytosine at both CpG and non-CpG sites. *Chem. Sci.*, 9, pp. 1330–1338. (2018).

[7]. L. J. Wang, F. Ma, B. Tang and C. Y. Zhang. Base-Excision-Repair-Induced Construction of a Single Quantum-Dot-Based Sensor for Sensitive Detection of DNA Glycosylase Activity. *Anal. Chem.*, 88, 7523–7529. (2016).

[8]. J. Wang, R. S. Li, H.Z. Zhang, N. Wang, Z. Zhang and C.Z. Huang. Highly fluorescent carbon dots as selective and visual probes for sensing copper ions in living cells via an electron transfer process. *Biosens. Bioelectron.*, 97, 157–163. (2017).

[9]. S. Bestgen, O. Fuhr, B. Breitung, V.S. Kiran Chakravadhanula, G. Guthausen, F. Hennrich, W. Yu, M.M. Kappes, P.W. Roesky and D. Fenske. [Ag<sub>115</sub>S<sub>34</sub>(SCH<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>4</sub><sup>t</sup>Bu)<sub>47</sub>(dpph)<sub>6</sub>]: synthesis, crystal structure and NMR investigations of a soluble silver chalcogenide nanocluster. *Chem. Sci.*, 8, pp. 2235–2240. (2017).

[10]. S.T. Sun, D. Gebauer, H. Colfen. A general strategy for colloidal stable ultrasmall amorphous mineral clusters in organic solvents. *Chem. Sci.*, 8, pp. 1400–1405. (2017).

[11]. F. L. Yuan, S. H. Li, Z. T. Fan, X.Y. Meng, L. Z. Fan, S.H. Yang. Shining carbon dots: Synthesis and biomedical and optoelectronic applications. *Nano Today*, 11, pp. 565–586. (2016).

[12]. X. Teng, C. Ma, C. Ge, M. Yan, J. Yang, Y. Zhang, P.C. Morais, H. Bi. Green synthesis of nitrogen-doped carbon dots from konjac flour with “off-on” fluorescence by Fe<sup>3+</sup>

and l-lysine for bioimaging. *Mater Chem B* 2(29), pp. 4631–4639. (2014).

[13]. L. Wang, H. X. Cao, C. G. Pan, Y. S. He, H. F. Liu, L. H. Zhou, C. Q. Li, G. X. Liang. A fluorometric aptasensor for bisphenol a based on the inner filter effect of gold nanoparticles on the fluorescence of nitrogen-doped carbon dots. *Microchim Acta* 186(1), 28. (2018).

[14]. Y. Liu, X. Tang, M. Deng, Y. Cao, Y. Li, H. Zheng, F. Li, F. Yan, T. Lan, L. Shi, L. Gao, L. Huang, T. Zhu, H. Lin, Y. Bai, D. Qu, X. Huang, F. Qiu. Nitrogen doped graphene quantum dots as a fluorescent probe for mercury(II) ions. *Microchim Acta* 186(3), 140. (2019).

[15]. T. Hao, X. Wei, Y. Nie, Y. Xu, Y. Yan, Z. Zhou. An eco-friendly molecularly imprinted fluorescence composite material based on carbon dots for fluorescent detection of 4-nitrophenol. *Microchim Acta*, 183(7), pp. 2197–2203. (2016).

[16]. E. Simoes, J. Leitao, J. da Silva. Carbon dots prepared from citric acid and urea as fluorescent probes for hypochlorite and peroxyxynitrite. *Microchim Acta*, 183(5), pp. 1769–1777. (2016).

[17]. W. Yao, N. Wu, Z. Lin, J. Chen, S. Li, S. Weng, L. Zhang, A. Liu, X. Lin. Fluorescent turn-off competitive immunoassay for biotin based on hydrothermally synthesized carbon dots. *Microchim Acta*, 184(3), pp. 907–914. (2017).

[18]. P. Roy, P-C. Chen, A. P. Periasamy, Y-N. Chen, H-T. Chang. Photoluminescent carbon nanodots: synthesis, physicochemical properties and analytical applications. *Mater Today*, 18(8), pp. 447–458. (2015).

[19]. S. Zhu, S. Tang, J. Zhang, B. Yang. Control the size and surface chemistry of graphene for the rising fluorescent materials. *Chem Commun*, 48(38), pp. 4527–4539. (2012).

[20]. T-F. Yeh, C-Y. Teng, S-J. Chen, H. Teng. Nitrogen-doped graphene oxide quantum dots as Photocatalysts for overall water-splitting under visible light illumination. *Adv Mater*, 26(20), pp. 3297–3303. (2014).

[21]. S. Zhu, Y. Song, X. Zhao, J. Shao, J. Zhang, B. Yang. The photoluminescence mechanism in carbon dots (graphene quantum dots, carbon nanodots, and polymer dots): current state and future perspective. *Nano Res*, 8(2), pp. 355–381. (2015).

[22]. I.I. Ivanov, A.N. Zaderko, V. Lysenko, T. Clopeau, V. V. Lisnyak, V.A. Skryshevsky. Photoluminescent Recognition of Strong Alcoholic Beverages with Carbon Nanoparticles. *ACS Omega*, 6 (29), pp. 18802–18810. (2021).

[23]. K. Jiang, Y. Wang, C. Cai, H. Lin. Conversion of Carbon Dots from Fluorescence to Ultralong Room-Temperature Phosphorescence by Heating for Security Applications. *Adv. Mater.*, 1800783. (2018).

[24]. H. Ding, S. B. Yu, J. S. Wei, H. M. Xiong. Full-color light-emitting carbon dots with a surface-state-controlled luminescence mechanism. *ACS Nano*, 10(1), pp. 484–491. (2016).

[25]. J. Du, H. Wang, L. Wang, S. Zhu, Y. Song, B. Yang, H. Sun. Insight into the effect of functional groups on visible-fluorescence emissions of graphene quantum dots. *Mater Chem C*, 4(11), pp. 2235–2242. (2016).

[26]. Y. Zheng, D. Yang, X. Wu, H. Yan, Y. Zhao, B. Feng, K. Duan, J. Weng, J. Wang. A facile approach for the synthesis of highly luminescent carbon dots using vitamin-based small organic molecules with benzene ring structure as precursors. *RSC Adv*, 5(110), pp. 90245–90254. (2015).

Стаття надійшла до редакції 19.05.2023 р.

UDC535.37, 539.184.2, 577.33

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2023.2.279746>

## OPTICAL PROPERTIES OF COLLOIDAL SOLUTIONS OF CARBON DOTS

*A. S. Topchylo<sup>1,2</sup>, I. Lysenko<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Educational and Scientific Institute of High Technologies, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Hlushkova Avenue, 4g, Kyiv, 01601, Ukraine

<sup>2</sup>Light-Matter Institute (ILM), UMR-5306, University of Lyon (UCBL), 10 rue Ada Byron, Villeurbanne, 69622, France

<sup>3</sup>Faculty of Physics, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Hlushkova Avenue, 4, Kyiv, 01601, Ukraine

### Summary

The promising optical properties of CDs attract strong attention of scientists due to the wide spectral range of photostimulated emission and very high photostability. There is a wide variety of developed technological approaches for chemical synthesis of CDs, and it becomes necessary to study in details the fluorescence mechanisms of colloidal solutions based on CDs for their further exciting applications.

The main aim of this work is to study optical properties of the CDs obtained by solvothermal synthesis for their further biological applications, in particular for multicolor cell fluorescence imaging.

Optical measurements were carried out using the following optical devices: Varian Cary 50 UV–Visible spectrophotometer, spectrometer Shimadzu RF-6000, EPL-375 picosecond pulse laser based on the Edinburgh Instruments Ltd., FLS920. Size distribution was estimated from dynamic light scattering on Malvern Zetasizer Nano ZEN3600. Experimental results were processed using the OriginPro and PeakFit softwares.

In this paper, we studied absorption, steady-state excitation/emission and time-resolved fluorescence spectra. An energy diagram of photostimulated electronic transitions was proposed for this type of multicolor fluorescent CDs, based on the analysis of the characteristic peaks in these spectra. The lifetimes (in the range of 7–11 ns) of the visible fluorescence were measured on the studied colloidal solutions of CDs.

The extremely small sizes of the studied fluorescent CDs (<5 nm) allow their efficient penetration into biological cells with a predominant localization in the cell nuclei. This allowed application of this type of CDs for multicolor fluorescent labeling of the nuclei of biological cells.

**Keywords:** carbon dots, photoinduced electronic transitions, fluorescence, cell fluorescence imaging

## ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КОЛОЇДНИХ РОЗЧИНІВ ВУГЛЕЦЕВИХ ТОЧОК

*А. С. Топчило<sup>1,2</sup>, І. Лисенко<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Навчально-науковий інститут високих технологій, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна, 03022, м. Київ, просп. Академіка Глушкова, 4г

<sup>2</sup> Інститут світла – матерії, Ліонський університет ім. Клода Бернара, Франція, 69622, м. Вільборбан, вул. Ада Бірон, 10

<sup>3</sup> Фізичний факультет, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна, 03127, м. Київ, просп. Академіка Глушкова, 4

### Реферат

Перспективні оптичні властивості ВТ привертають увагу науковців через широкий спектральний діапазон можливих довжин хвиль фотостимульованого випромінювання та достатньо високу фотостабільність. Враховуючи велику різноманітність розроблених технологічних підходів для хімічного синтезу ВТ, стає необхідним детальне вивчення механізмів ФЛ колоїдних розчинів на основі ВТ для їх подальшого ефективного застосування.

Мета нашої роботи – вивчити оптичні властивості вуглецевих точок, отриманих в результаті сольвотермального синтезу для їх подальших біологічних застосувань, зокрема для флуоресцентної візуалізації клітин.

Оптичні властивості було досліджено з використанням наступних оптичних приладів: спектрофотометр Varian Cary 50 UV–Visible, спектрофлуориметр Shimadzu RF-6000, пікосекундний імпульсний лазер EPL-375 на основі спектрометра Edinburgh Instruments Ltd., FLS920. Розподіл за розмірами було отримано за допомогою аналізатора Malvern Zetasizer Nano – ZS, ZEN3600. Обробка експериментальних результатів приводилась за допомогою програм OriginPro та PeakFit.

В даній роботі були виміряні спектри поглинання, збудження ФЛ та випромінювання ФЛ. Виходячи з аналізу характерних піків в цих спектрах, було запропоновано енергетичну діаграму фотостимульованих електронних переходів в даному типі мультикольорових ВТ. Крім того, були отримані часи життя в інтервалі 7–11 нс видимої ФЛ.

Надзвичайно маленькі розміри вивчених флуоресцентних ВТ (< 5 нм) сприяють їхньому ефективному проникненню в біологічні клітини з переважною локалізацією в клітинних ядрах. Це дозволило використання даного типу ВТ для мультикольорового флуоресцентного маркування ядер біологічних клітин.

**Ключові слова:** Вуглецеві точки, фотостимульовані електронні переходи, флуоресценція, флуоресцентна візуалізація клітин

---

# СЕНСОРИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ

---

## SENSORS AND INFORMATION SYSTEMS

---

---

УДК 621.37/39:534:621.396.6

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2023.2.282729>

### УКХ РАДІОТРАКТ З ФІЛЬТРОМ ПРОМІЖНОЇ ЧАСТОТИ І ЧАСТОТНИМ ДЕТЕКТОРОМ НА ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЯХ

*Я. І. Леніх*

Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр МОН і НАН України  
при ОНУ імені І. І. Мечникова, e-mail: [ndl\\_lepikh@onu.edu.ua](mailto:ndl_lepikh@onu.edu.ua)

### УКХ РАДІОТРАКТ З ФІЛЬТРОМ ПРОМІЖНОЇ ЧАСТОТИ І ЧАСТОТНИМ ДЕТЕКТОРОМ НА ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЯХ

*Я. І. Леніх*

**Анотація.** В статті застосовано новий підхід до мікромініатюризації УКХ радіотракта з суттєвим покращенням його основних характеристик на основі акустоелектронних елементів на ПАХ. Зокрема, замість фільтра проміжної частоти (ПЧ), який у більшості випадків реалізується з допомогою «моточних» виробів (LC контурів) – ФЗС (фільтр зосередженої селекції) запропоновано фільтр на ПАХ, а замість такого ж традиційного частотного детектора (ЧД) – ЧД з фазозсувною лінією затримки (ЛЗ).

Обидва пристрої на ПАХ інтегровані в УКХ радіотракт, наведені основні характеристики тракта.

**Ключові слова:** УКХ радіотракт, акустоелектронні пристрої на поверхневих акустичних хвилях

### VHF RADIO PATH WITH INTERMEDIATE FREQUENCY FILTER AND FREQUENCY DETECTOR ON SURFACE ACOUSTIC WAVES

*Ya. I. Lepikh*

**Abstract.** The article applies a new approach to microminiaturization of the VHF radio path with a significant improvement of its main characteristics based on acoustoelectronic elements on SAW. In particular, instead of the intermediate frequency filter (IF), which in most cases is implemented with the help of "coil" products (LC circuits), the CSF (concentrated selection filter) is proposed to be a

filter on the characteristic curve, and instead of the same traditional frequency detector (FD) – a FD with by a phase-shifting delay line (DL).

Both SAW devices are integrated into the VHF radio path, the main characteristics of the path are given.

**Keywords:** VHF radio path, acoustoelectronic devices on surface acoustic waves

## Вступ

Акустоелектронні пристрої на поверхневих акустичних хвилях ПАХ, як відомо, відіграють суттєву роль в кардинальному покращенні характеристик радіоелектронної апаратури (РЕА) при вирішенні проблеми її мініатюаризації, особливо коли це стосується елементів частотно-часової селекції [1–3].

У радіотракті УКХ радіоприймачів різного призначення використовується частотно-модульований (ЧМ) сигнал, зокрема, в радіоприймачі FM діапазону – із центральною частотою  $f_0=10,7$  МГц та дев'ятикратною частотою  $f_m=50$  кГц. Якість радіоприймача при цьому характеризується величиною нелінійних спотворень сигналу, що визначається трактом проміжної частоти (ПЧ) та частотним детектором (ЧД).

Саме з метою поліпшення параметрів тракту на прикладі FM радіоприймача його характеристика формувалася фільтром ПЧ та ЧД на ПАХ, що було основною задачею в даній роботі.

## Результати і їх обговорення

Вихідними даними на проектування фільтра, крім зазначених вище, були вимоги мінімальних втрат ( $\leq 12$  дБ) і мінімальної ( $\leq 0,2$  мкс) нерівномірності групового часу запізнення (ГЧЗ) сигналу в смузі пропускання, що забезпечує мінімальні фазові спотворення сигналу.

Особливістю фільтра на ПАХ за вказаними технічними умовами, як найбільш важливого пристрою для формування амплітудно- і фазочастотних характеристик (АЧХ і ФЧХ), є необхідність задовільнення граничних технічних вимог для цього класу пристроїв: поєднання відносно низької робочої частоти –  $f_0=10,7$  МГц з вузькою полосою пропускання  $\Delta f=2\%f_0$ , а також мале значення нерівномірності групового часу запізнення

(ГЧЗ)  $\leq 0,2$  мкс і малі вносимі втрати  $\leq 12$  дБ. Як показав аналіз, оптимальним для такого фільтра матеріалом звукопровода може бути п'єзокераміка системи ЦТС (цирконат-титанат свинцю) марки ЦТС-42, який має великий коефіцієнт електромеханічного зв'язку  $k_p=0,27$  і малу швидкість поширення ПАХ- $2200$  м/с, що забезпечує малі вносимі втрати сигналу і малі габаритні розміри пристроїв на ПАХ. Разом з тим ЦТС-42 має велике значення діелектричної проникності  $\epsilon \approx 300$ , що призводить до значних величин ємностей зустрічно-штирьових перетворювачів (ЗШП).

Останнє ставить вимоги до вибору оптимальних рішень щодо конструкції ЗШП [4,5]. Найкращі результати досягаються використанням двох ЗШП, один з яких неаподизований з невеликою кількістю електродів, другий – аподизований зважуванням довжини електродів за функцією Хеммінга з проріджуванням ЗШП інтервалом  $3/2\lambda$ , де  $\lambda$  – довжина хвилі (рис.1).

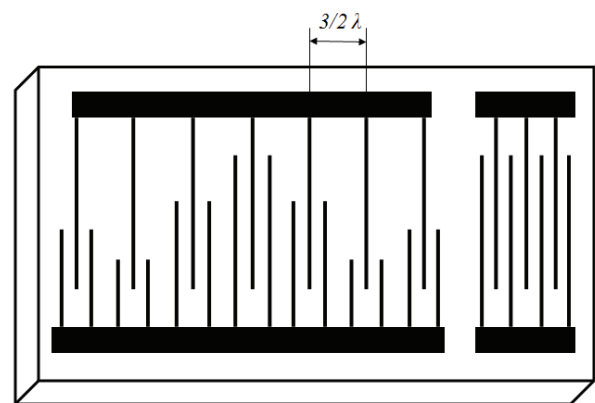


Рис. 1. Конструкція фільтра ПЧ на ПАХ.

З метою зменшення впливу дифракції на електричні характеристики фільтра мінімальне перекриття електродів аподизованого ЗШП  $L_{min}$  обмежувалось умовою:

$$L_{min} \geq (rV/f_B)^{1/2}, \quad (1)$$



$$L_{min} \geq (rV/f_b)^{1/2}, \quad (1)$$

де  $r$  – відстань між прийомним ЗШП і найбільш віддаленою від нього парою електродів з мінімальним перекриттям;

$V$  – швидкість поширення ПАХ;

$f_b$  – верхня гранична частота полоси пропускання фільтра.

Проектування ПАХ-фільтра здійснювалось з допомогою САПР, що дозволяє оптимізувати конструктивні рішення з забезпеченням необхідного технологічного запасу по основних параметрах. Використовувався акустопластина з високою ефективністю придушення заводських сигналів ПАХ ( $\geq 50$ дБ/мм).

Тракт з ПЧ-фільтром на ПАХ виконаний із застосуванням інтегральної мікросхеми КІ74ХА6 (підсилювач-обмежувач, демодулятор) з двоконтурним фазозсувним ланцюгом у схемі ЧД. Фільтр був навантажений на навантаження 50 Ом, а його узгодження з елементами тракту здійснювалося з боку вихідного зустрічно-штирьового перетворювача однією низькодобротною котушкою індуктивності величиною  $\approx 1$  мкГн, яка може бути виконана у плівковому варіанті. Якість радіотракту визначається за ступенем нелінійних спотворень сигналу, що характеризуються коефіцієнтом гармонік тракту  $K_{ГТ}$ . Вимірювання коефіцієнта гармонік проводилося за двосигнальним методом.

Частотний детектор на ПАХ, побудований по схемі співпадіння таким чином, що функцію двоконтурної схеми фазозсувного ланцюга реалізує пристрій на ПАХ. Принцип роботи пристрою на ПАХ базується на отриманні різниці часу затримки сигналу на вихідних ЗШП, розташованих на різних відстанях від вхідного ЗШП розташованому між ними (рис. 2). По суті зсув по фазі між сигналами на вихідних ЗШП здійснюється фазозсувною лінією затримки відповідно до різниці відстані між ЗШП, яка дорівнює

$$\tau_3 = (k + 1/4) T_0, \quad (2)$$

де  $T_0$  – період коливань вхідного сигналу на робочій частоті;

$k$  – ціле число.

Лінійне детектування забезпечується при виконанні умови  $k < f_0/4f_m - 1/2$ .

Для проміжної частоти  $f_0 = 10,7$  МГц і частоти девіації  $f_m = 50$  кГц значення  $k$  лежить в діапазоні від 0 до 53.

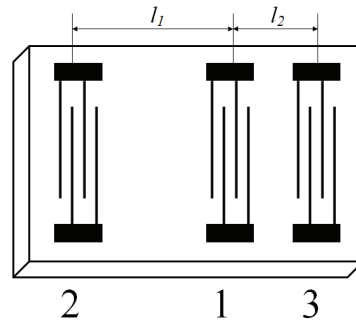


Рис. 2 Конструкція ЧД з ЛЗ на ПАХ. 1 – вхідний ЗШП, 2 і 3 – вихідні ЗШП.

Сигнал, який поступив на вхідний ЗШП, перетворюється таким чином, що на перетворювач подаються з вихідних ЗШП два сигнали з постійною на всіх частотах затримкою, якій відповідає зсув фази, пропорційний частоті. Тобто така ЛЗ на ПАХ являється перетворювачем ЧМ сигналу в фазомодульований (ФМ) сигнал.

На рис. 3 наведено залежності коефіцієнтів гармонік ЧД ( $K_{ГЧД}$ ) та тракту УПЧ-ЧМ ( $K_{ГТ}$ ) з ПАХ-фільтром, що демонструє досягнення високих результатів.

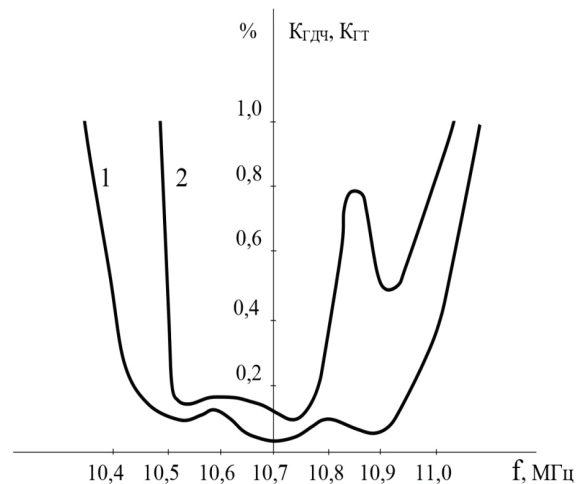


Рис. 3. Графіки коефіцієнтів гармонік частотного детектора  $K_{ГЧД}$ -1 і тракту ПЧ-ЧМ з фільтром на ПАХ  $K_{ГТ}$ -2 в полісі робочих частот.

Видно, що фільтр і ЧД ПАХ дозволяють досягти високих електричних параметрів. При цьому досягається висока стабільність основних характеристик, а також виграв у масі та габаритних розмірах відповідного вузла приблизно в 4 рази.

Створений за вказаним вище принципом радіотракт включений до схеми ЧМ-стереотюнера класу Hi-Fi, який пройшов необхідні види випробувань.

### Висновки

Результати розробки і досліджень фільтра і ЧД на ПАХ показали можливість досягнення високих функціональних характеристик радіотракту у відповідності до вимог мікромініатюризації радіоелектронної апаратури.

Реалізований принцип демодуляції сигналу може бути з успіхом використаний для інших пристроїв, зокрема, в системах автоматичного підлаштування частоти.

### Список використаної літератури

[1]. Morgan D. Surface Acoustic Wave Filters, With Applications to Electronic Communication and Signal Processing//Elsevier, 2007,– 448 p.

[2]. A. I. Belous, V. A. Pelipenko, A. S. Turcevich, S. V. SHvedov. Mirovye tendencii razvitiya mikroelektroniki i mesto respublik Belarus' v etom processe//Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature.– 2012, No. 4, S. 3–8. (In Russian).

[3]. Lepikh Ya. I., Hordiienko Yu. O., Dziadevych S. V., Druzhynyn A. O., Yevtukh A. A., Lienkov S. V., Melnyk V. H., Protsenko V. O., Romanov V. O. Intelktualni vymiriuvalni systemy na osnovi mikroelektronnykh datchykv novoho pokolinnia// Monohrafiya. Odesa: Astroprint.-2011.– 352 s. (In Ukrainian).

[4]. Lepikh Ya. I., Snihur P. O. Filtr na poverkhnevnykh akustychnykh khvyliakh// Vynakhid PU119703 Data podannia zaiavky: 23.10.2017, data, z yakoi ye chynnymy prava: 25.07.2019. (In Ukrainian).

[5]. Ya. I. Lepikh. Determination of the optimal physical and mathematical model and weight functions for calculating the topology of counterpane converters of surface acoustic waves // Sensor Electronics and Microsystem Technologies. 2023 – Vol. 20, No. 1.-P. 11–18. (In Ukrainian).

Стаття надійшла до редакції 22.05.2023 р.

UDC621.37/39:534:621.396.6

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2023.2.282729>

## VHF RADIO PATH WITH INTERMEDIATE FREQUENCY FILTER AND FREQUENCY DETECTOR ON SURFACE ACOUSTIC WAVES

*Ya. I. Lepikh*

Interdepartmental scientific-educational physics and technical center of MES and NAS of Ukraine  
at the Odesa I. I. Mechnikov National University  
E-mail: [ndl\\_lepikh@onu.edu.ua](mailto:ndl_lepikh@onu.edu.ua)

### Summary

VHF radio path is the basic radio-electronic element of many radio technical devices and information and communication systems. Their improvement from the viewpoint of improving electrical and operational characteristics, their stability and reliability is achieved by replacing individual nodes and elements built on new physical principles, in particular, on the basis of functional electronics. The most promising in this regard, as shown by research and the practice of using mass-

produced devices, are acoustoelectronic devices. For example, smartphones have become possible thanks to the use of more than a dozen devices on surface acoustic waves (SAW).

The article applies a new approach to microminiaturization of the VHF radio path with a significant improvement of its main characteristics based on acoustoelectronic elements on SAW. In particular, instead of the intermediate frequency filter (IF), which in most cases is implemented with the help of "coil" products (LC circuits) – CSF (concentrated selection filter), a filter on the characteristic curve is proposed, and instead of the same traditional frequency detector (FD) – a FD with by a phase-shifting delay line (DL).

**Keywords:** VHF radio path, acoustoelectronic devices on surface acoustic waves

УДК 621.37/39:534:621.396.6

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2023.2.282729>

## УКХ РАДІОТРАКТ З ФІЛЬТРОМ ПРОМІЖНОЇ ЧАСТОТИ І ЧАСТОТНИМ ДЕТЕКТОРОМ НА ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЯХ

*Я. І. Леніх*

Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр МОН і НАН України при ОНУ  
імені І. І. Мечникова  
E-mail: [ndl\\_lepikh@onu.edu.ua](mailto:ndl_lepikh@onu.edu.ua)

### Реферат

УКХ радіотракт (РТ) є базовим радіоелектронним елементом багатьох радіотехнічних пристроїв і інформаційно-комунікаційних систем. Удосконалення їх з позицій покращення електричних і експлуатаційних характеристик, їх стабільності і надійності досягається заміною окремих вузлів і елементів побудованими на нових фізичних принципах, зокрема, на основі функціональної електроніки. Найбільш перспективними в цьому відношенні, як показали дослідження і практика використання пристроїв серійного виробництва є акустоелектронні пристрої. До прикладу, смартфони стали можливими завдяки використанню в них понад десятка пристроїв на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ).

В статті застосовано новий підхід до мікромініатюризації УКХ радіотракта з суттєвим покращенням його основних характеристик на основі акустоелектронних елементів на ПАХ. Зокрема, замість фільтра проміжної частоти (ПЧ), який у більшості випадків реалізується з допомогою «моточних» виробів (LC контурів) – ФЗС (фільтр зосередженої селекції) запропоновано фільтр на ПАХ, а замість такого ж традиційного частотного детектора (ЧД) – ЧД з фазозсувною лінією затримки (ЛЗ).

**Ключові слова:** УКХ радіотракт, акустоелектронні пристрої на поверхневих акустичних хвилях

**РІШЕННЯ**  
**ІХ-ї Української наукової конференції**  
**з фізики напівпровідників**

22-26 травня 2023 р.

м. Ужгород

ІХ Українська наукова конференція з фізики напівпровідників проходила в м. Ужгород 22-26 травня 2023 р. Конференція проводилася з ініціативи Національної академії наук України, Міністерства освіти і науки України, Наукової Ради НАН України з проблеми «Фізика напівпровідників і діелектриків» при Відділенні фізики і астрономії НАН України, Українського фізичного товариства, Інституту електронної фізики НАН України, Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, Ужгородського національного університету.

У конференції взяли участь більш ніж 75 учасників, зареєстрованих безпосередньо на конференції та учасників, в режимі онлайн реєстрації та більш ніж 50 студентів без реєстрації та представників академічних установ, вищих навчальних закладів та науково-промислових організацій з усіх регіонів України, наукових установ та університетів з 27 країн: Польщі (12), Німеччини (11), Угорщини (17), Чехії (2), Словаччини (8), Франції (11), Румунії (4), Швеції (1), Великої Британії (2), Італії (17), США (3), Китаю (6), Литви (3), Латвії (3), Ірландії (3), Ізраїлю (2) Канади (2), ОАЕ (1), Азербайджану (3), Португалії (6), Іспанії (4), Туреччини (1), Індії (1) та ін. Загальна кількість поданих матеріалів становила 187, з них було відібрано 22 доповідей зі статусом пленарних та запрошених. Доповіді, представлені за науковими напрямками конференції (нові фізичні явища в об'ємних напівпровідниках, фізичні явища в низько- та квантоворозмірних структурах, фізика напівпровідникових приладів, матеріалознавчі та технологічні аспекти перспективних напівпровідникових матеріалів), охопили актуальні сучасні напрями досліджень в галузі фізики напівпровідників.

З представлених результатів слід відмітити такі теми і доповіді:

1. Фероелектрики (Сегнетоелектрики), фероіоніки: Стріхи М.В. та Морозовської Г.М., Височанського Ю.М.
2. Квантові структури: Євтуха А.А., Назарова О.М.
3. Властивості некрystalічних напівпровідників: Міци В.М., Kokenyesi S.S., Tsiulyanu D.I., Tkáč V.

4. Матеріалознавство: Джагана В.В., Братуся В.Я., Юхимчука В.О., Мах С. Lemme, Кавецького Т.С., Шпортська К.В.

5. Фотовольтаїка, сенсорна тематика, терагерцові прилади: Сизова Ф.Ф., Федоренка Л.Л., Коротеєва В.В.

6. Новітні технології: Кухтарука С., Francis Balestra, Dashevsky Z.M., F. Messina, Marco Cannas.

Обговоривши зроблені на пленарних і секційних засіданнях доповіді, ІХ Українська наукова конференція з фізики напівпровідників констатувала, що програма конференції охопила широкий спектр наукових та технологічних проблем фізики напівпровідників і напівпровідникових приладів, науковий рівень доповідей та представництво конференції відповідають рівню провідних міжнародних наукових конференцій. В Україні збереглися і досить успішно функціонують наукові школи з фізики напівпровідників у наукових колективах Києва, Львова, Харкова, Запоріжжя, Одеси, Дніпра, Дрогобича, Чернівців, Ужгорода, Тернополя, Івано-Франківська, Кривого Рогу, Кременчука, Сум, Луцька, Ніжину та інших міст. Мають місце значні досягнення українських вчених, дослідників і інженерів в розвитку фундаментальних і прикладних досліджень з фізики напівпровідників. Сучасна ситуація науки в Україні потребує зростання наукового потенціалу держави, посилення участі молодих вчених в роботі конференцій, сприяння здійсненню їх наукової діяльності, реалізації творчого потенціалу, надання інформаційної та організаційної підтримки молодим вченим наукових установ, що має стати важливою першочерговою задачею. Також було зауважено, що необхідне більш активне залучення до участі у роботі конференції представників промислових підприємств України та закордонних компаній, розширення співпраці з ними, що, буде сприяти впровадженню наукових розробок в виробництво.

Конференція ухвалила та відмітила наступне: для ефективного розвитку фундаментальних та прикладних робіт з дослідження напівпровідників нагально необхідне значне фінансування, в тому числі і для забезпечення сучасним приладним, технологічним (в першу чергу ростовим) та аналітичним обладнанням, а також компонентною елементною базою. Необхідна більша консолідація зусиль фахівців в проведенні наукових та прикладних досліджень в галузі напівпровідників та напівпровідникових приладів, спрямованих на інтенсифікацію робіт за напрямом оборонних досліджень для створення на їх основі приладів в інтересах Укроборонпрому

та укріплення зв'язків з підприємствами України, які здатні втілювати дані досягнення в продукцію.

Великий внесок членів Наукової Ради НАН України з проблеми «Фізика напівпровідників і діелектриків» при Відділенні фізики та астрономії НАН України, співробітників Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, Ужгородського національного університету, Програмного та організаційного комітетів конференції в організацію та проведення цього наукового форуму.

Було вирішено провести наступну 10-ту конференцію УНКФН-10 у 2025 році. Місцем проведення обрати місто Ужгород на базі Ужгородського національного університету.

В рамках конференції проведено виїзну сесію наукової ради з проблеми «Фізика напівпровідників і діелектриків» при ВФА НАН України. На сесії був розглянутий поточний стан справ та плани роботи на найближчий час.

Співголова конференції,  
Заст. директора ІФН ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ  
академік НАН України



Олександр БЄЛЯЄВ

Співголова конференції,  
ректор УжНУ д.м.н., проф.



Володимир СМОЛАНКА

м. Ужгород

26 травня 2023 р.

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

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

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

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

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

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

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

### Рукописи надсилати за адресою:

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

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

Здійснюється анонімне рецензування рукописів статей.

## Правила підготовки рукопису:

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

Авторське право переходить Видавцю.

Титульний аркуш:

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

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

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

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

5. Анотація: до 1000 символів.

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

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

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

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

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

Після тексту реферату з абзацу розміщуються ключові слова.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

Відхилені статті не повертаються.

#### *ДО УВАГИ АВТОРІВ*

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

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

# INFORMATION FOR AUTHORS

## THE REQUIREMENTS

## ON PAPERS PREPARATION

---

---

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

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

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

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

results essence and their novelty understanding. The authors should avoid the new terms and narrowprofile jargon phrase unreasonable introduction.

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

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

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

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

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

*Manuscripts of articles anonymous reviewing  
is carried out*

**The manuscript preparation rules:**

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

Copyright transfer to the Publisher.

Title Page:

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

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

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

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

5. Abstract: up to 1000 characters.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Not accepted manuscripts will not be returned.

***TO AUTHOR ATTENTION***

*International agency ISSN has established our Journal shortcut –  
«Sens. elektron. mikrosist. tehnol.»*

*We ask you in your references and article bibliographic dates  
use such name as on it the reference to your article will be carried out.*

*Комп'ютерна верстка – В. Вітвицька*

Підписано до друку 28.06.2023 р. Формат 60×84/8.  
Ум.-друк. арк. 8,84. Тираж 50 прим.  
Зам. № 2600.

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

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

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