

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

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

**СЕНСОРА
ЕЛЕКТРОНІКА
І МІКРОСИСТЕМНІ
ТЕХНОЛОГІЇ
2020 — Т. 17, № 2**

Науково-технічний журнал

Заснований 13.11.2003 року.
Виходить 4 рази на рік

УДК 681.586

Засновник Одеський національний
університет імені І. І. Мечникова

За підтримки Українського
фізичного товариства

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ
№ 8131

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

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

Видається за рішенням Вченої ради
Одеського національного університету
імені І. І. Мечникова
Протокол № 8 від 26.05.2020 р

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

**SENSOR
ELECTRONICS
AND MICROSYSTEM
TECHNOLOGIES
2020 — VOL. 17, № 2**

Scientific and Technical Journal

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

UDC 681.586

Founded by Odesa I. I. Mechnikov
National University

At support of the Ukrainian Physical Society

Certificate of State Registration КВ № 8131

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

The Journal is reviewed by RJ «Djerelo»
and RJ ICSTI (Russia), is included in the
International Base Index Copernicus, RSCI,
Cross Ref. Elibrary, Directory of Research
Journal Indexing, General Impact Factor
EBSCO

Publishes on the resolution of Odesa
I. I. Mechnikov National University
Scientific Council.
Transaction № 8, 26.05.2020

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

Редакційна колегія

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

О. Є. Беляєв (Київ, Україна)
І. В. Блонський (Київ, Україна)
В. Г. Вербицький (Київ, Україна)
Б. М. Галкін (Одеса, Україна)
Ю. В. Гуляєв (Москва, Росія)
Ю. О. Гунченко (Одеса, Україна)
А. Д'Аміко (Рим, Італія)
Н. Джаффрезік Рене (Ліон, Франція)
С. В. Дзядевич (Київ, Україна)
Г. В. Єльська (Київ, Україна)
В. О. Іваниця (Одеса, Україна)
О. М. Калашніков (Ноттінгем, Велика Британія)
О. В. Коваленко (Дніпро, Україна)
І. А. Кравченко (Одеса, Україна)
Вілко Лантто (Оулу, Фінляндія)
В. Г. Литовченко (Київ, Україна)
С. В. Ленков (Київ, Україна)
Є. В. Малахов (Одеса, Україна)
І. Г. Неизвестний (Новосибірськ, Росія)
С. М. Рябченко (Київ, Україна)
О. П. Солдаткін (Київ, Україна)
М. Ф. Стародуб (Київ, Україна)
Й. М. Стахіра (Львів, Україна)
М. В. Стріха (Київ, Україна)
М. В. Ткач (Чернівці, Україна)
О. В. Третяк (Київ, Україна)
А. Чаудхрі (Чандігар, Індія)
Є. М. Шерегій (Жешув, Польща)

Editorial Board

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

A. E. Belyaev (Kiev, Ukraine)
I. V. Blonskii (Kiev, Ukraine)
V. G. Verbitsky (Kiev, Ukraine)
B. M. Galkin (Odesa, Ukraine)
Yu. A. Gulyaev (Moscow, Russia)
Yu. O. Gunchenko (Odesa, Ukraine)
A. D'Amiko (Rome, Italy)
N. Jaffrezik Renault (Lyon, France)
S. V. Dzyadevych (Kiev, Ukraine)
G. V. Elskaya (Kiev, Ukraine)
V. O. Ivanytsia (Odesa, Ukraine)
O. M. Kalashnikov (Nottingham, United Kingdom)
O. V. Kovalenko (Dnipro, Ukraine)
I. A. Kravchenko (Odesa, Ukraine)
Vilho Lantto (Oulu, Finland)
V. G. Litovchenko (Kiev, Ukraine)
S. V. Lenkov (Kiev, Ukraine)
E. V. Malakhov (Odesa, Ukraine)
I. G. Neizvestny (Novosibirsk, Russia)
S. M. Ryabchenko (Kiev, Ukraine)
A. P. Soldatkin (Kiev, Ukraine)
N. F. Starodub (Kiev, Ukraine)
J. M. Stakhira (Lviv, Ukraine)
M. V. Strikha (Kiev, Ukraine)
M. V. Tkach (Chernivtsi, Ukraine)
A. V. Tretyak (Kiev, 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

V. M. Loktev

THE MAIN RESULTS OF RESEARCH
IN PHYSICS IN UKRAINE
FOR 2015 – 2019 4

V. M. Loktev

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ
В ГАЛУЗІ ФІЗИКИ В УКРАЇНІ
ЗА 2015 – 2019 РР.

Yu. A. Kruglyak, M. V. Strikha

PHYSICS OF NANOTRANSISTORS:
ELECTRON SCATTERING AND MOSFET
TRANSMISSION MODEL 16

Ю. О. Кругляк, М. В. Стріха

ФІЗИКА НАНОТРАНЗИСТОРІВ:
РОЗСІЯННЯ ЕЛЕКТРОНІВ І МОДЕЛЬ
ПРОХОДЖЕННЯ MOSFET

Біосенсори
Biosensors

*D. O. Mruga, D. Yu. Kucherenko,
T. O. Borisova, S. V. Dzyadevych,
O. O. Soldatkin*

DEVELOPMENT AND OPTIMIZATION OF
CONSTRUCTION OF AMPEROMETRIC
BIOSENSOR BASED ON THE
GLUTAMATE OXIDASE FOR
DETECTION OF GLUTAMATE
IN THE SERUM SAMPLES 35

*Д. О. Мруга, Д. Ю. Кучеренко,
Т. О. Борисова, С. В. Дзядевич,
О. О. Солдаткін*

РОЗРОБКА ТА ОПТИМІЗАЦІЯ
КОНСТРУКЦІЇ АМПЕРОМЕТРИЧНОГО
БІОСЕНСОРА НА ОСНОВІ

ГЛУТАМАТОКСИДАЗИ ДЛЯ АНАЛІЗУ
ГЛУТАМАТУ В СИРОВАТЦІ КРОВІ

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

I. M. Kupchak, D. V. Korbutyak, N. F. Serpak

NATIVE DEFECTS IN CdZnS QUANTUM
DOTS 50

I. M. Купчак, Д. В. Корбутяк, Н. Ф. Серпак

ВЛАСНІ ДЕФЕКТИ В КВАНТОВИХ
ТОЧКАХ CdZnS

Сенсори та інформаційні системи
Sensors and information systems

*V. G. Melnyk, P. I. Borschov, V. K. Beliaev,
O. D. Vasylenko, O. L. Lameko, O. V. Slitskiy*

IMPROVEMENT GENERATING OF THE
TEST SIGNALS FOR DETERMINATION
OF THE IMPEDANCE PARAMETERS
IN WIDE FREQUENCY RANGE 60

*V. G. Мельник, П. І. Борщов, В. К. Бєляєв,
О. Д. Василенко, О. Л. Ламеко,
О. В. Сліцький*

УДОСКОНАЛЕННЯ ГЕНЕРУВАННЯ
ТЕСТОВИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ
ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ
ІМПЕДАНСУ В ШИРОКОМУ
ДІАПАЗОНІ ЧАСТОТ

**Персоналії. До 70-річчя члена-
кореспондента НАН України Блонського
Івана Васильовича 73**

**XI Міжнародна наукова конференція
"Функціональна база наноелектроніки"
14 вересня - 19 вересня 2020 р, м. Одеса,
Україна 77**

**Інформація для авторів
Вимоги до оформлення статей
у журнал 79**

**Information for authors
The requirements on papers
preparation 82**

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/10.18524/1815-7459.2020.2.205820>

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ В ГАЛУЗІ ФІЗИКИ В УКРАЇНІ ЗА 2015 – 2019 рр.

В. М. Локтєв

Відділення фізики та астрономії Національної академії наук України
e-mail: vfa@nas.gov.ua

Від редакції

Вже стало доброю традицією друкувати у нашому мультидисциплінарному журналі, що входить до трьох списків ДАК (фізико-математичні, технічні і біологічні науки), у якому друкуються статті, що зараховуються як фахові при захисті докторських і кандидатських дисертацій, друкувати статті за результатами звітної доповіді академіка-секретаря Відділення фізики і астрономії Національної академії наук України.

Як і в попередні роки академік Вадим Михайлович Локтєв люб'язно погодився опублікувати статтю за матеріалами його звітної доповіді за період 2015 – 2019 роки, за що Редакція висловлює йому щирі вдячність.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ В ГАЛУЗІ ФІЗИКИ В УКРАЇНІ ЗА 2015 – 2019 рр.

В. М. Локтєв

Анотація. У статті на основі аналізу наукової діяльності інститутів Відділення фізики і астрономії Національної академії наук України представлені найбільш вагомими наукові результати фундаментальних і прикладних досліджень в різних наукових напрямках фізики і астрономії за період 2015 – 2019 рр. значна частина яких затребувана світовою науковою спільнотою.

Ключові слова: Національна академія наук України, наука, фізика, досягнення, проблеми

THE MAIN RESULTS OF RESEARCH IN PHYSICS IN UKRAINE FOR 2015 - 2019

V. M. Loktev

Abstract. The article, based on the analysis of scientific activity of the institutes of the Department of Physics and Astronomy of the Ukraine National Academy of Sciences, presents the most important scientific results of fundamental and applied researches for 2015 – 2019 in various scientific fields of physics and astronomy a significant part of which is in demand by the world scientific community.

Keywords: National Academy of Sciences of Ukraine, science, physics, achievements, problems

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ В УКРАИНЕ ЗА 2015 – 2019 гг.

V. M. Loktev

Аннотация. В статье на основе анализа научной деятельности институтов Отделения физики и астрономии Национальной академии наук Украины представлены наиболее весомые научные результаты фундаментальных и прикладных исследований в разных научных направлениях физики и астрономии за период 2015 – 2019 гг. значительная часть которых затребована мировым научным сообществом.

Ключевые слова: Национальная академия наук Украины, наука, физика, достижения, проблемы

*Вивчення природи з метою її пізнання –
одна з речей, що спроможні трохи підняти
людське життя над рівнем фарсу,
додавши до нього риси справжньої драми.
/Стівен Вайнберг, Нобелівський лауреат з фізики/*

Фундаментальні результати нашого відділення. При цьому кожний з них має авторів, проте їх не називатиму, бо таких часом багато і не завжди можна визначити основних.

Інститут фізики

– Вперше у світі реалізовано інтерференцію пучків світла різного кольору з використанням монохроматичних і некогерентних лазерних імпульсів фемтосекундного діапазону. Саму інтерференцію спостерігати неважко, а от записати – проблема, бо картинка рухається зі швидкістю світла або близької до неї. Тим не менш, саме завдяки імпульсному характеру

пучків отримано стаціонарну як статичну, так і динамічну голограми і гелій-неоновим лазером відтворено її зображення.

Робота вийшла в журналі *Nature Communications* з IF=12.

– Наступний результат, без сумніву, відомий, бо різні його етапи також були серед наших досягнень – отримання поверхонь з керованими властивостями за рахунок покриття різними молекулами. У даному випадку мова йде про структурну організацію молекул берберину і фулерену C_{60} , а також їхніх комплексів. Це важливо для з'ясування механізмів протипухлинної дії різних препаратів.

Результати оприлюднені в журналі *Pharmaceutics* з IF=4.2.

– В метал-органічних іридєвих комплексах, які можуть слугувати оптичними обмежувачами інтенсивності світіння, спостережена суб-пікосекундна швидкість синглет-триплетних переходів, що дало змогу встановити енергетичну структуру цих комплексів.

Робота вийшла в *Journal Physical Chemistry* з IF=4.3.

**Інститут фізики напівпровідників
ім. В. Є. Лашкарьова**

– Експериментально доведено, що імплантація Ag в короткоперіодні надгратки AlN/GaN викликає релаксацію системи до більш однорідного розподілу енергії зв'язків, тобто механічних напружень, в окремих шарах цієї гетероструктури. Показано, як зміною концентрації Ag можна керувати оптичними властивостями таких гетероструктур, включаючи частоту випромінювання.

Робота вийшла в журналі *Applied Nanoscience* з IF=3.2.

– Завдяки вивченню поведінки гарячих електронів у нітридних матеріалах на основі GaN в сильних електричних і магнітних полях побудовано теорію електронного транспорту в цих матеріалах і розраховано динамічну провідність, в якій виявлені вікна, де її реальна частина від'ємна. Вони сигналізують про нестійкість електронного газу, коли система може або генерувати, або підсилювати електромагнітні поля ТГц діапазону.

Робота вийшла в *Journal of Applied Physics* з IF=2.3.

**Інститут металофізики
ім. Г.В. Курдюмова**

– Вперше виявлено і вивчено мартенситне перетворення у багатокомпонентних сплавах з високою ентропією змішування, що свідчить про можливість створення нових матеріалів з пам'яттю форми, які зберігають стабільні характеристики у значному діапазоні температур. Це важливо для багатьох застосувань, оскільки такі сплави мають більш високу міцність та меншу дислокаційну пластичність.

Робота вийшла в журналі *Shape memory and Superelasticity*.

– На прикладі 2D і 3D карбін-графенових

наноструктур, які мають перспективи застосування у стрейнтроніці, встановлено існування ключового чинника, який визначає тривкість їхніх контактних зав'язків в умовах термосилових навантажень. Його використання дозволяє зрозуміти природу різниці між довговічністю і рівнем механічного навантаження 2D та 3D нанoeлементів. В результаті, встановлено, що 2D структури мають більш високу довговічність в області малих механічних навантажень, а 3D, навпаки, за високих навантажень.

Робота вийшла в *European Physics Journal Plus* з IF=2.6.

**Інститут теоретичної фізики
ім. М.М. Боголюбова**

– Сформульовано умови, за яких у немагнітному рідинному кристалі між однаковими колоїдними частинками виникає взаємодія кулонівського типу, яка має притягальний характер, що вже знайшло підтвердження в експерименті.

Робота вийшла в журналі *Scientific Reports* з IF=4.

– Для діраківських систем, в яких існує послідовність топологічних фазових переходів Ліфшиця, передбачено низькотемпературний ефект квантування амплітуди піків розрахованої на одну частинку ентропії як функції хімічного потенціалу і запропоновано схему експерименту з перевірки цього ефекту.

Робота вийшла у тому ж журналі *Scientific Reports* з IF=4.

– Показано, що в релятивістських ядронних зіткненнях може виникати синхротронне випромінювання фотонів з високим рівнем поляризації, а також лептонів, що може свідчити на користь існування невзаємодіючих кварків та глюонів. Висловлено думку, як спостерігати цей ефект, вимірюючи анізотропію кутового розподілу лептонів.

Робота вийшла в *Europhysics Journal A* з IF=2.5.

– При виконанні власної програми досліджень на Космічному телескопі Габбла відкрито карликову галактику з найбільшою втратою іонізуючого випромінювання, яка становить 72 % від випромінювання, що утворюється в

галактиці. Це у 5 разів вище за середню втрату такого випромінювання, необхідну для вторинної іонізації раннього Всесвіту в епоху формування перших галактик.

Робота вийшла в журналі *Monthly Notices of the Royal Astronomic Society* з IF=5.2.

Справедливості заради, останній результат має належати і ГАО, де ці дослідження розпочиналися і певний час велися, але закінчувалися вони в ІТФ ім. М.М. Боголюбова, звідки цей результат пішов до друку.

Головна астрономічна обсерваторія

– Здійснено комп'ютерне моделювання еволюції зоряної системи кулястого скупчення з числовим розділенням в 1 млн частинок, що дало змогу дослідити у нашій Галактиці тривалу динамічну й фотометричну еволюцію кількох модельних кулястих скупчень. Цим вперше підтверджено наявність у таких скупченнях підсистеми чорних дір.

Робота вийшла в журналі *Monthly Notices of the Royal Astronomic Society* з IF=5.2 і за 3 роки отримала більше 150 посилань.

– Розроблено математичні методи моделювання даних і обробки зображень позагалактичних джерел, за рахунок чого суттєво підвищена точність класифікації галактик і побудови профілів яскравості/температури рентгенівських джерел. Відтворено також структуру Всесвіту за зоною уникнення Молочного Шляху.

Результати вийшли в журналі *Monthly Notices of the Royal Astronomic Society* з IF=5.2 та *Astrophysical Journal* з IF=8.4.

– Виявлено невідомі раніше варіації температури спокійної фотосфери Сонця протягом 11-річного циклу. Отримані дані є важливими для прогнозу не тільки сонячної активності, а й поведінки біосфери Землі разом з її соціально-економічним станом.

Робота вийшла в кембриджському журналі *Astronomical and Astrophysical Transactions* з IF=0.8.

Стосовно останніх вимірювань хотів би наголосити, що всі вони проводились на модернізованому силами ГАО НАН України сонячному телескопі Ернеста Гуртовенка, що зробило цей інструмент унікальним і найкра-

ще пристосованим для спостережень варіацій спокійної атмосфери Сонця на великих (роки) часових проміжках.

Інститут магнетизму

– Яскравий і вже визнаний результат отримано разом з зарубіжними колегами: показано, що у феримагнетках, які знаходяться поблизу температури спінової компенсації, зростає частота його прецесії. Виходячи з цього, запропоновано схему наногенератора, який завдяки використанню таких феримагнітних частинок генерує в області від ГГц до ТГц, що відкриває можливість для створення високочастотних спінтронних приладів.

Робота вийшла в журналі *Physical Review B* з IF=3.7.

– Без використання принципу Боголюбова послаблення кореляцій отримано точне замкнене еволюційне рівняння для систем, що взаємодіють з термостатом. Зокрема, розглянуто класичну задачу полярона і показано, що з часом вплив початкових умов на його рух зникає, що фактично доводить справедливість припущення Боголюбова. Цікаво, що цією задачею займалися багато великих теоретиків – Л. Ландау, Р. Фейнман, але з експериментом узгоджується лише результат, про який йдеться.

Робота вийшла в *Journal of Statistical Physics* з IF=1.5.

Інститут прикладних проблем фізики і біофізики

– Створено чутливий до випромінювання з довжиною хвилі понад 4 мкм, плівковий матеріал. Будучи розташованим у спеціальному хвилеводі, він дозволяє значно збільшити довжину оптичного шляху, чим піднести сенсорну спроможність системи.

Робота вийшла в *Журнале прикладной спектроскопии* з IF=1, є також три патенти.

– Запропоновано спектроскопічний метод визначення відносної концентрації карбоксигемоглобіну в артеріальній крові людини, що може застосовуватися при лікуванні отруєння чадними газами.

Робота вийшла в журналі *Lasers in Medical Sciences* з IF=2.

МЦ «Інститут прикладної оптики»

– Разом з Вільнюським університетом (Литва) створено новий оптичний генератор – фотонно-кристалічний мікрочиповий лазер. Показано, що наявність у фотонному кристалі кутової забороненої зони, суттєво (у 4 рази) збільшує яскравість його світіння. Розрахунки показують, що підбором параметрів кутового фільтра її можна збільшити ще майже на два порядки.

Робота вийшла в журналі *Scientific Reports* з IF=4.

– У кооперації з Чосанським університетом (Південна Корея) розроблено оригінальний метод синтезованих фазових об'єктів, який застосовано для інваріантного до зміни масштабу та повороту об'єктів їхнього розпізнавання в оптико-цифровій системі. Порівняльним аналізом доведено, що новий метод є більш ефективним за інші.

Робота вийшла у 2016 році як Розділ 3 у колективній монографії *Pattern Recognition-Analysis and Applications* видавництва *InTech* (Лондон). Я не знайшов, як цей розділ цитується окремо, але на березень поточного року завантажувався він 904 рази.

Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б. І. Веркіна

– В усіх смислах важливим є відкриття 3D графену, або карбонових стільників, які пронизані каналами, стінки яких утворені графеном. Цьому сприяє те, що в них атоми вуглецю гібридизовані не тільки через sp^2 зв'язок, а й через sp^3 , який притаманний алмазу. Сорбційна ємність нових структур перевищує всі відомі, що може знайти широке використання у накопичувачах різних елементів.

По цим результатам вийшло дві роботи – в *Physical Review Letters* з IF=9.3 і *Carbon* IF=7.5, а число посилань за три роки перевищило 100.

– Красивий результат отримано спільно з ХНУ ім. В.Н.Каразіна – спостереження електромагнітного випромінювання абрикосовськими вихорами, які перетинають гетероструктуру, складену з надпровідних і діелектричних шарів. В експерименті рухалася вихорова ґратка, коли випромінювання окремих

вихорів взаємно підсилюється. Його частота відповідає радіодіапазону, який неважко перекрити зміною струму.

Додам, що керовані нановипромінювачі мають численні застосування як у громадянському, так і оборонному секторах нашої промисловості.

Робота вийшла в журналі *Nature Communications* з IF=12.

Інститут радіофізики і електроніки ім. О. Я. Усикова

– Вивчено резонансне поглинання електромагнітних хвиль, пов'язане зі скінченною величиною квазічастинкової провідності, у шаруватому надпровіднику. Визначено умови, за яких енергія падаючих хвиль поглинається у пластині та отримано залежність їхнього поглинання від кута падіння. Результат є важливим для використання в атенюаторах.

Робота вийшла в журналі *Physical Review B* з IF=3.7.

– На основі ефекту муару, який полягає у виникненні періодичного узору при накладенні різних 2D структур, створено метаматеріал. Показано, що в ньому збуджуються поверхневі електромагнітні хвилі, що поширюються у напрямку, який задається параметрами структури. Зокрема, в площині гексагонального метаматеріалу реалізовано поширення хвилі, перпендикулярне до осі збуджуючого пучка.

Робота вийшла в *Progress in Electromagnetics Research M* з IF=0.35.

Радіоастрономічний інститут

– Виявлено нове явище у радіовипромінюванні Сонця – розпад сплеску III типу на два інших цього ж типу, що стало можливим, завдяки одночасним спостереженням на інструментах ГУРТ та УРАН-2 у діапазоні частот 8-80 МГц. Окремо зауважу, що цей ефект довго чекав на своє відкриття, бо був передбачений авторами 20 років тому.

Робота вийшла в *Astrophysical Journal* з IF=8.4.

Додам також, що об'єднання роботи УТР-2 і ГУРТ само є досягненням, бо вимірювання набули іншого рівня. Наприклад, вдалося зареєструвати пульсари і дослідити змінність їхнього радіовипромінювання. Робота

«об'єднаного» інструменту тільки починається, і ми чекаємо від нього нових досягнень.

– Завдяки організації і здійсненню багаторічних неперервних спостережень природних наднизькочастотних полів спочатку в Антарктиці, а згодом в Арктиці, зафіксовано відгук трьох глобальних резонаторів – шуманівського, іоносферного альфенівського і магнітосферного – на 11-річний цикл сонячної активності та продемонстровано можливість їхнього використання як індикаторів стану навколоземного простору, зокрема його геомагнітної поведінки, а також змін температури на земній кулі.

Робота вийшла в журналі *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*.

– Відкрито новий тип ліній декаметрового діапазону, а саме: рекомбінаційні лінії поглинання водню з головними квантовими числами порядку 700, що відкриває можливість для побудови нової моделі міжзоряного середовища і космічних променів.

Робота вийшла у відомому англomовному журналі *Odessa Astronomical Publications*, який виходить з 1946 року з періодичністю 1 том на рік, тому IF він не має.

Інститут іоносфери

– Відкрито сильну модуляцію іоносферно-плазмової взаємодії відносно слабкими геокосмічними бурями, що дало змогу розв'язати 50-літню проблему щодо кількості іонів H^+ в атмосфері Землі. Тепер ця кількість, що вираховується за спеціальною моделлю і визначається як міжнародний стандарт, має бути змінена в бік суттєвого збільшення.

Робота вийшла в *Journal of Geophysical Research: Space Physics* з IF=3.

Донецький фізико-технічний інститут ім. О. О. Галкіна

– Вперше із застосуванням голографічної техніки виявлено тонку структуру процесу намагнічування гексагональної ґратки скіріміонів – топологічно стійких спінових утворень, які наразі дуже активно вивчаються. Спостережено намагніченість окремого скіріміона та її розподіл як всередині нього, так і між скіріміонами, що утворюють ґратку. Здійснено мікромагнітне моделювання, яке добре відтворює

спостереження.

Робота вийшла в журналі *Applied Physics Letters* з IF=3.5.

Інститут фізики конденсованих систем

– На основі комп'ютерного моделювання висловлено гіпотезу щодо природи низької в'язкості твердого ядра Землі. Фактично розглянуто динамічні процеси, які мають місце у кристалічному Fe при температурах і тисках, характерних саме для земного ядра, і встановлено, що частина іонів Fe об'ємо-центрованої кубічної ґратки починає колективний стрибко-подібний кільцевий рух в площині (111), що спричинює додаткове затухання звукових хвиль і зниження в'язкості кору ядра, які будучи відомими з спостережень явищами, не мали своєї фізичної інтерпретації.

Робота вийшла в журналі *Nature Communications* з IF=12.

– Розкрито потенційні можливості резонансного непружного розсіяння рентгенівських променів для прямого вимірювання такої важливої характеристики твердих тіл, як електронно-пружна взаємодія та її залежність від хвильового вектору. Фактично запропоновано нову методику для експериментального вивчення цієї взаємодії.

Робота вийшла в журналі *Physical Review X* з IF=14 і таке враження, що у цій п'ятирічці він найбільший, а в минулій таким був IF=30 від *Science*.

– На основі вивчення кінетики фотоізомеризації деяких полімерних матеріалів показано, що поглинання ними поляризованого світла є еквівалентним існуванню деякого потенціалу, який викликає їхню переорієнтацію. Розраховано параметри такого ефективного потенціалу залежно від оптичних і еластичних властивостей полімерів.

Робота вийшла в журналі *Physical Chemistry Letters* з IF=7.2.

Інституті електронної фізики

– На основі досліджень станів халькогенів (S, Se, Te), збуджених електронами контрольованої енергії, встановлено, що пари цих елементів містять переважно кластери з кількістю атомів від 2 до 8, а атомарна складова не перевищує відсотків. Вперше виміряні спектри

нових кластерів, а також виявлено двозарядні іони S^{++} , Se^{++} і Te^{++} , для яких розраховані перерізи їхнього утворення. Вивчення таких і супутніх явищ, а також знання атомних констант має практичну цінність, адже халькогени приймають участь у багатьох хімічних і біологічних процесах.

Робота вийшла в *European Physical Journal D* з $IF=1.3$.

– Доведено, що ядерна матерія демонструє властивості, характерні для твердих тіл. Зокрема, встановлено, що при поділі атомних ядер проявляються аномалії термодинамічних параметрів ядер-продуктів, пов'язані зі зміною симетрії системи нуклонів. Розрахунки було проведено на прикладі ізотопу ^{235}U , в рамках кольорової статистики ядерної матерії, запропонованої для дослідження упорядкування уламків поділу. Показано, що їхня питома теплоємність при «нагріванні» вихідного ядра проявляє пікоподібну залежність при температурах 1-2 МеВ, що нагадує поведінку термодинамічних параметрів у твердому тілі в області фазових переходів II-го роду, викликаних зміною певної симетрії. І якщо у ядерній матерії явища типу переходів I-го роду спостерігалися, то названий результат є наразі передбаченням.

Робота вийшла в журналі *Physical Review C* з $IF=2$.

На цьому перелік кращих фундаментальних результатів наших установ за останні роки завершено. Не буду їх коментувати, але не можу не відмітити їхній доволі високий якісний рівень і різноманітність журналів, де вони оприлюднені, причому приблизно третина з першого, найбільш авторитетного, квартілю, що не може не тішити. Нам, справді, є чим пишатися, і цей факт є не тільки приємним, а й, гадаю, важливим.

Зупинюсь коротко на **прикладних дослідженнях**, які також досить успішно ведуться в установах відділення і низка результатів яких знайшла своє втілення у конкретних застосуваннях і виробач. При цьому деякі з них демонструю рисунками.

Так, в ІФ розроблено, запатентовано і впроваджено у виробництво технологію виготовлення метал-водо-полімерного композиту, який

знищує бактерії та деякі грибки, без шкоди людському організму (рис. 1).



Рис. 1. Приклади гелеподібних і рідинних антисептиків широкого спектру дії

В ІФН розроблено технологію і створено ділянку для виробництва фотоприймачів ІЧ діапазону, на якій для київського Казенного підприємства «Арсенал» виготовлено дослідну партію приладів, що обіцяє створення в Україні власного виробництва головок для наведення ракет різних типів і призначень (рис 2).

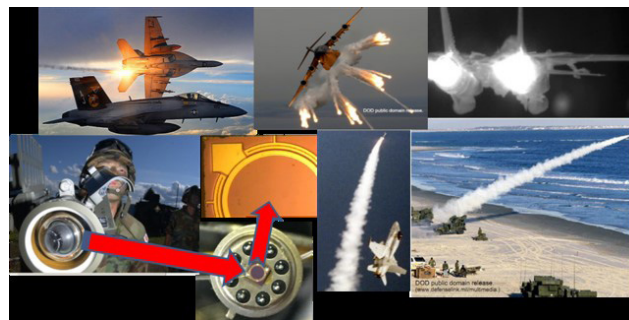


Рис. 2. Застосування ІЧ фотоприймачів в різних виробач і ситуаціях

В ІМФ розроблено загальну концепцію та технологічний підхід до створення з титанових сплавів багатошарових структур з метою їхнього використання як елементів броньового захисту. Експериментальними дослідженнями доведено суттєву перевагу нових матеріалів перед тими, що дотепер використовувалися у воєнній техніці (рис. 3). Суттєво, що результати отримано в рамках програми «НАТО заради

миру» у співробітництві з американськими колегами, які наразі займаються заявкою щодо патенту.

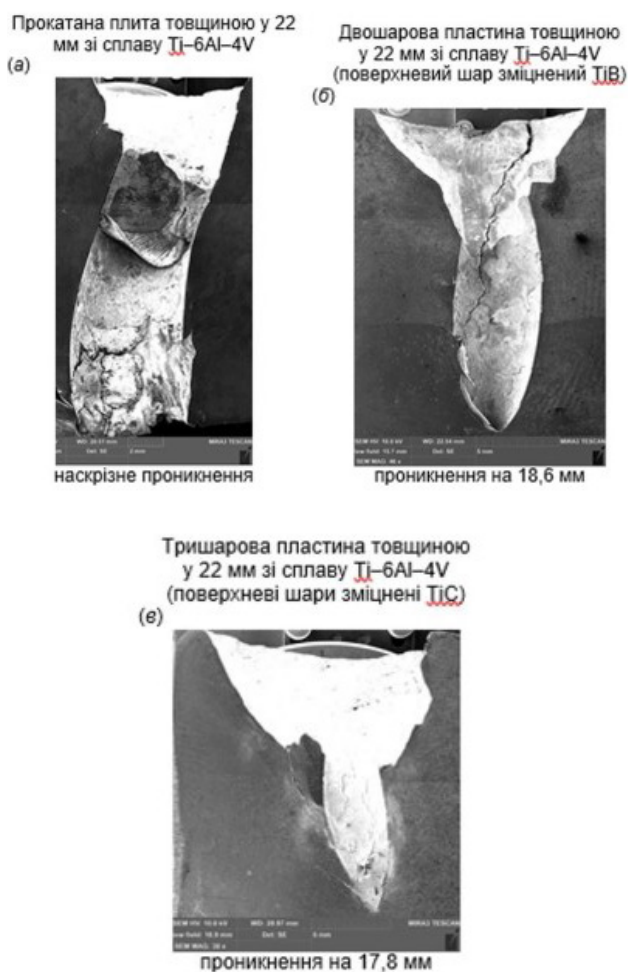


Рис. 3. Порівняння результатів балістичних випробувань пластин титанового сплаву VT6 (а) та титанового сплаву VT6 з металоматричними композитами (б) і (в); випробування бронебійно-запалювальними кулями Б-32 калібру 7,62×54 мм з кінетичною енергією у 3500–3800 Дж

До речі, результат вийшов у *Journal of Material Processing Technology* з IF=4.2.

В ГАО створено наземний комплекс оптично-цифрової розвідки (рис. 4), призначений для виявлення на великих відстанях нерухомих і рухомих об'єктів та визначення їхніх параметрів. Рішенням Воєнно-наукової ради ЗСУ прилад рекомендовано для виробництва на тому ж підприємстві «Арсенал».



Рис. 4. Автоматизований наземний комплекс дальньої оптично-цифрової розвідки

ДонФТІ запустив пілотну лінію з виробництва сертифікованих нанопорошкових оксидних систем, які мають широкий спектр застосувань – знезараження повітря, модифікація конструкційних матеріалів тощо. Крім того, розроблено автоматизовану систему оцінки термограм молочних залоз (рис. 5). Це доповнення до раніше створеного томографа значно полегшує і прискорює тестування великої кількості пацієнтів.



Рис. 5. Термограф для масового обстеження жінок

У ФТІНТ виявлено немонотонну температурну залежність теплового розширення кремній-оксидного гелю, який використовується для теплоізоляції космічних апаратів. З'ясовано природу цього явища, яке може призводити до руйнування теплозахисту, і сфор-

мульовано пропозиції щодо створення більш надійних теплозахисних сумішей.

У РАІ розроблено і виготовлено радіолокатор з цифровою обробкою сигналів для виявлення і класифікації малорозмірних об'єктів на земній і морській поверхнях, який отримав рекомендацію для використання в інтересах МО України (рис. 6).

Цей же інститут забезпечив функціонування розташованого на острові Свальбард (Норвегія) високо- і наднизькочастотного обладнання, дані неперервних спостережень якого

виводяться на відкритий сайт інституту. При цьому грозова активність, зміна температур, поведінка іоносфери тощо створеним багатопозиційним інтерферометром Антарктида-Україна-Арктика контролюється у земному масштабі (рис. 7).

Перелік можна продовжувати, але за браком часу згадаю лише одне – вже впроваджену інформаційну технологію кольорового друку, яку розроблено в ІФКС. Вона виходить з принципово нового підходу до синтезу кольорів на відбитку, де кожна точка зображення друку-

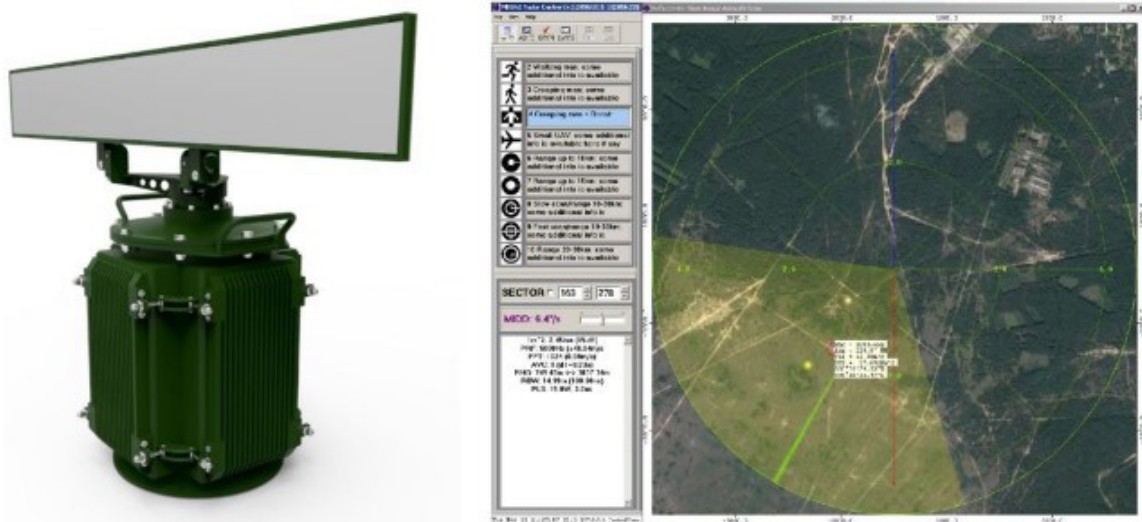


Рис. 6. Польовий радіолокатор (зліва) і вигляд спостережуваного об'єкта та його характеристик на екрані (справа)

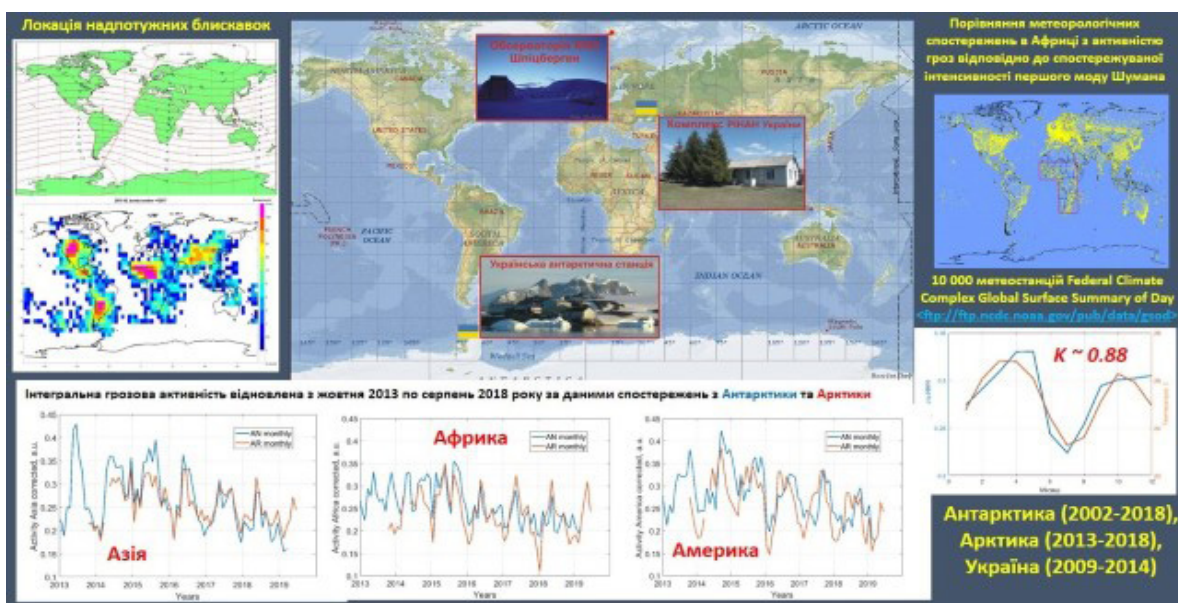


Рис. 7. Планетарна діагностика температури та грозової і геомагнітної активності

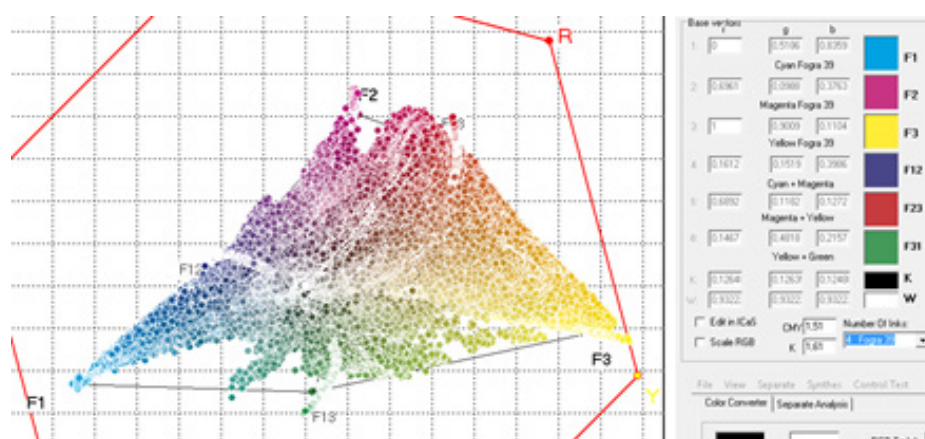
ється лише трьома кольорами, один з яких є чорним. Як підтверджено у реальних умовах, такий друк економить понад 50% кольорових фарб, що суттєво здешевлює виробництво при збереженні його високої якості (рис. 8).

До прикладної роботи Відділення може також віднести відчутну і результативну роботу його установ зі збільшення у потужності і розширення областей застосувань вітчизняної грід-структури, якою в академії керує віце-президент і член нашого відділення А.Г. Загородній. Зараз грід-кластери працюють практично в усіх наших установах, ними користуються й інші особи – як юридичні, так і фізичні. В якості прикладу її успішного використання наведу хоча б обробку даних, що постійно отримуються на Великому адронному колайдері, що дозволило нашим науковцям зайняти свою нішу серед величезної кількості бажаючих долучитися до його роботи. Наразі також розпочалася робота по створенню і запровадженню

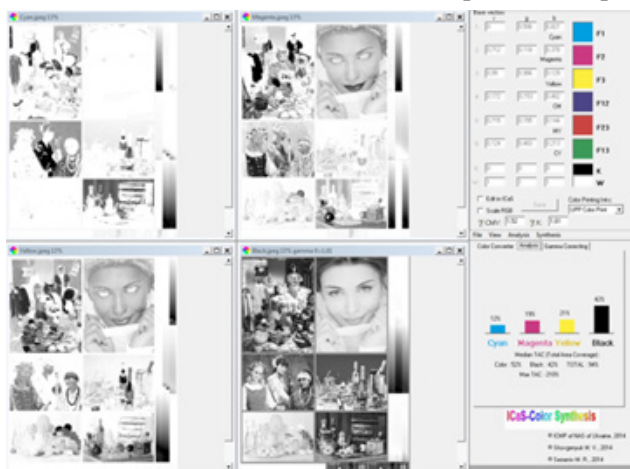
більш сучасної хмарної технології.

Про міжнародне співробітництво, гадаю, окремо говорити не треба – його приклади називалися серед наукових результатів. Як і має бути, воно містить як спільні дослідження і публікації, тобто фундаментальну складову, так і прикладну – розробки або конструкційних і функціональних матеріалів з наперед заданими властивостями, або технологій, які готові для використання в умовах реального виробництва.

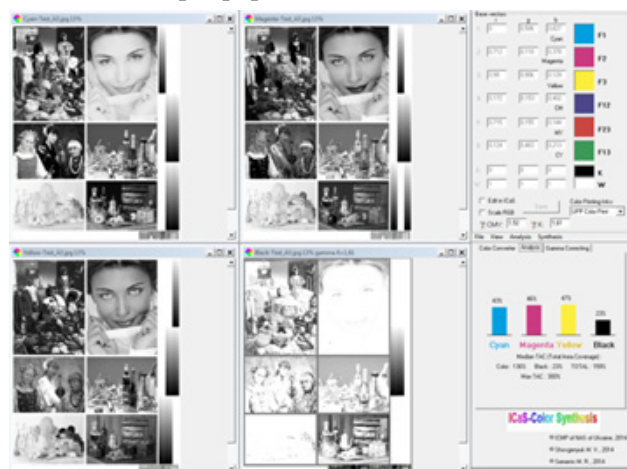
Заключна частина доповіді зазвичай присвячується перспективам розвитку нашого відділення та наук, якими опікуються його установи. І хоча робити прогнози навіть у спокійні часи є справою невдячною, тепер, коли ми «взяли» паузу, викликану коронавірусним карантинном, що охопив весь світ, вона особливо ненадійна, а, може, й взагалі неможлива. Але, як не дивно, сама епідемія виявилась у чомусь корисною, якщо подивитись на її наслідки



CaS-діаграма кольорів Базові вектори фарб



Нова технологія ICA-S-ColorPrint



Традиційна технологія

Рис. 8. Порівняння кольорового друку за новою та старою технологіями

неупереджено. Вчені, тобто ми, несподівано стали майже кумирами і зірками ЗМІ, бо, як, нарешті, усвідомило суспільство, вони єдині, хто може його врятувати від смертельної загрози. Іншою мовою, після довгого ігнорування науки і глибокого забуття нашого існування нас згадали, завдяки чому ми відчули свою потрібність, яка сама по собі дорогого коштує.

Більше того, з'ясувалося, що щось подібне відбулося не тільки у нас, а й у великих США, де їхній президент Д. Трамп після кількох поспіль зменшень наукового бюджету згадав про своїх вчених і попросив їх зробити послугу, пришвидшивши розробку вакцини проти нової вірусної хвороби. На це миттєво відреагував Джеремі Берг (Jeremy Berg) – головний редактор одного з найпрестижніших у світі наукових журналів «*Science*». Зокрема, він заявив, що президент не має права спочатку ображати науку, недофінансовуючи її, оскільки вона йому чимось не подобається, а потім чогось від неї вимагати, навіть створення конче необхідних ліків. Наприкінці свого листа, звертаючись до адресата, Д. Берг пише, що сам президент має зробити послугу вченим: почати ставитись до науки та її принципів з повагою і лише потім висловлювати свої бажання.

На жаль, для нас таке абсолютно вільне і незалежне висловлювання думок високому начальству неприйнятне. Причин багато і не в них наразі справа. Набагато складніше саме тепер, коли ми знаходимося у вимушеній самоізоляції і маємо час на певний перепочинок, ми мусимо зрозуміти, що так зване старе життя закінчилося і відійде разом з пандемійною

катастрофою, що нас чекають як очікувані (наприклад, ім'я наступного президента НАН України), так і неочікувані зміни. Прогнозувати не буду, та й не в змозі, але, гадаю, що наступає зручний час для започаткування нових форм нашого буття (наприклад, збільшення обсягів дистанційних роботи, навчання, послуг, спілкування тощо), не виключено, переформатування всієї науково-освітньої сфери, яка має стати більш взаємозв'язаною і гармонічною, внесення змін в діяльність і структуру самої академії, що повинна знайти шляхи для самовдосконалення і кращого пристосування до реалій сьогодення. А для нас, мабуть, головне – це, нарешті, довести вищому керівництву держави, що поки у нього, а за ним і суспільства не виникне довіра до вчених і повага до їхньої праці, поки не будуть створені незалежні консультативні органи, що керуються не бюрократами, а професіоналами від науки з правом відкрито давати рекомендації уряду, які є обов'язковими до виконання, розв'язання проблем, що виникають перед суспільством, залишиться таким, як і тепер – хаотичним і неефективним. Отже, локомотивом прогресу і гарантією знаходження правильних відповідей на виклики може бути і є лише наука. І не в останнє, визнання цього її призначення залежить саме від нас. Що стосується праці кожної творчої особистості, то раджу перейнятися внесеним в епіграф висловом – він, як на мене, стимулює і надихає.

Стаття надійшла до редакції 07.05.2020 р.

UDC: 53, 52

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2020.2.205820>

THE MAIN RESULTS OF RESEARCH IN PHYSICS IN UKRAINE FOR 2015 - 2019

V. M. Loktev

Department of Physics and Astronomy of the National Academy of Sciences of Ukraine
e-mail: vfa@nas.gov.ua

Summary

The article, based on the analysis of scientific activity of the institutes of the Department of Physics and Astronomy of the Ukraine National Academy of Sciences, presents the most important

scientific results of fundamental and applied research in various scientific fields of physics and astronomy a significant part of which is in demand by the world scientific community.

The received fundamental researches are estimated in respect to the world science level and the positive aspect of international cooperation with the developed countries leading scientific centers is noted.

Important are the results of the applied researches, which may have a dual purpose, which is extremely important today. The use of the grid structure developed by Ukrainian scientists at the Large Hadron Collider and the development of the modern cloud technology is also successful in this aspect.

In the organizational terms, it should be noted the development of a new modern programs in physics and astronomy for secondary school as a separate subjects, which is introducing by the Ministry of Education and Science of Ukraine into the educational process.

Keywords: National Academy of Sciences of Ukraine, science, physics, achievements, problems

УДК: 53, 52

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2020.2.205820>

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ В ГАЛУЗІ ФІЗИКИ В УКРАЇНІ ЗА 2015 – 2019 рр.

В. М. Локтєв

Відділення фізики та астрономії Національної академії наук України
e-mail: vfa@nas.gov.ua

Реферат

У статті на основі аналізу наукової діяльності інститутів Відділення фізики і астрономії Національної академії наук України представлені найбільш вагомі наукові результати фундаментальних і прикладних досліджень в різних наукових напрямках фізики і астрономії, значна частина яких затребувана світовою науковою спільнотою.

Дається оцінка отриманим фундаментальним дослідженням з позиції рівня світової науки і відзначається позитивний аспект міжнародного співробітництва з провідними науковими центрами розвинених країн.

Важливими є результати прикладних досліджень, що можуть мати подвійне призначення, що є надзвичайно важливим в даний час. Успішним є також в цьому аспекті використання розвиненої українськими вченими грід-структури на Великому адронному колайдері і розробки сучасної хмарної технології.

В організаційному плані слід відзначити особливо важливу розробку академіками за участі учителів фізики нових сучасних програм з фізики і астрономії для середньої школи як окремих предметів, що впроваджено Міністерством освіти і науки України в освітній процес.

Ключові слова: Національна академія наук України, наука, фізика, досягнення, проблеми

ФІЗИКА НАНОТРАНЗИСТОРІВ: РОЗСІЯННЯ ЕЛЕКТРОНІВ І МОДЕЛЬ ПРОХОДЖЕННЯ MOSFET

Ю. О. Кругляк, М. В. Стріха*

Одеський державний екологічний університет,
факультет комп'ютерних наук,
вул. Львівська, 15, Одеса, Україна

* Київський національний університет ім. Тараса Шевченка,
факультет радіофізики, електроніки і комп'ютерних систем,
пр. Глушкова, 4г, Київ, Україна, тел. (044) 526 0532;

Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України,
пр. Науки, 41, Київ, Україна, тел. (044) 525 6033,

E-mail: maksym_strikha@hotmail.com

ФІЗИКА НАНОТРАНЗИСТОРІВ: РОЗСІЯННЯ ЕЛЕКТРОНІВ І МОДЕЛЬ ПРОХОДЖЕННЯ MOSFET

Ю. О. Кругляк, М. В. Стріха

Анотація. У сьомій із нової серії методично-оглядових статей, орієнтованих на дослідників, студентів, аспірантів та викладачів вищої школи, ми докладно розглянули якісну картину явищ розсіяння електронів у каналі провідності нанотранзисторів. При цьому розгляді ключовим є поняття коефіцієнту проходження $T(E)$, який записується через середню довжину вільного пробігу щодо розсіяння назад $\lambda(E)$ і довжину каналу провідності L . Узагальнена теорія електронного транспорту Ландауера – Датта – Лундстрома дозволила побудувати модель проходження MOSFET з урахуванням розсіяння електронів.

Ключові слова: наноелектроніка, польовий транзистор, MOSFET, модель ЛДЛ, метрика транзисторів, розсіювання електронів, модель проходження

PHYSICS OF NANOTRANSISTORS: ELECTRON SCATTERING AND MOSFET TRANSMISSION MODEL

Yu. A. Kruglyak, M. V. Strikha

Abstract. In the seventh one from the line our new tutorial reviews, directed to serve students, university teachers and researchers, a qualitative picture of electron scattering phenomena in the conduction channel of nanotransistors was considered in detail. The concept of the transmission coefficient $T(E)$ expressed through the mean free path $\lambda(E)$ and the conduction channel length L is a key one in our examination. Later the generalized Landauer – Datta – Lundstrom transport theory made it possible to construct a model for the transmission of a MOSFET with allowance for the scattering of electrons.

Keywords: nanoelectronics, field effect transistor, MOSFET, LDL model, transistor metrics, electron scattering, transmission model

ФИЗИКА НАНОТРАНЗИСТОРОВ: РАССЕЙАНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ И МОДЕЛЬ ПРОХОЖДЕНИЯ MOSFET

Ю. О. Кругляк, М. В. Стриха

Аннотация. В седьмой из новой серии наших методических обзорных статей, ориентированных на студентов, аспирантов, преподавателей высшей школы и исследователей, подробно рассмотрена качественная картина явлений рассеяния электронов в канале проводимости нанотранзисторов. В ней ключевым при рассмотрении является понятие о коэффициенте прохождения $T(E)$, выраженном через среднюю длину свободного пробега относительно рассеяния назад $\lambda(E)$ и длину канала проводимости L . Затем обобщенная теория транспорта Ландауэра – Датта – Лундстрорма позволила построить модель прохождения MOSFET с учетом рассеяния электронов.

Ключевые слова: нанoeлектроника, полевой транзистор, MOSFET, модель ЛДЛ, метрика транзисторов, рассеяние электронов, модель прохождения

1. Вступ

Основним пристроєм сучасної електроніки залишається польовий транзистор метал-діелектрик-напівпровідник з ізольованим затвором MOSFET, а тому розуміння базових принципів його роботи належить до обов'язкових компетенцій кожного сучасного науковця, викладача чи інженера, причетного до цієї сфери. Теорію роботи MOSFET було побудовано ще в 60-ті роки минулого століття. Відтоді вона зазнала суттєвого розвитку; проте в основному підхід до моделювання транзисторів залишився той самий, що й 50 років тому.

У першій з нової серії наших методичних оглядових статей, що друкуються в журналі «Сенсорна електроніка і мікросистемні технології» починаючи з №4, 2018, ми дали загальний опис транзистора MOSFET, що є базовим пристроєм сучасної електроніки. Нашу наступну статтю було присвячено викладові класичної теорії MOSFET. У подальших двох статтях розглянуто фізику процесів у напівпровідниковому каналі MOSFET та 2D електростатику MOS й зумовлені нею ефекти.

У подальшій у черзі статті [1] ми розглянули узагальнену модель електронного транспорту Ландауэра – Датта – Лундстрорма (ЛДЛ) стосовно до 2D каналів провідності польових

транзисторів MOSFET, а після того, продовжуючи виклад фізичних принципів моделювання нанотранзисторів, ми запровадили поняття про балістичну швидкість впорскування і розглянули її особливості, що надалі дозволило об'єднати балістичну модель MOSFET з моделлю віртуального витоку.

При обчисленні характеристик балістичних MOSFET ми починали з виразу (57) роботи [1], де вважали, що коефіцієнт проходження $T(E)$ дорівнює одиниці. Розсіювання електронів на заряджених домішках, коливаннях ґратки (фононах) тощо зменшують проходження. Для обчислення характеристик транзисторів з урахуванням розсіювання справедливий вираз

$$I_{DS} = \frac{2q}{h} \int_{-\infty}^{+\infty} T(E)M(E)(f_s(E) - f_D(E))dE. \quad (1)$$

Траєкторію електрона при балістичному перенесенні схематично зображено на рис. 1 в порівнянні з квазі-балістичним перенесенням, що включає множинні процеси розсіювання.

Як зображено на лівому рисунку 1, електрони впорскуються витоком, у якому вони зазнають розсіювання, в канал провідності, де процесів розсіювання немає, і входять до стоку, де розсіювання з'являється знову. Різниця електростатичних потенціалів на кінцях

каналу провідності прискорює електрони, і насамкінець вони передають свою кінетичну енергію (KE на рисунку) стоку. Це - балістичне перенесення.

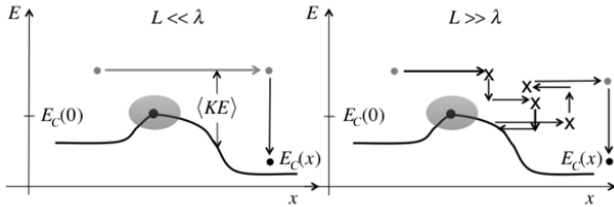


Рис. 1. Балістичне (ліворуч) та квазі-балістичне (праворуч) перенесення електрона. В обох випадках зображено траєкторії електрона, інжектованого витоком з певною енергією E . Розсіювання – стохастичний процес, тож траєкторія праворуч - одна з множини можливих траєкторій

Праворуч на рис. 1 умовно зображено траєкторію перенесення за наявності актів розсіювання. Деякі акти розсіювання пружні: змінюється напрям руху, але не енергія. Інші акти непружні: змінюється і напрям, і енергія. Наприклад, електрони можуть набувати енергію, поглинаючи фонони (кванти енергії коливань ґратки), або ж можуть передавати енергію коливанням ґратки, генеруючи фонони. Зокрема, для зображеної праворуч траєкторії електрон, інжектований витоком, досягає стоку; однак, розсіювання це стохастичний процес, і можуть реалізуватися траєкторії, коли інжектований витоком електрон розсіюється назад і повертається на витік. Коефіцієнт проходження від витоку до стоку – це відношення потоку електронів, інжектованих витоком, до потоку електронів, що залишають канал провідності через стік, яке з неминучістю менше від 1 через розсіювання.

Далі ми спершу якісно розглянемо розсіювання електронів і запровадимо поняття коефіцієнту проходження, а потім побудуємо модель проходження MOSFET.

2. Розсіювання електронів і коефіцієнт проходження

Нанорозмірні MOSFET не є ані суто балістичними ($T(E) = 1$), ані суто дифузійними ($T(E) \ll 1$): вони працюють у квазі-балістичному режимі з $T(E) \sim 1$. Наше завдання

– навчитися використовувати вираз (1) у квазі-балістичному режимі. Докладніше з проходженням за наявності розсіювання можна познайомитися в [2–5].

Характеристичні часи й довжини

Зручний підхід для розуміння розсіювання дають характеристичні часи, такі, як середній час між зіткненнями τ (обернена величина $1/\tau$ - швидкість розсіювання - має фізичний зміст імовірності акту розсіювання протягом одиниці часу). Зручно запровадити також середню довжину вільного пробігу Λ як середню відстань між актами розсіювання ($1/\Lambda$ є ймовірність розсіювання на одиницю довжини). В загальному випадку ці характеристичні часи й довжини залежать від енергії електронів. Нас цікавлять середні часи розсіювання та середні довжини вільного пробігу, коли усереднення відбувається за фізично істотним розподілом енергій електронів.

Три важливі характеристичні часи проілюстровані на рис. 2. Розглянемо потік електронів з квазіімпульсом $\vec{p}(E) = p(E)\hat{x}$, інжектованих у провідник у момент часу $t = 0$. Вважатимемо, що енергія електронів E набагато більша від рівноважної енергії $3kT/2$. По завершенні часу $\tau(E)$ нехай кожний електрон зазнає в середньому хоча б одного акту розсіювання. Величина $\tau(E)$ є середній час розсіювання, а обернена величина $1/\tau(E)$ – середня швидкість розсіювання. При цьому вважатимемо, що всі стани, в які розсіюються електрони, вільні й електронів, привнесених з інших станів, немає. Точніше величину $\tau(E)$ можна назвати середнім часом розсіювання електронів назовні (out-scattering time), оскільки, розсіювшись, електрон вибуває з процесу перенесення струму.

Як зображено на рис. 2, корисно визначити й інші характеристичні часи. Наприклад, головним механізмом розсіювання може бути пружне й анізотропне розсіювання, коли акт розсіювання не змінює енергії і тільки трохи відхиляє електрон. У такому разі після часу $\tau(E)$ електрони все ще характеризуються імпульсом переважно в напрямку осі x , а їхня енергія ще приблизно та ж, що й при інжектуванні. Пізніше, коли проміне час релаксації імпульсу $\tau_m(E)$, імпульси електронів рандомізуються й релаксують, і сумарний імпульс уже не буде скерована-

ний вздовж осі x , хоч, середня енергія буде все ще близька до енергії при інжектуванні, якщо домінуючий механізм розсіювання все ще залишатиметься пружним. Нарешті, через дещо довший час, – час релаксації енергії $\tau_E(E)$, – впорснуті електрони втратять свою надлишкову енергію і придуть до рівноважного стану. Співвідношення між цими характеристичними часами приблизно таке:

$$\tau_E(E) > \tau_m(E) \geq \tau(E), \quad (2)$$

воно виникає, бо може знадобитися декілька актів непружного розсіювання, щоб «скинути» надлишкову енергію. Якщо розсіювання ізотропне, тобто електрони з однаковою ймовірністю розсіюються в усіх напрямках, то $\tau(E) = \tau_m(E)$.

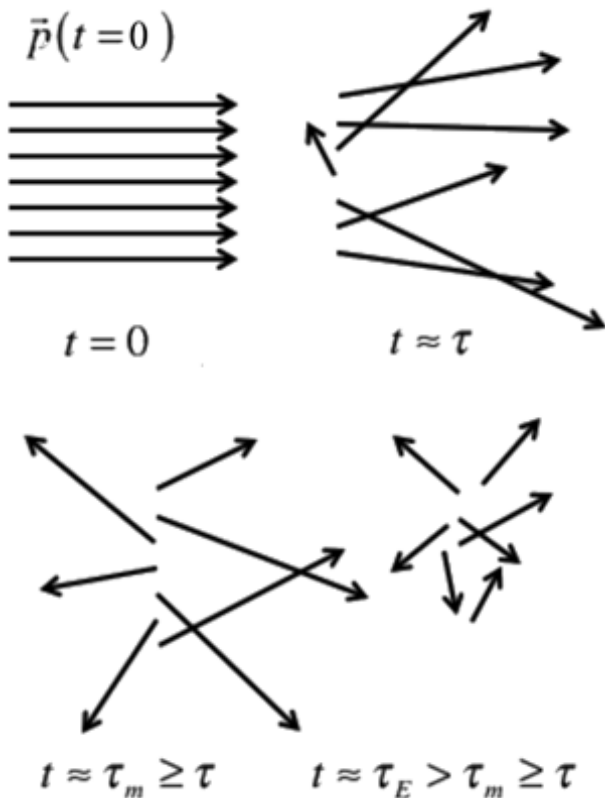


Рис. 2. Якісна візуалізація різних характеристичних часів розсіювання. В момент часу $t = 0$ електрони з однаковими імпульсами впорснуються в провідник в одному напрямку. Електрони зазнають у середньому одного зіткнення через час $t \approx \tau(E)$. Сумарний імпульс первісного ансамблю електронів робиться нульовим через час $t \approx \tau_m(E) \geq \tau(E)$ а енергія набуває свого рівноважного значення протягом часу $t \approx \tau_E(E) > \tau_m(E) \geq \tau(E)$. Довжина векторів на рисунках символічно відповідає енергії [2, 4]

Можна визначити також характеристичні довжини розсіювання, як-от середню довжину вільного пробігу (mean-free-path/mfp)

$$\Lambda(E) = v(E)\tau(E), \quad (3)$$

що є середньою відстанню між актами розсіювання, а також аналогічну довжину релаксації імпульсу та довжину релаксації енергії.

Швидкості розсіювання та енергія

Фундаментальним поняттям у теорії розсіювання є матриця розсіювання $S(\vec{p} \rightarrow \vec{p}')$, яка переводить систему частинок з початкового стану \vec{p} в деякий кінцевий стан \vec{p}' .

Швидкість розсіювання, або інакше ймовірність розсіювання протягом одиниці часу, є оберненим середнім часом між двома послідовними зіткненнями, який одержують шляхом підсумовування за всіма можливими кінцевими станами:

$$\frac{1}{\tau(\vec{p})} = \sum_{\vec{p}'} S(\vec{p} \rightarrow \vec{p}'). \quad (4)$$

У припущенні, що електрони впорсуються в провідник з початковим імпульсом, спрямованим уздовж осі x , для швидкості імпульсної релаксації, за аналогією з (4), одержуємо [2]:

$$\frac{1}{\tau_m(\vec{p})} = \sum_{\vec{p}'} S(\vec{p} \rightarrow \vec{p}') \frac{\Delta p_x}{p_x}. \quad (5)$$

Анізотропне розсіювання відхиляє електрони переважно на певні невеликі кути навколо напрямку анізотропії, внаслідок чого час імпульсної релаксації зростає, а відповідна швидкість зменшується. Аналогічним чином записується швидкість релаксації енергії через час відповідної релаксації.

Час імпульсної релаксації можна розрахувати зі швидкості переходу. Техніка обчислення швидкості переходу докладно викладена в [2]. Тут ми наведемо тільки її основні моменти. Розгляньмо акт розсіювання докладніше (рис. 3).

Нехай електрон з імпульсом $\vec{p} = \hbar k$, що описується хвильовою функцією $\psi_i(\vec{r})$, виявився в області дії потенціалу розсіювання $U_S(\vec{r}, t)$, який може бути як статичним (розсіювання на заряджених домішках), так і динамічним (розсіювання на фононах). В результаті

акту розсіяння початковий імпульс електрона змінюється і дорівнює \vec{p}' , змінюється і його хвильова функція на $\psi_f(\vec{r})$. Потрібно розрахувати ймовірність (протягом одиниці часу) $S(\vec{p} \rightarrow \vec{p}')$ переходу електрона з початкового стану \vec{p} в кінцевий \vec{p}' .

В першому порядку теорії збурень

$$S(\vec{p} \rightarrow \vec{p}') = \frac{2\pi}{\hbar} |H_{p',p}|^2 \delta(E' - E - \Delta E), \quad (6)$$

де матричний елемент переходу

$$|H_{p',p}|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_f^*(\vec{r}) U_S(\vec{r}) \psi_i(\vec{r}) d\vec{r}.$$

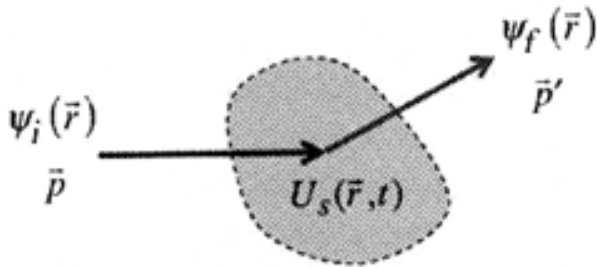


Рис. 3. Перехід електрона з початкового стану в кінцевий в результаті акту розсіяння на потенціалі $U_S(\vec{r}, t)$

Вираз (6) має в квантовій теорії назву золотого правила Фермі – Дірака [6, 7]. δ -функція в (6) відповідає за збереження енергії. В випадку статичного потенціалу розсіяння (наприклад, на заряджених домішках) енергія не релаксує ($\Delta E = 0$). Для періодичного потенціалу з характерною частотою ω (коливання ґратки) $\Delta E = \pm \hbar\omega$, що відповідає емісії або поглинанню фонуна. В будь-якому випадку потрібно спершу визначити потенціал розсіяння, потім скористатися з (6) і далі обчислити характерний час (4) чи (5).

Згідно з (4), швидкість розсіяння залежить від числа кінцевих станів при енергії $E(\vec{p}')$, доступних для електрона. Специфічні механізми розсіяння можуть добирати спеціальні кінцеві стани, в чому ми переконаємося нижче, обговорюючи розсіяння на заряджених доміш-

ках, а в найпростішому випадку швидкість розсіяння повинна бути пропорційна густині кінцевих станів. Для ізотропного пружного розсіяння електронів у зоні провідності

$$\frac{1}{\tau(E)} = \frac{1}{\tau_m(E)} \propto D(E - E_C), \quad (7)$$

а для ізотропного непружного розсіяння, коли електрон поглинає або випромінює енергію $\hbar\omega$, наприклад, при взаємодії з фононом,

$$\frac{1}{\tau(E)} = \frac{1}{\tau_m(E - E_C)} \propto D(E \pm \hbar\omega - E_C). \quad (8)$$

Для простих зон параболічного профілю відомі аналітичні вирази для часів розсіяння [2], а для складніших зон слід виконувати чисельне підсумовування за кінцевими станами.

Для напівпровідників часи розсіяння часто записують через ступеневу апроксимацію

$$\tau_m(E) = \tau_{m0} \left(\frac{E - E_C}{kT} \right)^s, \quad (9)$$

де s – характерний показник степені, що відповідає тому або іншому механізму розсіяння. Наприклад, розсіяння електронів на акустичних фонунах можемо розглядати як майже пружне та ізотропне при кімнатній температурі. Швидкість розсіяння повинна бути пропорційна до густини станів, яка для 3D електронів при параболічній зонній структурі напівпровідника пропорційна до $(E - E_C)^{1/2}$, тож для часу розсіяння можна очікувати пропорційності величині $(E - E_C)^{-1/2}$. Отже, характерний показник степені для розсіяння на акустичних фонунах $s = -1/2$. Для 2D електронів густина станів не залежить від енергії, тож у цьому випадку характерний показник степені $s = 0$. Для 1D електронів густина станів пропорційна до $(E - E_C)^{-1/2}$, отже, характерний показник степені $s = +1/2$. Не завжди можна описати час розсіяння ступеневим законом, але, коли це вдається, розрахунки інших фізичних величин стають значно простіші.

Коли розсіювання зумовлюють електростатичні взаємодії, наприклад, при розсіянні на заряджених домішках, або при розсіянні на

фононах у полярному середовищі, залежність часу розсіяння від енергії інша. Як зображено на рис. 4, випадково розташовані заряди спричиняють флуктуації профілю дна зони провідності $E_C(x)$, що зумовлюють розсіяння електронів. При цьому високоенергетичні електрони відчувають флуктуації потенціалу меншою мірою, ніж електрони з нижчою енергією, тож у випадку розсіяння на заряджених домішках чи на полярних фононах можна очікувати, що швидкість розсіяння $1/\tau(E)$ зменшується (час розсіяння $\tau(E)$ збільшується) зі збільшенням енергії електронів. Часу розсіяння для 3D електронів у степеневому законі відповідає значення $s = +3/2$ [2]. При розсіянні на неполярних фононах час розсіяння зменшується з енергією електронів.

Важливою рисою розсіяння на заряджених домішках є його анізотропність. Значна частина електронів характеризується великою енергією, і ці електрони майже не змінюють свої траєкторії в полі заряджених домішок. В результаті час релаксації імпульсу при розсіянні на заряджених домішках суттєво більший від середнього часу розсіяння: $\tau_m(E) \gg \tau(E)$.

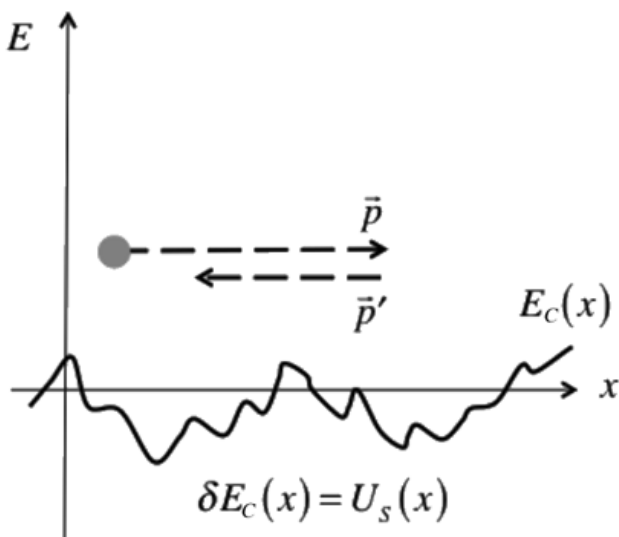


Рис. 4. Флуктуації потенціалу, створювані випадково розташованими зарядами, зумовлюють розсіяння на заряджених домішках. Електрони з високою енергією «відчувають» флуктуації потенціалу меншою мірою, аніж електрони з малою енергією, а тому розсіюються менше

Середня довжина вільного пробігу так само може бути записана в вигляді степеневого закону. З формули (3), пам'ятаючи, що для параболічних зон $v(E) \propto (E - E_C)^{1/2}$, одержуємо

$$\Lambda(E) = v(E)\tau(E) \propto (E - E_C)^{1/2} \left(\frac{E - E_C}{kT} \right)^s = \Lambda_0 \left(\frac{E - E_C}{kT} \right)^r, \quad (10)$$

де характеристичний показник степені для середньої довжини вільного пробігу $r = s + 1/2$. Для розсіяння на акустичних фононах у 3D $s = -1/2$, тож $r = 0$: середня довжина вільного пробігу не залежить від енергії. При розсіянні на акустичних фононах у 2D $s = 0$, тож $r = 1/2$: середня довжина вільного пробігу збільшується зі збільшенням енергії електронів.

Коефіцієнт проходження

Відмінність між проходженням $T_{SD}(E)$ від витоку до стоку і $T_{DS}(E)$ від стоку до витоку зображено на рис. 5. Величина $T_{SD}(E)$ є відношення стаціонарного потоку електронів, що виходить зі стоку, до потоку, інжектованого витоком, а величина $T_{DS}(E)$ є відношення потоку електронів, що виходять із витоку, до потоку, інжектованого стоком. При нульовій, або ж невеликій напрузі на стоку можна очікувати, що обидва коефіцієнти проходження однакові: $T_{SD}(E) \approx T_{DS}(E) = T(E)$. Цей випадок зображено у верхній частині рис. 5. В нижній частині рисунку зображена ситуація, коли напруга на стоку велика. В цьому випадку зовсім не очевидно, будуть чи не будуть однакові $T_{SD}(E)$ і $T_{DS}(E)$, але можна показати, що в випадку пружного розсіяння обидва коефіцієнти проходження однакові. Проте, за непружного розсіювання вони цілком відмінні: $T_{SD}(E) \gg T_{DS}(E)$.

При моделюванні струму в MOSFET той факт, що $T_{SD}(E) \gg T_{DS}(E)$ при великій напрузі на стоці не відіграє суттєвого значення, оскільки за великої V_{DS} потік електронів, інжектованих витоком, і так надто незначний. Таким чином, зазвичай обчислюють єдиний коефіцієнт проходження $T(E)$ для обох напрямків.

Раніше ми показали, що коефіцієнт проходження $T(E)$ пов'язаний із середньою довжиною вільного пробігу між зіткненнями назад $\lambda(E)$ згідно з формулою (21) роботи [1]:

$$T(E) = \frac{\lambda(E)}{\lambda(E) + L} \quad (11)$$

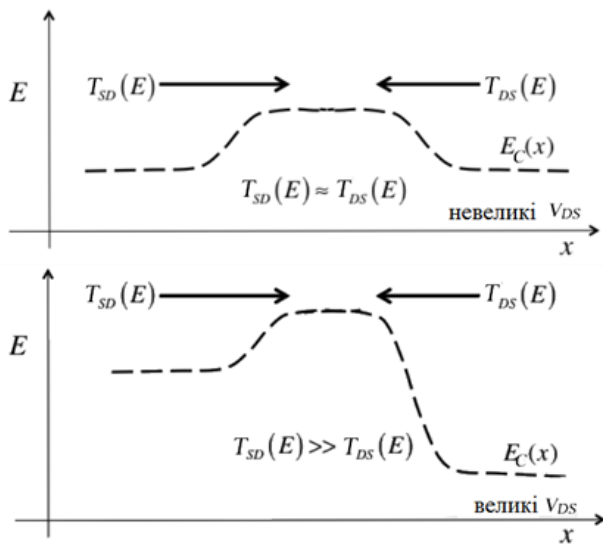


Рис. 5. Поведінка двох коефіцієнтів проходження $T_{SD}(E)$ і $T_{DS}(E)$. Верхній рисунок відповідає нульовій чи невеликій напрузі V_{DS} , а нижній рисунок відповідає великій напрузі на стоці

Звернімо увагу, що в виразі (11) фігурує саме довжина $\lambda(E)$, а не $\Lambda(E)$ з формули (3). Цей вираз (11) не складно вивести [3, 4]. Він придатний для опису проходження у всьому інтервалі від балістичної до дифузійної межі. Коли довжина провідника менша від середньої довжини вільного пробігу, тоді

$$T(E) = \frac{\lambda(E)}{\lambda(E) + L} \rightarrow 1, \quad L \ll \lambda(E) \quad (12)$$

й перенення електронів у каналі провідності балістичне. Натомість коли довжина провідника велика порівняно з довжиною вільного пробігу, тоді

$$T(E) = \frac{\lambda(E)}{\lambda(E) + L} \rightarrow \frac{\lambda(E)}{L}, \quad L \gg \lambda(E). \quad (13)$$

Вираз (11) описує проходження електронів у провіднику за відсутності електричного поля. Те, що відбувається після прикладення електричного поля до каналу провідності, ілюструє рис. 6.

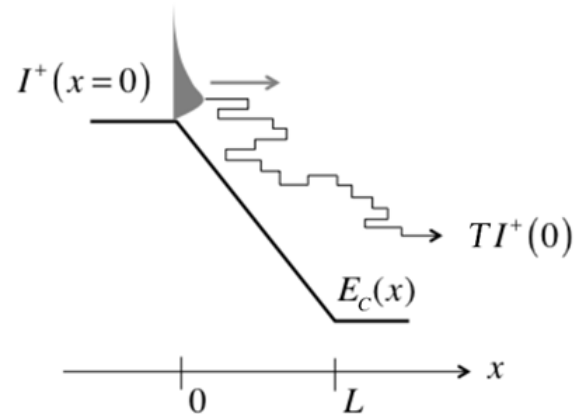


Рис. 6. Траєкторія електрона в короткому каналі провідності, коли прикладено високе електричне поле. Електрони впорскуються витокм і більша їх частина досягає стоку, навіть коли відбуваються акти розсіяння [8]

На рис. 6 зображено короткий канал провідності, до якого прикладено сильне електричне поле. Рівноважний потік електронів впорскує витік. Електрони швидко нарощують кінетичну енергію і швидкість їхнього розсіювання збільшується. Моделювання електронного транспорту через короткі канали з великим перепадом напруги, коли може спостерігатися різкий сплеск швидкості, є однією з важливих задач сучасної напівкласичної теорії транспорту [2]. Розрахунок середньої швидкості залежно від координати електрона в провіднику - вельми складна задача, однак, детальне моделювання її з використанням поняття проходження веде до наочних і зрозумілих результатів [8]. Встановлено, що коли інжектвані електрони проникають навіть на коротку відстань вглиб області з сильним електричним полем, тоді, навіть зазнаючи актів розсіяння, вони однак досягнуть кінця каналу провідності [8]. Навіть якщо відбувається сильне розсіяння, коефіцієнт проходження може дорівнювати майже одиниці, бо сильне електричне поле підхоплює електрони і виносить їх з каналу провідності в стоковий термінал.

У високоякісному MOSFET за великої напруги на стоку електричне поле поблизу вершини бар'єру біля входу в канал провідності слабке, а поблизу стоку сильне. Для розуміння того, що відбувається за такої ситуації, розглянемо модель на рис. 7.

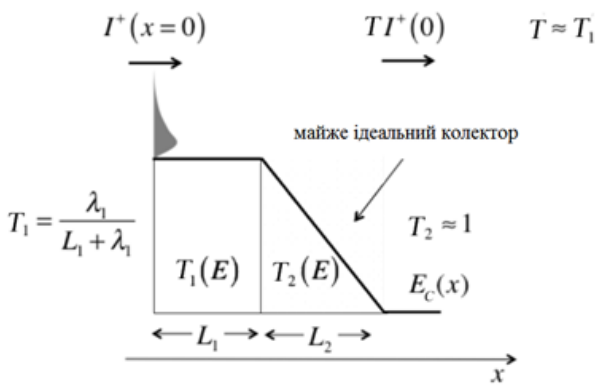


Рис. 7. Модельний профіль каналу провідності, що ілюструє проходження електрона спершу крізь область з низьким електричним полем, а потім – з високим електричним полем

У цій моделі енергетичний профіль каналу провідності складається з двох ділянок: короткої ділянки довжиною L_1 зі сталим потенціалом і середньою довжиною вільного пробігу λ_1 і довгої ділянки завдовжки L_2 з сильним електричним полем. Коефіцієнт проходження через першу ділянку $T_1 = \lambda_1 / (L_1 + \lambda_1)$, а через другу – $T_2 \approx 1$ (попри численні акти розсіяння, сильне поле виносить майже всі електрони до терміналу витоку). Сумарний коефіцієнт проходження, очевидно, дорівнюватиме $T \approx \lambda_1 / (L_1 + \lambda_1)$. Важливий висновок із цього полягає в подальшому: проходження через складну структуру, що складається з низькопольової ділянки й дальшої ділянки з високим електричним полем, контролюється довжиною низькопольової ділянки. На практиці, коли електричне поле змінюється плавно вздовж каналу провідності, надійно визначити довжину низькопольової ділянки складно [9, 10], але наведений вище простий розгляд наочно пояснює результати математичного моделювання [8].

Підіб'ємо підсумки обговорення поняття коефіцієнту проходження:

1. Коефіцієнт проходження визначається довжиною каналу й середньою довжиною вільного пробігу назад, $T = \lambda / (L + \lambda)$.

2. При балістичному транспорті $T \rightarrow 1$, якщо $L \gg \lambda$.

3. При дифузійному транспорті

$T \rightarrow \lambda / L \ll 1$, якщо $L \ll \lambda$.

4. Область у каналі провідності з високим електричним полем є добрим колектором електронів, $T \approx 1$.

5. У каналі провідності, де електричне поле змінюється від слабкого до сильного значення, як це має місце в MOSFET за великої напруги на стоці, проходження контролюється областю з низьким електричним полем.

Середня долина вільного пробігу щодо розсіяння назад

Ми використовуємо два різні поняття середньої довжини вільного пробігу. Довжина Λ (3) - це середня відстань між двома актами розсіяння. Саме такий зміст більшість фізиків вкладають у поняття «середня довжина вільного пробігу». Обернена величина $1/\Lambda$ є ймовірність розсіяння на одиницю довжини. Однак, у нашому контексті величина λ , як середня довжина вільного пробігу назад, більш істотна. Її обернена величина $1/\lambda$ є ймовірність на одиницю довжини того, що прямий (у додатному напрямі) потік розсіється назад (у від'ємному напрямі). Коефіцієнт проходження (11) визначається саме через величину λ . Як пов'язані між собою поняття довжин λ та Λ ?

Рис. 8 ілюструє розсіяння в 1D каналі провідності, наприклад, у NW MOSFET.



Рис. 8. Розсіяння вперед і розсіяння назад у каналі 1D [3, 4]

Нехай розсіяння є ізотропне й середній час між двома актами розсіяння є τ . Якщо електрон, що рухається в прямому напрямку, здій-

снить акт розсіяння через час τ , він з однаковою ймовірністю може розсіятися як уперед, так і назад. Однак тільки розсіяння назад, яке в середньому відбувається через час 2τ , істотне для визначення величини струму (розсіяння вперед на нього ніяк не впливає, бо електрон далі рухається, куди потрібно). У відповідності до такого очевидного твердження середня довжина вільного пробігу назад у $1D$ каналі є

$$\lambda(E) = 2v(E)\tau_m = 2\Lambda, \quad (14)$$

де ми використали час релаксації імпульсу, бо раніше припустили ізотропний характер розсіяння, для якого $\tau_m = \tau$.

У $2D$ і $3D$ каналах визначення середньої довжини вільного пробігу щодо розсіяння назад передбачає усереднення за кутами [11], як це зображено на рис. 9 для $2D$ каналу.

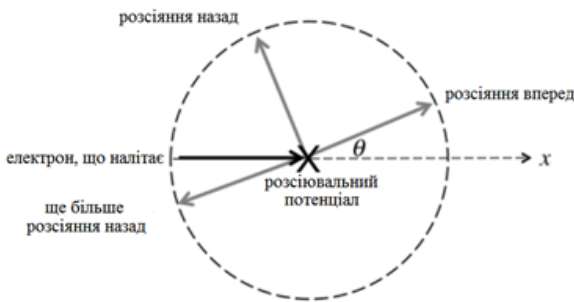


Рис. 9. Розсіяння вперед і розсіяння назад у $2D$ каналі

Провівши відповідне усереднення, для $2D$ каналу провідності можна одержати

$$\lambda(E) = \frac{\pi}{2}v(E)\tau_m = \frac{\pi}{2}\Lambda, \quad (15)$$

а для $3D$ каналу $\lambda(E) = 4\Lambda/3$ [3, 4, 11]. Для коректного розрахунку коефіцієнту проходження важливо враховувати різницю між двома середніми довжинами λ та Λ .

Простий вираз для коефіцієнту проходження (11) пов'язує між собою середню довжину вільного пробігу назад λ і довжину низькопольової частини каналу провідності, що охоплює невелику область вершини бар'єру. Для обчислення проходження потрібно знати величину λ . Останню можна обчислити за (15) чи визначити експериментально. Ситуація в класичному розумінні виглядає як задача

дифузії – частинки, які інjektує лівий термінал, дифундують через канал і залишають його через протилежний термінал. Вихідний потік електронів визначає коефіцієнт проходження, а в класичній задачі його має визначати коефіцієнт дифузії. Докладний аналіз цієї ситуації [3, 4] показує, що має місце просте співвідношення між коефіцієнтом дифузії й тепловою швидкістю електрона v_T та середньою довжиною вільного пробігу щодо розсіяння назад λ , а саме:

$$D = \frac{v_T \langle \lambda \rangle}{2}, \quad (16)$$

де $\langle \lambda \rangle$ – середня довжина вільного пробігу, усереднена за енергією. Саме це співвідношення відкриває можливість визначити середню довжину вільного пробігу експериментально. Звернімо увагу на те, що вираз (16) справедливий лише для невиродженої статистики електронів. Загальніший випадок статистики Фермі – Дірака стосовно до цієї задачі обговорено в [3, 4].

Рухливість експериментально виміряти легше, аніж коефіцієнт дифузії, тож у літературі простіше знайти відомості про рухливість, яку пов'язує з коефіцієнтом дифузії співвідношення Ейнштейна

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q}, \quad (17)$$

яке, щоправда, справедливе для рівноважної ситуації; однак, електрони в низькопольовій частині каналу в області вершини бар'єру, яка, власне, й контролює проходження, теж перебувають поблизу рівноваги.

Тож ми можемо доволі просто оцінити середню довжину вільного пробігу щодо розсіяння назад через відоме значення рухливості електронів. Спершу з рухливості визначаємо коефіцієнт дифузії за (17), а потім – середню довжину вільного пробігу за (16). Врахування виродження, що важливо в області вище від порогу, обговорено в [3, 4].

Для прикладу обчислимо середню довжину вільного пробігу й коефіцієнт проходження 22 нм MOSFET. Розглянемо $n\text{-Si}$ MOSFET з каналом завдовжки $L = 22 \text{ нм}$ при $T = 300 \text{ K}$ в квазікласичному режимі. Нехай орієнтація

підкладки (100) й заселена тільки нижня підзона. Рухливість $\mu = 250 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Знайдімо $\langle \lambda \rangle$ і теплову швидкість v_T .

Розрахуємо коефіцієнт дифузії з рухливості за (17):

$$D = \mu \frac{kT}{q} = 6.5 \text{ см}^2/\text{с} .$$

Візьмемо $m^* = 0.19m_0$, так що $v_T = 1.23 \times 10^7 \text{ см}/\text{с}$, і визначимо $\langle \lambda \rangle$ за (16):

$$\langle \lambda \rangle = \frac{2D}{v_T} = \frac{2 \times 6.5}{1.2 \times 10^7} = 10.5 \text{ нм} ,$$

а далі оцінимо коефіцієнт проходження за (11):

$$T \approx \frac{\langle \lambda \rangle}{\langle \lambda \rangle + L} = \frac{10.5}{10.5 + 22} = 0.32 .$$

Цей результат наближений, бо величину $\langle \lambda \rangle$ у цьому виразі не було усереднено за енергією, як того вимагає формула (11). Тим не менше, одержаний результат говорить, що такий MOSFET в лінійній області працює в проміжному режимі. При високій напрузі на стоці електрони набувають більшої енергії, що веде до інтенсивнішого розсіяння. Однак, подальший розгляд покаже нам, що, всупереч очікуванням, MOSFET за високої напруги на стоці працює ближче до балістичного режиму, ніж за низької напруги.

Отже, найважливіші одержані результати такі:

$$\begin{aligned} T(E) &= \frac{\lambda(E)}{\lambda(E) + L}, \\ \lambda(E) &= \frac{\pi}{2} v(E) \tau_m, \\ \langle \lambda \rangle &= \frac{2D}{v_T}, \end{aligned} \quad (18)$$

де під L слід розуміти довжину низькопольової частини каналу провідності. Множник $\pi/2$ виникає через усереднення за кутами в 2D каналі. Через ці вирази легко оцінити середню довжину вільного пробігу в припущенні невидродженої статистики носіїв.

3. Модель проходження MOSFET

Перейдімо до побудови моделі нанорозмірних MOSFET з урахуванням розсіяння. Саме врахування розсіяння робить моделювання

транспортних явищ складною задачею, а в випадку MOSFET – особливо складною [9, 12]. Тим не менше, ми пересвідчимося, що основні принципи моделювання MOSFET з урахуванням розсіяння можна легко зрозуміти й використовувати надалі для інтерпретації експериментальних даних та результатів обчислень при моделюванні.

Отже, для струму маємо найзагальніший вираз (2) з роботи [1], що описує всі можливі режими протікання струму:

$$I_{DS} = \frac{2q}{h} \int T(E) M(E) (f_S(E) - f_D(E)) dE. \quad [A] \quad (19)$$

Якщо до стоку прикладено велику напругу, тоді $f_S(E) \gg f_D(E)$ і струм насичення

$$I_{DSAT} = \frac{2q}{h} \int T(E) M(E) f_S(E) dE. \quad (20)$$

Натомість у квазірівноважному режимі струм невеликий, $f_S \approx f_D$, тому для струму й провідності на лінійній ділянці справедливі вирази (10) з роботи [1]:

$$\begin{aligned} I_{DLIN} &= G_{ch} V_{DS}, \quad [A] \\ G_{ch} &= \frac{2q^2}{h} \int T(E) M(E) \left(-\frac{\partial f_0}{\partial E} \right) dE. \quad [C_M] \end{aligned} \quad (21)$$

За цими виразами можна розрахувати лінійний струм, величину I_{ON} і струм у всьому діапазоні зміни V_{DS} від $V_{DS} = 0$ до $V_{DS} = V_{DD}$. Щоб спростити далі побудови, вважатимемо, що середня довжина вільного пробігу не залежить від енергії:

$$T(E) = \frac{\lambda(E)}{\lambda(E) + L} \rightarrow T = \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + L}. \quad (22)$$

Резюме балістичної моделі MOSFET

Випишемо остаточні результати балістичної моделі (формула (69) роботи [1]) подальшим чином. Струм стоку

$$I_{DS} = W |Q(V_{GS}, V_{DS})| F_{SAT} v_{inj}^{ball}. \quad (23)$$

Функція насичення струму стоку для обох статистик визначається виразами:

$$F_{SAT} = \left[\frac{1 - \mathfrak{I}_{1/2}(\eta_{FD}) / \mathfrak{I}_{1/2}(\eta_{FS})}{1 + \mathfrak{I}_0(\eta_{FD}) / \mathfrak{I}_0(\eta_{FS})} \right], \text{ (Фермі – Дірак / FD)}$$

$$F_{SAT} = \left[\frac{1 - e^{-qV_{DS}/kT}}{1 + e^{-qV_{DS}/kT}} \right], \text{ (Максвелл – Больцман / MB)} \quad (24)$$

$$\eta_{FS} = (E_{FS} - E_C(0)) / kT, \quad \eta_{FD} = \eta_{FS} - qV_{DS} / kT.$$

Балістична швидкість впорскування та теплова швидкість

$$v_{inj}^{ball} = v_T \frac{\mathfrak{I}_{1/2}(\eta_{FS})}{\mathfrak{I}_0(\eta_{FS})}, \text{ (FD)}$$

$$v_{inj}^{ball} = v_T, \text{ (MB)} \quad (25)$$

$$v_T = \sqrt{\frac{2kT}{\pi m^*}}.$$

Балістичний струм у лінійній області

$$I_{DLIN} = W |Q(V_{GS}, V_{DS})| \left(\frac{v_{inj}^{ball}}{2kT/q} \right) \frac{\mathfrak{I}_{-1/2}(\eta_{FS})}{\mathfrak{I}_{1/2}(\eta_{FS})} V_{DS}, \text{ (FD)}$$

$$I_{DLIN} = W |Q(V_{GS}, V_{DS})| \left(\frac{v_T}{2kT/q} \right) V_{DS}, \text{ (MB)} \quad (26)$$

а для струму насичення одержимо:

$$I_{DSAT} = W |Q(V_{GS}, V_{DS})| v_{inj}^{ball}, \text{ (FD)}$$

$$I_{DSAT} = W |Q(V_{GS}, V_{DS})| v_T. \text{ (MB)} \quad (27)$$

Нарешті, електронний заряд на вершині бар'єру

$$Q(V_{GS}, V_{DS}) = -q \frac{N_{2D}}{2} [\mathfrak{I}_0(\eta_{FS}) + \mathfrak{I}_0(\eta_{FD})], \text{ (FD)} \quad (28)$$

а для статистики Максвела – Больцмана інтеграла Фермі – Дірака просто зводяться до експонент.

Для врахування розсіяння, здавалося б, потрібно ці вирази просто помножити на коефіцієнт проходження T . Ми далі переконаємося, що це справді так для лінійного струму, але не для струму насичення й не для електронного заряду.

Лінійна область

Для обчислення лінійного струму з урахуванням розсіяння почнемо від виразу (21) для провідності. Для числа мод використаємо вираз (60) роботи [1]. Записуючи функції Фермі, враховуємо, що $E_F \approx E_{FS} \approx E_{FD}$. Після обчис-

лення інтегралу одержимо вираз, схожий на вираз (47) роботи [1], у якому потрібно лише замінити коефіцієнт проходження в дифузійному випадку λ_0 / L на коефіцієнт проходження T як у вихідному виразі (21) для опису транспорту у всіх режимах від балістичного до дифузійного, а саме:

$$I_{DLIN} = T \left[W \frac{2q^2}{h} \left(\frac{g_v \sqrt{2\pi m^* kT}}{2\pi \hbar} \right) \mathfrak{I}_{-1/2}(\eta_F) \right] V_{DS}. \quad (29)$$

Ми одержали таким чином фактично вираз для балістичного струму в лінійній області (формула (61) роботи [1]), помножений на коефіцієнт проходження T . Звернімо увагу на те що тут і в подальших формулах певну незручність викликає використання літери T для позначення двох величин: коефіцієнта проходження та температури. Проте їх легко розрізнити, бо температура скрізь входить до формул лише в добутку зі сталою Больцмана kT .

Вираз (29) справедливий для лінійної області MOSFET, який працює в будь-якому режимі від балістичного до дифузійного, однак, він виглядає дещо незвично порівняно з традиційним виразом (5) роботи [13]

$$I_{DLIN} = \frac{W}{L} \mu C_{ox} (V_{GS} - V_T) V_{DS}. \quad (30)$$

У цілковитій відповідності цих виразів один одному ми пересвідчимося пізніше.

Область насичення

Для обчислення струму в області насичення почнемо з виразу (20) і обчислимо інтеграл таким самим чином, як і в лінійному випадку вище. Остаточно одержимо вираз

$$I_{DSAT} = T W \frac{2q}{h} \left(\frac{g_v \sqrt{2m^* kT}}{\pi \hbar} \right) kT \frac{\sqrt{\pi}}{2} \mathfrak{I}_{1/2}(\eta_F), \quad (31)$$

що є виразом для балістичного струму в області насичення (64) роботи [1], помноженим на коефіцієнт проходження T . Вираз (31) справедливий для області насичення MOSFET, який працює в будь-якому режимі від балістичного до дифузійного, однак, виглядає він так само незвично порівняно з традиційним

виразом (7) роботи [13], що включає швидкість насичення

$$I_{DSAT} = W C_{ox} (V_{GS} - V_T) v_{sat}. \quad (32)$$

Зв'язок між цими виразами, одержаними в різних моделях, ми обговоримо пізніше.

Від лінійного струму до насичення

Для обчислення струму при будь-якому значенні напруги на стоку з урахуванням розсіювання починаємо з виразу (19) з обчисленням інтегралів так само, як і раніше. Остаточно одержимо

$$I_{DS} = T W \frac{q}{h} \left(\frac{g_v \sqrt{2\pi m^* kT}}{\pi \hbar} \right) kT [\mathfrak{I}_{1/2}(\eta_{FS}) - \mathfrak{I}_{1/2}(\eta_{FD})],$$

$$\eta_{FS} = [E_{FS} - E_c(0)]/kT, \quad \eta_{FD} = \eta_{FS} - qV_{DS}/kT. \quad (33)$$

Вираз (33) відрізняється від аналогічного результату для балістичного випадку (66) роботи [1] тільки множенням на коефіцієнт проходження T . Він переходить у вираз (29) для малих V_{DS} і в (31) для великих V_{DS} , в чому не складно переконатися. Ми бачимо, що струм стоку з урахуванням розсіювання відрізняється від попереднього виразу для балістичного струму тільки множенням на коефіцієнт проходження T . Якщо ж струм записати через електронний заряд, то ситуація виявиться не така проста, як ми зараз пересвідчимося.

Насамкінець зауважимо: ми досі розглядали 2D електрони. Не складно вивести аналогічні формули для 1D електронів у NW MOSFET.

Вираз для струму через електронний заряд

Вираз (33) у моделі ЛДЛ справедливий для довільної напруги на стоці, але з нього не видно залежності від інверсного електронного заряду Q . Однак, завжди краще записувати струм через заряд Q , пов'язаний безпосередньо з електростатикою структури MOS. Для обчислення заряду Q потрібно ввести в розгляд потік електронів у додатному напрямі, інжектованих витоком, які заселяють стани з $+v_x$ на вершині бар'єру, і потік електронів у від'ємному напрямку, інжектованих стоком, які заселяють стани з $-v_x$ на вершині бар'єру. Для балістичних MOSFET ми отримали раніше формули для струму й заряду (вирази (69)

роботи [1]). Зараз вони зазнають змін через необхідність врахувати розсіювання назад, бо нам потрібно врахувати всі можливості заселення станів на вершині бар'єру. Як зображено на рис. 10, у нас, як і раніше, є балістичний потік, інжектований витоком, що заселює стани на вершині бар'єру, але до нього додається й потік, розсіяний назад у напрямку витоку, а величина балістичного потоку, інжектованого стоком у напрямі вершини бар'єру, зменшується на коефіцієнт проходження. Таким чином, вираз для заряду (29) потрібно замінити на

$$Q(V_{GS}, V_{DS}) = -q \frac{N_{2D}}{2} [\mathfrak{I}_0(\eta_{FS}) + (1-T)\mathfrak{I}_0(\eta_{FS}) + T\mathfrak{I}_0(\eta_{FD})]. \quad (34)$$

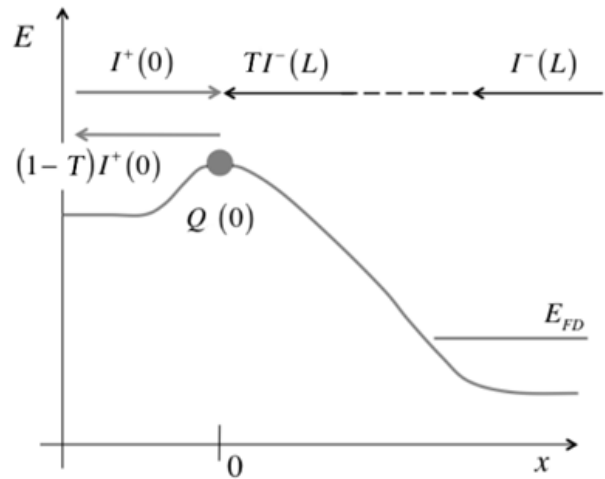


Рис. 10. Заселеність станів на вершині бар'єру визначається трьома потоками електронів: з боку витоку, розсіяним назад до витоку, та з боку стоку, зменшеним на коефіцієнт проходження

Перший доданок у виразі для заряду на вершині бар'єру (34) описує балістичний потік, інжектований витоком. Його величина залежить від значення електрохімічного потенціалу на витоку. Другий доданок описує вклад потоку, розсіяного назад у бік витоку. Цей потік теж бере свій початок на витоку, тому він залежить від електрохімічного потенціалу на витоку. Третій доданок описує балістичний потік, що бере початок на стоці, й тому залежить від електрохімічного потенціалу на стоці; цей потік зменшений на коефіцієнт проходження T .

Вирази (33) і (34) дозволяють тепер виразити струм через електронний заряд. Для цього (33) помножимо і поділимо на заряд Q , так що

$$I_{DS} = TW \frac{|Q|q}{|Q|h} \left(\frac{g_v \sqrt{2\pi m^* kT}}{\pi \hbar} \right) kT [\mathfrak{F}_{1/2}(\eta_{FS}) - \mathfrak{F}_{1/2}(\eta_{FD})], \quad (35)$$

а потім заряд у знаменнику замінимо виразом (34). Після нескладних алгебраїчних перетворень одержуємо такі остаточні результати з урахуванням розсіяння для струму, вираженого через електронний заряд, у всьому діапазоні зміни напруги на стоку:

$$I_{DS} = W |Q(V_{GS}, V_{DS})| v_{inj} \left[\frac{1 - \frac{\mathfrak{F}_{1/2}(\eta_{FD})}{\mathfrak{F}_{1/2}(\eta_{FS})}}{1 + \frac{T}{2-T} \frac{\mathfrak{F}_0(\eta_{FD})}{\mathfrak{F}_0(\eta_{FS})}} \right],$$

$$Q = -q \frac{N_{2D}}{2} [\mathfrak{F}_0(\eta_{FS}) + (1-T)\mathfrak{F}_0(\eta_{FS}) + T\mathfrak{F}_0(\eta_{FD})],$$

$$v_{inj} = v_{inj}^{ball} \left(\frac{T}{2-T} \right), \quad (36)$$

$$v_{inj}^{ball} = \sqrt{\frac{2kT}{\pi m^*}} \frac{\mathfrak{F}_{1/2}(\eta_{FS})}{\mathfrak{F}_0(\eta_{FS})} = v_T \frac{\mathfrak{F}_{1/2}(\eta_{FS})}{\mathfrak{F}_0(\eta_{FS})},$$

$$\eta_{FD} = \eta_{FS} - qV_{DS}/kT.$$

Одержані вирази з урахуванням розсіяння можна порівняти з виразами (69) роботи [1] для балістичного струму. Оскільки $T < 1$, швидкість впорскування з урахуванням розсіяння назад v_{inj} менша від балістичної швидкості впорскування, $v_{inj} < v_{inj}^{ball}$, що призводить до струму, меншого порівняно з балістичним струмом.

Формули (36) можна спростити для невеликих і великих напруг на стоці таким самим чином, як було одержано вираз (70) роботи [1]. Для лінійної ділянки струму одержуємо

$$I_{DLIN} = W |Q(V_{GS})| T \frac{v_{inj}^{ball}}{2kT/q} \frac{\mathfrak{F}_{-1/2}(\eta_{FS})}{\mathfrak{F}_{1/2}(\eta_{FS})} V_{DS}, \quad (FD) \quad (37)$$

$$I_{DLIN} = W |Q(V_{GS})| T \frac{v_T}{2kT/q} V_{DS}, \quad (MB)$$

де обидві швидкості, v_{inj}^{ball} і v_T , потрібно брати з (25). Аналогічно одержуємо вирази для струму насичення:

$$I_{DSAT} = W |Q(V_{GS}, V_{DS})| \left(\frac{T}{2-T} \right) v_{inj}^{ball}, \quad (FD) \quad (38)$$

$$I_{DSAT} = W |Q(V_{GS}, V_{DS})| \left(\frac{T}{2-T} \right) v_T. \quad (MB)$$

При використанні статистики Фермі – Дірака потрібно знати розташування рівня Фермі. Знаходимо його з відомого значення електронного заряду з другого виразу в (36).

Ці результати, одержані з урахуванням розсіяння, порівняємо з балістичними результатами (26) та (27). Виявляється, що лінійний струм з урахуванням розсіяння відрізняється від лінійного балістичного струму тільки множенням на коефіцієнт проходження T , а струм насичення з урахуванням розсіяння можна записати з виразу для балістичного струму насичення помноживши його на $T/(2-T)$. Цю відмінність, пов'язану з балансом потоків (34), що визначають електронний заряд при врахуванні розсіяння, ми обговоримо нижче.

Вирази (36) описують цілісну вольтамперну характеристику MOSFET у моделі Ландауера-Датта-Лундстрома (ЛДЛ) через електронний заряд на вершині бар'єру Q та коефіцієнт проходження T . Однак, ці вирази не так просто використати на практиці, бо коефіцієнт проходження T залежить від напруги на стоку V_{DS} , що ми обговоримо нижче.

Вихідну характеристику ЛДЛ (36) можна обчислити так. Спершу обчислимо $Q(V_{GS}, V_{DS})$ з електростатики структури MOS, використовуючи, наприклад, напівемпіричний вираз (46) з роботи [14]. Потім, знаючи значення Q у другому рівнянні (36), обчислюємо значення електрохімічного потенціалу витоку η_{FS} . Це створює певні проблеми, бо для цього нам потрібно знати значення коефіцієнту проходження T і зрозуміти, яким чином коефіцієнт проходження $T(V_{GS}, V_{DS})$ залежить від прикладених напруг. Далі ми обчислюємо балістичну швидкість впорскування з четвертого з виразів (36), а потім швидкість впорскування з урахуванням розсіяння з третього з виразів (36). Нарешті, вираховуємо струм у точці (V_{GS}, V_{DS}) з першого виразу. Основна проблема обчислень за цією моделлю полягає в тому, що досі немає достатньо добрих моделей для

оцінки $T(V_{GS}, V_{DS})$. Саме тому таке широке застосування знайшла напівемпірична модель віртуального витоку.

На практиці часто використовують невироджену максвел-больцманівську форму цих виразів. Це призводить до певної похибки, особливо вище від порогу, однак, невироджені вирази набагато простіші, тож доводиться обирати поміж простотою обчислень і точністю. Відзначмо, однак, що використання невиродженої статистики для III-V FET може призвести до завеликих похибок.

Залежність коефіцієнту проходження від напруги на стоку

Попри всю простоту запропонованої вище моделі MOSFET на практиці виникає питання: як саме слід враховувати залежність коефіцієнту проходження від напруги на стоку. Фізичну причину цієї залежності T від V_{DS} розкриває рис. 11.

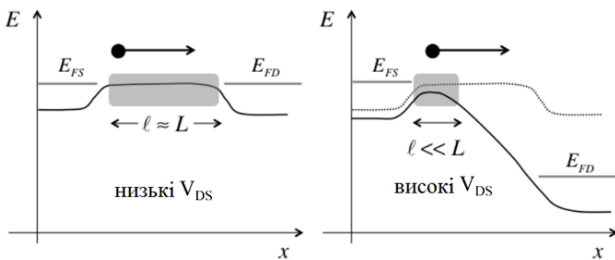


Рис. 11. Фізична причина виникнення залежності коефіцієнту проходження від напруги на стоку. Середню довжину вільного пробігу в «сирій зоні» в обох випадках вважаємо рівною λ_0

За низької напруги на стоку електричне поле невелике вздовж усього каналу провідності. Як ми вже показали вище, проходження визначається довжиною низькопольової частини каналу, тож за низької стокової напруги

$$T_{LIN} = \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + L}. \quad (39)$$

За високої напруги на стоку в ефективному транзисторі низькопольова область – невелика, завдовжки ℓ на самому початку каналу провідності. Високопольова область каналу працює

при цьому як майже ідеальний колектор електронів з $T \approx 1$, бо, попри наявність розсіяння, сильне поле «виносить» урешті-решт електрони на стік. Як ми вже показали раніше, проходження каналу в цьому випадку визначається довжиною низькопольової ділянки, тож для високих напруг на стоку

$$T_{SAT} = \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \ell}. \quad (40)$$

Таким чином, ми бачимо, що $T_{SAT} > T_{LIN}$, бо $\ell \ll L$. За високої напруги на стоці електрони в високопольовій області каналу провідності мають більший запас енергії і розсіюються більш інтенсивно, ніж за низьких V_{DS} . Однак, коефіцієнт проходження вищий для високих V_{DS} і через транзистор іде струм, близький до балістичної межі.

Розрахунок довжини низькопольової області каналу в залежності від напруги на затворі й на стоці потребує, взагалі кажучи, самоузгодженого розв'язання задачі електростатики за наявності потоку електронів [9, 12]. Коли профіль каналу $E_C(x)$ відомий, критичну довжину ℓ можна розрахувати [10, 15, 16]. Альтернативним підходом може бути використання емпіричної функції насичення стоку й швидкості впорскування в моделі віртуального витоку.

Наведемо числові параметри обговорюваних величин на прикладі ETSOI MOSFET з довжиною каналу $L = 25 \text{ нм}$ [17]. Параметри транзистора при 300 K такі [18]:

$$\begin{aligned} v_{inj} &= 0.82 \times 10^7 \text{ см/с}, \\ \lambda_0 &= 10.5 \text{ нм}. \end{aligned}$$

Використаємо також значення $v_T = 1.2 \times 10^7 \text{ см/с}$, відповідно до формули (15) роботи [19].

Для T_{LIN} згідно з (39) одержуємо:

$$T_{LIN} = \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + L} = \frac{10.5}{10.5 + 25} = 0.33.$$

Для розрахунку T_{SAT} використаємо третій з виразів (36):

$$T_{SAT} = \frac{2}{1 + v_T/v_{inj}} = 0.8.$$

Як і слід було очікувати, проходження набагато вище за високої напруги на стоці. Довжину критичної області ℓ знаходимо з виразу (40):

$$\ell = \lambda_0 \left(\frac{1}{T_{SAT}} - 1 \right) = 2.6 \text{ нм} \ll L.$$

Таким чином, довжина «вузького горла» на вершині бар'єру, що обмежує струм, складає приблизно 10% від довжини каналу провідності.

Може видатися дивним, що лінійний струм з урахуванням розсіяння (37) відрізняється від балістичного струму множителем T , тоді як струм насичення (38) – множителем $T/(2-T)$. Причиною цього в кінцевому підсумку є електростатика MOS, а пояснення може дати розгляд ситуації високої напруги на стоці з нехтовно малим впорскуванням електронів на вершину бар'єру з боку стоку.

Розгляньмо спершу балістичну ситуацію, зображену на рис. 12 згори. Струм I_{ball}^+ впорскується витоком. У цьому випадку заряд на вершині бар'єру формується тільки електронами, інжекткованими витоком. Оскільки струм – це добуток заряду на швидкість, то заряд на вершині бар'єру, в припущенні статистики Максвелла – Больцмана,

$$\underline{Q}|_{x=0} = -\frac{I_{ball}^+}{W v_T}. \quad (41)$$

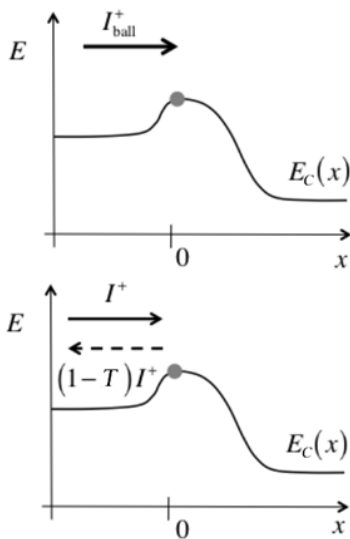


Рис. 12. Інжекткований і розсіяний назад потік електронів при високій напрузі на стоці: балістична ситуація (згори) та ситуація з розсіянням назад (знизу)

Тепер розглянемо ситуацію з зарядом за наявності розсіяння. Як зображено на рис. 12 знизу, заряд на вершині бар'єру формується двома потоками електронів: потоком з боку витоку з додатними швидкостями і зворотним потоком електронів з від'ємними швидкостями, тож сумарний заряд

$$\underline{Q}|_{x=0} = -\frac{I^+ + (1-T_{SAT})I^+}{W v_T} = -\frac{(2-T_{SAT})I^+}{W v_T}. \quad (42)$$

В ефективному транзисторі електронний заряд на вершині бар'єру $\underline{Q}|_{x=0}$ визначається переважно електростатикою MOS і не повинен залежати від режиму транспорту: заряд у балістичних умовах (41) повинен бути таким самим, як і при врахуванні розсіяння (42). Прирівнюючи ці заряди, знаходимо, що

$$I^+ = \frac{I_{ball}^+}{(2-T_{SAT})}. \quad (43)$$

При врахуванні розсіяння $T < 1$, тож менший інжектований потік електронів створює на вершині такий самий електронний заряд $\underline{Q}|_{x=0}$.

Струм стоку більший від інжектваного струму в T разів, і тому для балістичного випадку з $T = 1$ одержуємо

$$I_{DS}^{ball} = I^+ = I_{ball}^+, \quad (44)$$

а для струму I_{DS} в загальному випадку ($T < 1$) з урахуванням (43) маємо

$$I_{DS} = T_{SAT} I^+ = \frac{T_{SAT}}{(2-T_{SAT})} I_{ball}^+. \quad (45)$$

Тож врахування ролі електростатики MOS призводить до того, що струм насичення в умовах розсіяння дорівнює балістичному струму насичення, помноженому на $T/(2-T)$.

Обговоримо також фізичний зміст поняття рухливості в нанорозмірних MOSFET. Згідно з виразом (50) роботи [1], рухливість пропорційна до середньої довжини вільного пробігу. В транспортній теорії поняття рухливості добре визначене поблизу рівноваги в масивному провіднику з довжиною, що в багато разів перевищує середню довжину вільного пробігу [2]. В сучасних транзисторах довжина каналу провідності того ж порядку величин, що й се-

редня довжина вільного пробігу, і при високій напрузі на стоці електрони далекі від стану рівноваги. Тим не менше, практика показує, що квазірівноважна рухливість надійно описує функціонування нанорозмірних транзисторів.

Яке значення має поняття рухливості для нанорозмірних MOSFET? Як ми вже обговорювали у зв'язку з рис. 11, майже рівноважна середня довжина вільного пробігу λ_0 контролює струм у всьому діапазоні зміни напруг на стоку. Нехай рівноважний потік електронів впорскується витоком. За низької напруги на стоці ці електрони залишаються квазірівноважними у всьому каналі провідності. За високої напруги на стоці електрони набувають кінетичну енергію, їхня швидкість розсіяння збільшується, а середня довжина вільного пробігу зменшується. Однак, як ми вже пересвідчилися, саме низькопольова область каналу відповідає за проходження. Електрони квазірівноважні в цій області каналу провідності, їхня середня довжина вільного пробігу контролює струм як за низьких, так і за високих напруг на стоку.

Експериментально підтверджену кореляцію між функціональністю нанотранзисторів та рухливістю можна пояснити тим, що рухливість пропорційна квазірівноважній середній довжині вільного пробігу, яка й контролює струм нанотранзистора від низьких до високих значень напруг на стоці. Звісно, це надто спрощений аргумент. У короткоканальних транзисторах можуть відбуватися перепади механічних напруг і рівня легування, тож електрони не перебувають точно в рівновазі. В дуже коротких каналах електрони, які входять у канал з боку витоку, можуть збудити плазмові коливання поблизу витоку, які знизять середню довжину вільного пробігу [17, 20]. Такий ефект спостерігається експериментально, однак, твердження про те, що струм за високої напруги на стоці надійно корелює з квазірівноважною рухливістю, як видається, цілком відповідає сформованим уявленням про фізику процесів у нанотранзисторах і призводить до достатньо точних результатів на практиці.

Підіб'ємо підсумки. Ми докладно розглянули якісну картину явищ розсіяння електронів у каналі провідності нанотранзисторів і сформу-

лювали найважливіші результати через набір формул (18), у якому ключовим є поняття коефіцієнту проходження $T(E)$, який записується через середню довжину вільного пробігу щодо розсіяння назад $\lambda(E)$ і довжину каналу провідності L . Далі узагальнена теорія електронного транспорту Ландауера – Датта – Лундстрома дозволила побудувати модель проходження MOSFET з урахуванням розсіяння електронів. Обмеження, накладені електростатикою MOS, враховано в виразі Ландауера для струму (19). Наслідком стала модель проходження MOSFET, записана через зведення формул (36) для лінійної області та області насичення вихідної характеристики нанотранзистора, яку корисно порівняти з балістичною моделлю MOSFET (вираз (69) роботи [1]). Якщо транзистор працює в підпороговому режимі, можна скористатися невинородженою статистикою. Однак, у режимі вище від порогу зона провідності в точці вершини бар'єру близька до рівня Фермі, чи навіть нижча від нього, тож потрібно використовувати статистику Фермі – Дірака. Тим не менше, в теорії пристроїв зі структурою MOS зазвичай використовують невинороджену статистику Максвелла – Больцмана, бо це суттєво спрощує розрахунки, призводить до простіших формул і робить теорію зрозумілішою. На практиці так само зазвичай декотрі параметри транзистора не відомі з достатньою точністю, і за використання невинородженої статистики їх можна розглядати як параметри припасування, забезпечуючи тим цілком прийнятні результати.

Отримані вирази добре узгоджуються з фізикою процесів у лінійній області та в області насичення, але для всього діапазону змін напруги на стоці ми не маємо достатньо надійної моделі для опису залежності $T(V_{DS})$. Далі буде показано, як можна об'єднати модель проходження та модель віртуального витоку й таким чином вийти на моделювання всієї цілісної вихідної характеристики MOSFET.

Увесь цей цикл статей став наслідком прослуховування проф. Юрієм Олексійовичем Кругляком курсу лекцій «Fundamentals of Nanotransistors» [5], прочитаних он-лайн в 2016 році проф. Марком Лундстромом (Mark Lundstrom), в рамках ініціативи Purdue

University / nanoHUB-U [www.nanohub.org/u]. На жаль, після відходу проф. Юрія Кругляка завершувати статтю припало вже другому співавторові, який використав при цьому залишені Юрієм Олексійовичем чернетки та власні напрацювання авторського курсу «Фізика конденсованого середовища», що він упродовж останніх років читає для магістрів факультету радіофізики, електроніки і комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Список використаної літератури

- [1]. Yu. A. Kruglyak, M. V. Strikha. Sensor-na elektronika i mikrosystemni tekhnolohii. **16**, No 4, 5 – 26 (2019).
- [2]. M. Lundstrom, *Fundamentals of Carrier Transport* (Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press: 2000).
- [3]. M. Lundstrom, C. Jeong, *Near-equilibrium transport. Fundamentals and Applications* (Singapore: World Scientific: 2013).
- [4]. Yu. A. Kruglyak, Nanoehlektronika «snizu – vverh» (Odessa: TES: 2015).
- [5]. M. Lundstrom, *Fundamentals of Nanotransistors* (Singapore: World Scientific: 2018); www.nanohub.org/courses/NT.
- [6]. P. A. M. Dirac, *Proc. Royal Soc. A*, **114**, 243 – 265 (1927).
- [7]. E. Fermi, *Nuclear Physics* (Chicago: Univ. of Chicago Press: 1950).
- [8]. P. J. Price, *Semiconductors and Semimetals*, **14**, 249 – 308 (1979).
- [9]. P. Palestri, D. Esseni, S. Eminent, C. Fiegna, E. Sangiorgi, L. Selmi, *IEEE Trans. Electron Dev.*, **52**: 2727 – 2735 (2005).
- [10]. R. Clerc, P. Palestri, L. Selmi, G. Ghibaud, *J. Appl. Phys.*, **110**, 104502 (2011).
- [11]. Changwook Jeong, Raseong Kim, M. Luisier, S. Datta, M. Lundstrom, *J. Appl. Phys.*, **107**, 023707 (2010).
- [12]. M. V. Fischetti, T. P. O'Regan, N. Sudarshan, C. Sachs, S. Jin, J. Kim, Y. Zhang, *IEEE Trans. Electron Dev.*, **54**: 2116 – 2136 (2007).
- [13]. Yu. A. Kruglyak, M. V. Strikha. Sensor-na elektronika i mikrosystemni tekhnolohii. **16**, No 1, 7 – 40 (2019).
- [14]. Yu. A. Kruglyak, M. V. Strikha. Sensor-na elektronika i mikrosystemni tekhnolohii. **16**, No 3, 19 – 41 (2019).
- [15]. G. Gildenblat, *J. Appl. Phys.*, **91**, 9883 – 9886 (2002).
- [16]. S. Rakheja, M. Lundstrom, D. Antoniadis, *Intern. Electron Dev. Mtg. (IEDM), Technical Digest*, 35.1.1 – 35.1.4 (2014).
- [17]. T. Uechi, T. Fukui, N. Sano, *Phys. Status Solidi C*, **5**, 102 – 106 (2008).
- [18]. A. Majumdar, D. A. Antoniadis, *IEEE Trans. Electron Dev.*, **61**: 351 – 358 (2014).
- [19]. Yu. A. Kruglyak, M. V. Strikha. Sensor-na elektronika i mikrosystemni tekhnolohii. **17**, No 1, 4 – 20 (2020).
- [20]. M. V. Fischetti, S. E. Laux, *J. Appl. Phys.*, **89**, 1205 – 1231 (2001).

Стаття надійшла до редакції 06.05.2020 р.

PACS numbers: 71.15.Mb, 71.20.-b, 73.22.Pr, 73.23.Ad, 84.32.Ff, 85.35.-p

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2020.2.205822>

PHYSICS OF NANOTRANSISTORS: ELECTRON SCATTERING AND MOSFET TRANSMISSION MODEL

Yu. A. Kruglyak, M. V. Strikha*

Odesa State Environmental University,

Faculty of Computer Sciences

15 Lvivska Str, Odesa, Ukraine

* Taras Shevchenko Kyiv National University

Faculty of Radiophysics, Electronics and Computer Sciences,

4g Hlushkov Av, Kyiv, Ukraine, phone (044) 526 0532

V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine,

41 Nauky Av, Kyiv, Ukraine, phone (044) 525 6033

E-mail: maksym.strikha@gmail.com

Summary

In the seventh one from the line our new tutorial reviews, directed to serve students, university teachers and researchers, a qualitative picture of electron scattering phenomena in the conduction channel of nanotransistors was considered in detail and important results were formulated in the form of a summary of formulas (18). The concept of the transmission coefficient $T(E)$ expressed through the mean free path $\lambda(E)$ and the conduction channel length L is a key one in our examination. Later the generalized Landauer – Datta – Lundstrom transport theory made it possible to construct a model for the transmission of a MOSFET with allowance for the scattering of electrons. The limitations imposed by MOS electrostatics are taken into account in the Landauer expression for the current (19). The result was a model for passing the MOSFET in the form of a summary of formulas (36) for calculating the linear region and saturation region of the output characteristic of a nanotransistor, which can be compared with the ballistic model of MOSFET (69/[1]). If the transistor operates in a subthreshold mode, one can use nondegenerate statistics. However, in the regime above the threshold, the conduction band at the top of the barrier is close to or even below the Fermi level, so we need to use the Fermi – Dirac statistics. Nevertheless, it has become a practice in the theory of MOS devices to use the nondegenerate Maxwell – Boltzmann statistics, since it greatly simplifies calculations, leads to simpler formulas, and makes the theory more understandable. In practice, also usually some parameters of the transistor are not known with sufficient accuracy, and in the case of using nondegenerate statistics they can be considered as fitting parameters, providing quite acceptable results. The equations obtained are in good agreement with the physics of processes both in the linear region and in the saturation region; however, for the whole region of voltage variation in the drain we do not have a sufficiently reliable model for the dependence $T(V_{DS})$. Next, we show how you can combine the transmission model and the virtual source model, and thus go to simulate the entire MOSFET output characteristic.

Keywords: nanoelectronics, field effect transistor, MOSFET, LDL model, transistor metrics, electron scattering, transmission model

ФІЗИКА НАНОТРАНЗИСТОРІВ: РОЗСІЯННЯ ЕЛЕКТРОНІВ І МОДЕЛЬ ПРОХОДЖЕННЯ MOSFET

Ю. О. Кругляк, М. В. Стріха*

Одеський державний екологічний університет,
факультет комп'ютерних наук,
вул. Львівська, 15, Одеса, Україна

* Київський національний університет ім. Тараса Шевченка,
факультет радіофізики, електроніки і комп'ютерних систем,
пр. Глушкова, 4г, Київ, Україна, тел. (044) 526 0532;
Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України,
пр. Науки, 41, Київ, Україна, тел. (044) 525 6033,
E-mail: maksym_strikha@hotmail.com

Реферат

У сьомій із нової серії методично-оглядових статей, орієнтованих на дослідників, студентів, аспірантів та викладачів вищої школи, ми докладно розглянули якісну картину явищ розсіяння електронів у каналі провідності нанотранзисторів і сформулювали найважливіші результати через набір формул (18). У цьому розгляді ключовим є поняття коефіцієнту проходження $T(E)$, який записується через середню довжину вільного пробігу щодо розсіяння назад $\lambda(E)$ і довжину каналу провідності L . Далі узагальнена теорія електронного транспорту Ландауера – Датта – Лундстрома дозволила побудувати модель проходження MOSFET з урахуванням розсіяння електронів. Обмеження, накладені електростатикою MOS, враховано в виразі Ландауера для струму (19). Наслідком стала модель проходження MOSFET, записана через зведення формул (36) для лінійної області та області насичення вихідної характеристики нанотранзистора, яку корисно порівняти з балістичною моделлю MOSFET (вираз (69) роботи [1]). Якщо транзистор працює в підпороговому режимі, можна скористатися невиродженою статистикою. Однак, у режимі вище від порогу зона провідності в точці вершини бар'єру близька до рівня Фермі, чи навіть нижча від нього, тож потрібно використовувати статистику Фермі – Дірака. Тим не менше, в теорії пристроїв зі структурою MOS зазвичай використовують невироджену статистику Максвелла – Больцмана, бо це суттєво спрощує розрахунки, призводить до простіших формул і робить теорію зрозумілішою. На практиці так само зазвичай декотрі параметри транзистора не відомі з достатньою точністю, і за використання невиродженої статистики їх можна розглядати як параметри припасування, забезпечуючи тим цілком прийнятні результати.

Отримані вирази добре узгоджуються з фізикою процесів у лінійній області та в області насичення, але для всього діапазону змін напруги на стоці ми не маємо достатньо надійної моделі для опису залежності $T(V_{DS})$. Далі буде показано, як можна об'єднати модель проходження та модель віртуального витоку й таким чином вийти на моделювання всієї цілісної вихідної характеристики MOSFET.

Ключові слова: наноелектроніка, польовий транзистор, MOSFET, модель ЛДІ, метрика транзисторів, розсіювання електронів, модель проходження

БІОСЕНСОРИ

BIOSENSORS

УДК 543.06:577.15:543.553

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2020.2.205823>

РОЗРОБКА ТА ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ АМПЕРОМЕТРИЧНОГО БІОСЕНСОРА НА ОСНОВІ ГЛУТАМАТОКСИДАЗИ ДЛЯ АНАЛІЗУ ГЛУТАМАТУ В СИРОВАТЦІ КРОВІ

Д. О. Мруга^{1,2}, Д. Ю. Кучеренко¹, Т. О. Борисова³, С. В. Дзядевич^{1,2}, О. О. Солдаткін^{1,2}

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

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

³Інститут біохімії імені О. В. Палладіна НАН України,
вул. Леонтовича, 9, 01601, м. Київ, Україна

РОЗРОБКА ТА ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ АМПЕРОМЕТРИЧНОГО БІОСЕНСОРА НА ОСНОВІ ГЛУТАМАТОКСИДАЗИ ДЛЯ АНАЛІЗУ ГЛУТАМАТУ В СИРОВАТЦІ КРОВІ

Д. О. Мруга, Д. Ю. Кучеренко, Т. О. Борисова, С. В. Дзядевич, О. О. Солдаткін

Анотація. В даній роботі оптимізовано амперометричний глутамат-чутливий біосенсор. Як перетворювач було використано платиновий дисковий електрод. Біоселективний елемент біосенсора створений на основі ферменту глутаматоксидази, ковалентно зв'язаної з бичачим сироватковим альбуміном за допомогою глутарового альдегіду. Було оптимізовано умови іммобілізації ферменту на поверхні перетворювача (концентрації ферменту і глутарового альдегіду та час іммобілізації). Для перевірки можливості функціонування даного біосенсора в складних біологічних речовинах було досліджено вплив температури та наявності білку в зразку, що аналізується, на роботу біосенсора. Також в роботі було перевірено селективність розробленого біосенсора відносно можливих інтерферуючих речовин. Лінійний діапазон біосенсора лежав в межах від 5 до 600 мкМ глутамату, а чутливість становила 150-200 нА/мМ. Мінімальна границя визначення складала 2 мкМ глутамату. Отримані дані свідчать про можливість та перспективність застосування розробленого біосенсора для визначення вмісту глутамату в зразках сироватки крові.

Ключові слова: амперометричний метод, біосенсор, іммобілізований фермент, глутаматоксидаза, концентрація глутамату

DEVELOPMENT AND OPTIMIZATION OF CONSTRUCTION OF AMPEROMETRIC BIOSENSOR BASED ON THE GLUTAMATE OXIDASE FOR DETECTION OF GLUTAMATE IN THE SERUM SAMPLES

D. O. Mruga, D. Yu. Kucherenko, T. O. Borisova, S. V. Dzyadevych, O. O. Soldatkin

Abstract. In this study, an amperometric glutamate-sensitive biosensor has been optimized. The platinum disk electrode was used as a transducer. The enzyme glutamate oxidase that is covalent crosslinked with bovine serum albumin by glutaraldehyde was used as a bioselective element. Conditions of enzyme immobilization on the transducer surface were optimized (enzyme and glutaraldehyde concentrations and immobilization time). To test the possibility of this biosensor functioning in complex biological samples, the influence of the working solution parameters on the biosensor operation was investigated (concentration of the working buffer solutions, its temperature, presence of the protein in the analyzed sample). In addition, the selectivity of the developed biosensor with regarding to possible interference was tested. Linear range of biosensor was obtained in the range of 5 to 600 μM of glutamate and the sensitivity was 150-200 nA/mM. The minimum limit of detection was 2 μM glutamate. The obtained data indicate the possibility of application of developed biosensor for determination of content of glutamate in the serum samples.

Keywords: amperometric method, biosensor, immobilized enzyme, glutamate oxidase, glutamate concentration

РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ АМПЕРОМЕТРИЧЕСКОГО БИОСЕНСОРА НА ОСНОВЕ ГЛЮТАМАТОКСИДАЗЫ ДЛЯ АНАЛИЗА ГЛЮТАМАТА В ОБРАЗЦАХ СЫВОРОТКИ КРОВИ

Д. А. Мруга, Д. Ю. Кучеренко, Т. А. Борисова, С. В. Дзядевич, А. А. Солдаткин

Аннотация. В данной работе оптимизирован амперометрический глютамат-чувствительный биосенсор. В качестве преобразователя был использован платиновый дисковый электрод. Биоселективный элемент биосенсора разработанный на основе глютаматоксидазы, ковалентно связанной с бычьим сывороточным альбумином с помощью глутарового альдегида. Оптимизированы условия иммобилизации фермента на поверхности преобразователя (концентрации фермента и глутарового альдегида, время иммобилизации). Для проверки возможности функционирования данного биосенсора в сложных биологических образцах исследовали влияние температуры и наличия белка в анализируемом образце на работу биосенсора. Также в работе проверена селективность разработанного биосенсора относительно возможных интерферирующих веществ. Линейный диапазон биосенсора лежал в пределах от 5 до 600 мкМ глютамата, а чувствительность составляла 150-200 нА/мМ. Минимальная граница определения составляла 2 мкМ глютамата. Полученные данные свидетельствуют о возможности и перспективности применения разработанного биосенсора для определения содержания глютамата в образцах сыворотки крови.

Ключевые слова: амперометрический метод, биосенсор, иммобилизованный фермент, глютаматоксидаза, концентрация глютамата

Вступ

Глутамат або глутамінова кислота є найбільш поширена амінокислота в організмі – вона складає близько третини всіх циркулюючих в крові амінокислот. Глутамат займає важливе місце в біохімічних шляхах та фізіологічних процесах людини та інших тварин. Крім ролі джерела синтезу замісних амінокислот і будівельного матеріалу для білків, він також виконує регуляторну функцію: присутність глутамату підвищує вміст Na^+ в серці, скелетних м'язах та нирках, K^+ в серці, нирках і печінці, знижуючи його вміст в плазмі [1], а глутаматні рецептори стимулюють вивільнення Ca^{2+} з ендоплазматичного ретикулуму [2].

Також глутамат бере участь у підтриманні гомеостазу міжклітинного аміаку (як амінокислотний човен, що транспортує аміак через мембрани [3]) та загалом в азотному обміні в організмі, зокрема, глутамат відіграє суттєву роль в знешкодженні токсичного аміаку, надлишок якого спостерігається при гіпоксії, гіпероксії та аміачному отруєнні.

Проте, найбільш впливовою функцією глутамату є його медіаторна роль, адже глутамат – найпоширеніший нейротрансмітер [4], що активує іонотропні та метаболічні глутаматні рецептори, та безпосередній попередник інгібуючого нейромедіатора γ -аміномасляної кислоти. З іншого боку, надмірна кількість глутамату може викликати пошкодження нейронів, пов'язані з такими захворюваннями, як аміотрофічний бічний склероз, латиризм та хвороби Альцгеймера та Паркінсона [5]. Крім того, високий рівень глутамату в крові та інших біологічних рідинах свідчить про наявність ішемічного інсульту, епілепсії чи інших неврологічних розладів [6], він слугує маркером діабетичної ретинопатії та раку підшлункової залози, а також може бути засобом діагностування раннього аутизму. Саме тому необхідно розробити пристрій для моніторингу рівня глутамату в плазмі крові.

Концентрацію глутамату в крові можна визначити такими методами як високоефективна рідинна хроматографія [7], газова хроматографія [8,9,10,11], капілярний електрофорез [12], потенціометричне титрування [13], флуориметрія [14], спектрофотометрія [15] та хемілюмі-

несценція [16] і, навіть, радіочастотний сигнал [17]. Всі ці методи дуже чутливі та точні, однак потребують складного та дорогого обладнання [18,19], кваліфікованого персоналу, трудомісткої пробопідготовки зразка, більше того, вони непридатні для швидкого вимірювання [20] чи аналізу великої кількості зразків, що критично в клінічній біохімії. Зрозуміло, що на сьогодні є актуальним створення мобільного, точного, швидкого, селективного та дешевого способу вимірювання вмісту глутамату в біологічних зразках.

Саме тому останнім часом активно розвиваються фізико-біологічні методи моніторингу, зокрема біосенсиори. На сьогодні існує низка розроблених біосенсорів. Серед них є як оптичні, так і електрохімічні біосенсиори для визначення глутамату. В основі їх роботи лежать ферментативні реакції за участі глутаматоксидази [21,22], глутаматдегідрогенази [23,24], глутаматсинтетази та глутаматдекарбоксилази [25,26,27], а іммобілізація ферментів проводилася на Ni-Pd наночастинках [28], оптично-волоконному датчику [29], твердотільному електроді на основі непластифікованого хітозана [30], золотому електроді, що був модифікований поліаніліном та наночастинками поліпропілору [31], та товстоплівковому платиновому електроді [32].

Метою даної роботи була розробка оптимальної конструкції амперометричного біосенсора на основі глутаматоксидази для визначення концентрації глутамату в сироватці крові та підбір найкращих умов його експлуатації.

Матеріали і методи

Матеріали

Для створення біосенсора було використано фермент - рекомбінантна глутаматоксидаза (ГЛОД), отримана з *Streptomyces sp.* з активністю 7 од. акт. мг^{-1} (Yamasa Corporation, Японія). Бичачий сироватковий альбумін (фракція V)(BCA), 25% водний розчин глутарового альдегіду (ГА), гліцерин, HEPES, метафеніллендіамін було отримано від фірми Sigma-Aldrich (США). Як субстрат було використано L-глутамат натрію (Sigma-Aldrich, США). Інші неорганічні сполуки, що використовувалися в роботі, зокрема пероксид водню, етиловий

спирт були вітчизняного виробництва та мали ступінь чистоти „х.ч.“ та „ч.д.а.“.

Конструкція амперометричного перетворювача

Як фізичний перетворювач використовувався платиновий дисковий електрод, схема якого приведена на рис. 1. Для виготовлення такого електроду платиновий дріт запаювали в скляний капіляр та легкоплавким сплавом Вуда з'єднували його з внутрішнім провідником. Зріз платинового дроту, що контактує з оточуючим середовищем є робочою зоною. Епоксидною смолою герметизувався протилежний від робочої зони кінець скляної трубки та приєднувалася контактна площина для підключення електроду до вимірювальної системи. Робочу зону перед першим використанням та періодично в подальшому використанні механічно обробляли за допомогою шліфувального паперу та пасти з порошку оксиду алюмінію різного діаметру (0,3 та 0,05 мкм). Очищення робочої поверхні спиртовим розчином здійснювалося перед кожним нанесенням біоселективного елементу.

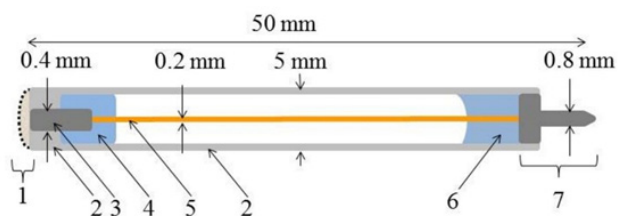


Рис. 1. Схематичне зображення амперометричного електроду на основі платинового дроту діаметром 0,4 мм: 1 – біоселективний елемент; 2 скляний корпус електроду; 3 – платиновий дріт; 4 – електричне з'єднання за допомогою легкоплавкого сплаву Вуда; 5 - внутрішній провідник; 6 – епоксидна смола; 7 – контактна площина стандартного типу

Методика нанесення поліфенілендіамінової мембрани

При вимірюванні концентрації глутамату в зразках сироватки крові необхідно підвищити селективність біосенсору, оскільки на ньому може окиснюватися не лише субстрат, а й інші молекули, що містяться в крові, наприклад, аскорбінова кислота. Висока селективність амперометричних перетворювачів до перекису

водню в присутності електроактивних речовин досягається шляхом електрохімічного нанесення на чисту поверхню платинового дроту напівпроникної мембрани на основі полі-*мета*-фенілендіаміну, яка утворює пори, достатні за розміром для проходження пероксиду водню до поверхні перетворювача, і які затримують молекули більшого діаметру. Для формування цієї мембрани відшліфований та очищений за допомогою спирту електрод занурюють в захищену від світла комірку з 5 мМ розчином *мета*-фенілендіаміну та полімеризують методом циклічної вольтаметрії (рис. 2). Робиться 10-20 циклів, допоки вольтаметричні криві майже не будуть відрізнятися одна від одної, що свідчить про повне покриття поверхні електрода шаром полі-*мета*-фенілендіаміна.

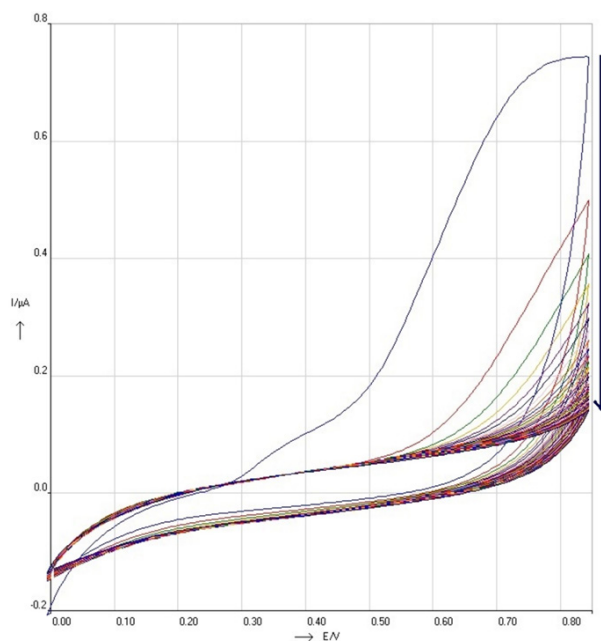


Рис. 2. Циклічні вольтаметричні графіки, отримані при формуванні ПД-мембрани на платиновому дисковому електроді, впродовж 30 циклів. Потенціал змінювався в межах від 0 до 850 мВ

Методика нанесення біоселективного елементу

Для створення чутливого до глутамату біоселективного елементу біосенсору взяли за основу метод ковалентної іммобілізації фермента на поверхні електроду за допомогою глутарового альдегіда (ГА). Готувався гель, що містив 8% (масова частка) ГЛОД, 4% БСА та

10% гліцерину у 100 мМ фосфатному буфері, рН 6,5. Гліцерин був необхідний для стабілізації ферменту і покращення адгезії мембрани. Наступним кроком цей гель змішувався з водним розчином ГА (0,1%) в співвідношенні 1:4. Отриману суміш одразу наносили на чутливу зону електроду і висушували на повітрі за кімнатної температури протягом 35 хвилин. Готовий біосенсор відмивали від незв'язаних компонентів біоселективної мембрани в робочому буфері (HEPES) протягом 10 хвилин.

Схема установки для амперометричних вимірювань

В ході експерименту використовувалася триелектродна схема амперометричного аналізу (схематичне зображення приведено на рис. 3). Робочі біосенсиори, допоміжний платиновий електрод (що має значно більшу робочу поверхню і необхідний для замкнення ланцюга, тобто повернення електронів до розчину під дією напруги, що спричиняє на ньому процес відновлення, за величиною еквівалентний процесу окиснення на робочому електроді) та хлор-срібний (Ag/AgCl) електрод порівняння (необхідний для коректного вимірювання поданого потенціалу) підключались до потенціостату PalmSens (Palm Instruments BV, Нідерланди). До потенціостата також підключався пристрій (8-канальний PalmSens multiplexer),

що дозволяв отримувати сигнали з декількох робочих електродів одночасно). Відстань між всіма електродами була однаковою і складала близько 5 мм.

Методика вимірювання

Вимірювання проводилися за кімнатної температури у відкритій комірці об'ємом 2,5 мл, при постійному перемішуванні та постійному потенціалі (який був попередньо підібраний експериментальним шляхом) +0,6 В відносно Ag/AgCl електроду порівняння, що відповідає потенціалу окиснення пероксиду водню H_2O_2 на аноді.

Робочим буфером слугував 25 мМ HEPES з рН 7,4, а концентрація субстрату в комірці задавалась додаванням аліквоти концентрованого розчину. Усі дослідження проводились декілька раз, а дані, наведені в роботі, є середнім значенням. Всі розрахунки проводились в програмі OriginLab PrigonPro 8.5.

Результати та обговорення

Принцип роботи біосенсора

В основі роботи біосенсора лежить ферментативна реакція (1), що протікає в біоселективній мембрані, в результаті якої окиснюється глутамат та утворюється електрохімічно-активний пероксид водню.



Рис. 3. Схема експериментальної установки для амперометричних вимірювань

найбільшу чутливість біосенсор проявляє при іммобілізації фермента з використанням 0,05% та 0,1% ГА (рис. 5). Більш високі концентрації зшиваючого агенту призводили до надлишкової іммобілізації ферменту, а менш концентрований ГА не закріплював фермент достатньо щільно, в наслідок чого він вимивався з біоселективної мембрани впродовж роботи.

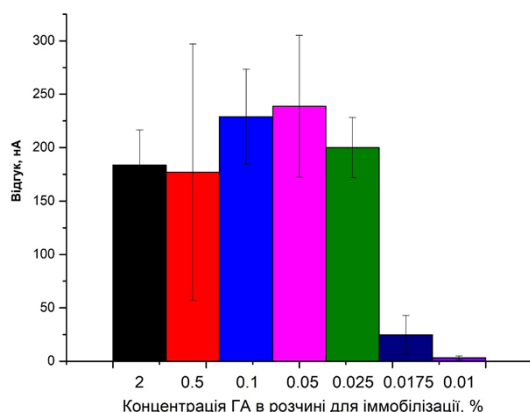


Рис. 5. Залежність величини відгуку біосенсора від концентрації ГА в розчині для іммобілізації. Концентрація глутамату – 1000 мкМ. Вимірювання проводились у 25 мМ HEPES буфері, рН 7,4, за постійного потенціалу +0,6 В відносно Ag/AgCl електрода порівняння

Визначення оптимальної тривалості іммобілізації

Ще одним важливим параметром при створенні біосенсора є тривалість іммобілізації. Вона суттєво впливає на якість біоселективної мембрани, адже за недостатній час ковалентні зшивки не встигнуть утворитися, а за надлишкового часу хімічна активність ГА призведе до незворотних змін в конформаційній структурі ГлОД, що негативно позначиться на роботі біосенсора. Тому вибір тривалості іммобілізації проводився на основі аналізу даних, з урахуванням величини відгуку та відтворюваності біосенсора. Оптимальна тривалість становила 35 хвилин (рис. 6).

Аналіз ефективності іммобілізації ферменту

Згідно з ферментативною реакцією, що протікає в біоселективній мембрані глута-

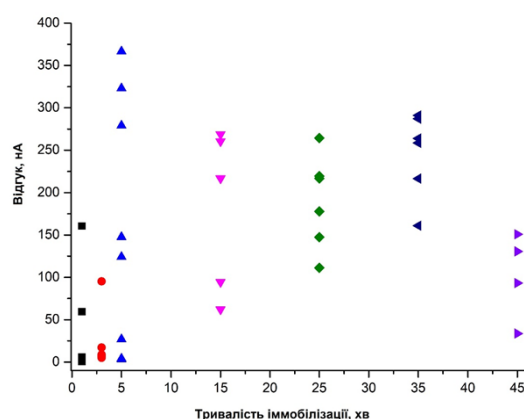


Рис. 6. Залежність величини відгуку біосенсора від тривалості іммобілізації ферменту. Концентрація глутамату – 1000 мкМ. Вимірювання проводились у 25 мМ HEPES буфері, рН 7,4, за постійного потенціалу +0,6 В відносно Ag/AgCl електрода порівняння

мат-чутливого біосенсора, при перетворенні однієї молекули субстрату утворюється одна молекула пероксиду водню. Відповідно, при ідеальних умовах іммобілізації ферменту та виготовлення біоселективного елементу біосенсора відгуки на додавання однакових концентрацій субстрату (глутамату) та пероксиду водню повинні бути майже однаковими. Звісно досягнути рівних відгуків на перексид водню та глутамат в реальних умовах не можливо, але по різниці відгуків можливо було аналізувати успішність іммобілізації.

Тому, для перевірки ефективності процедури іммобілізації ферменту необхідно було порівняти величини відгуків біосенсора на однакову концентрацію пероксиду водню та глутамату. Було показано, що розроблений біосенсор мав лише вдвічі меншу чутливість до глутамату, порівняно з чутливістю до пероксиду водню (рис. 7), що, враховуючи обмеження в дифузії, є достатньо гарним результатом і свідчить про успішну іммобілізацію ферменту.

Вплив присутності білкових молекул в розчині на ефективність роботи біосенсора

Майже в усіх біологічних рідинах часто присутня висока концентрація білку. На жаль, ці молекули можуть фізично забивати біоселективну мембрану біосенсора, погіршивши

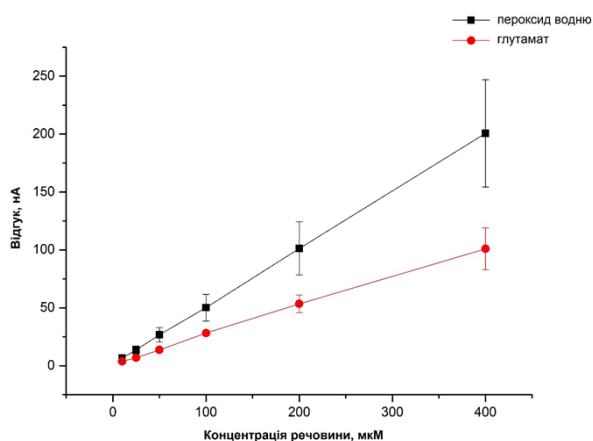


Рис. 7. Калібрувальні графіки біосенсора на перексид водню (1) та глутамат (2). Вимірювання проводились у 25 мМ HEPES буфері, рН 7,4, за постійного потенціалу +0,6 В відносно Ag/AgCl електрода порівняння

її проникні властивості. В результаті цього дифузія субстрату до активного центру ферменту ускладнюється і величина відгуку біосенсора падає. Результати дослідження впливу даного параметру на функціонування біосенсора продемонстровано на рис. 8А. Присутність в розчині сироваткового альбуміну у нормальних для біологічних рідин концентраціях (з урахуванням розведення зразка) мала деякий вплив на чутливість біосенсора до глутамату (падіння відгуку на 12-18% при наявності в розчині 3% БСА) (рис 8Б). При вимірюванні концентрації глутамату в реальних зразках нівелювати цей вплив можна за рахунок більшого розведення.

Вплив температури на роботу біосенсора

Відомо, що температура середовища впливає на швидкість утворення фермент-субстратного комплексу і, відповідно, швидкість протікання ферментативної реакції. Відповідно, було необхідно дослідити вплив температури робочого розчину на функціонування біосенсора. Було показано, що біосенсор на основі глутаматоксидази дуже чутливий до змін цієї характеристики середовища (рис 9А). Спочатку, за підвищення температури від кімнатної до 45°C збільшується величина відгуку біосенсора на 80%, а при подальшому зростанні температури до 80°C відбувається теплова де-

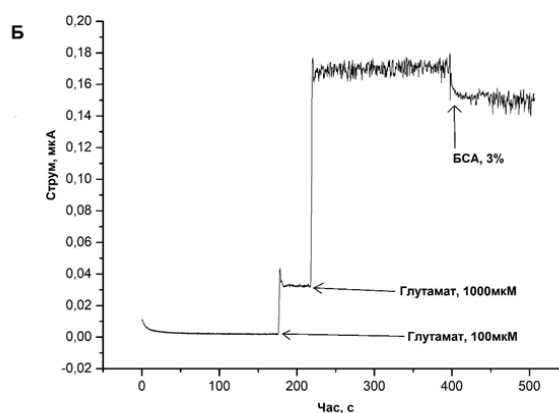
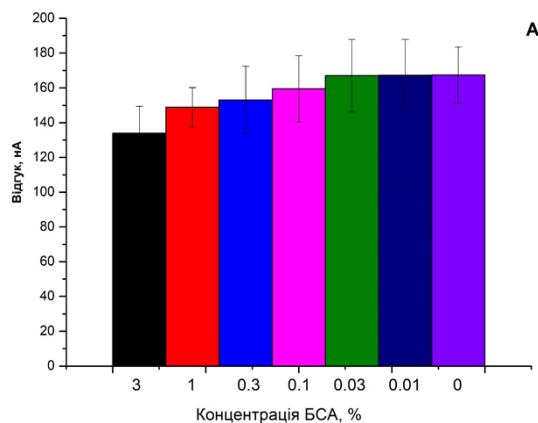


Рис. 8. Залежність величини відгуку біосенсора від присутності білка в робочій комірі (А) та падіння сигналу при внесенні білка (3%) в робочий буферний розчин під час вимірювання (Б). Концентрація глутамату – 1000 мкМ. Вимірювання проводились у 25 мМ HEPES буфері, рН 7,4, за постійного потенціалу +0,6 В відносно Ag/AgCl електрода порівняння

натурація білкової частини фермента, аж до її повного руйнування.

Для того, щоб довести, що дана залежність (рис 9А) зумовлена саме впливом температури на біоселективний елемент біосенсора, а не на фізичний перетворювач, необхідно було дослідити, як впливає температура на функціонування голого платинового електрода (рис. 9.Б). З рисунку 9.Б видно, що при збільшенні температури від 25°C до 80°C сигнал амперометричного сенсора рівномірно зростає, в той час як відгук біосенсора на субстрат спочатку зростає (до 45°C), а потім падає (з 45°C до

80°C), що свідчить про суттєвий вплив температури саме на ферментну мембрану.

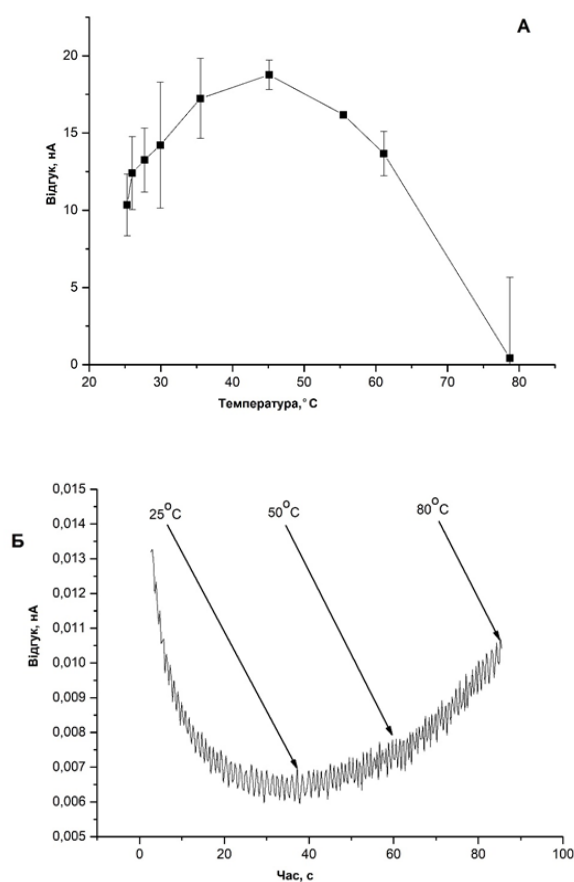


Рис. 9. Залежність величини відгуку біосенсора від температури робочого розчину (А) та зміна сигналу амперометричного перетворювача при підвищенні температури (Б). Концентрація глутамату – 100 мкМ. Вимірювання проводились у 25 мМ НЕРЕС буфері, рН 7,4, за постійного потенціалу +0,6 В відносно Ag/AgCl електрода порівняння

Вивчення селективності біосенсора

Глутамат-чутливий біосенсор призначений для визначення глутамату в зразках сироватки крові. Крім глутамату в даних зразках можуть бути присутні такі електроактивні речовини, що самостійно окиснюються при прикладенні потенціалу і можуть давати хибний позитивний відгук (аскорбінова кислота, цистеїн, сечова кислота та ін.). Їх вплив ми нівелювали використанням ПФД мембрани. Ефективність даного методу можна оцінити з графіків

(рис.10). Неселективні відгуки на аскорбінову кислоту та цистеїн зменшились на порядок і стали несуттєвими величинами порівняно з відгуком на перексид водню.

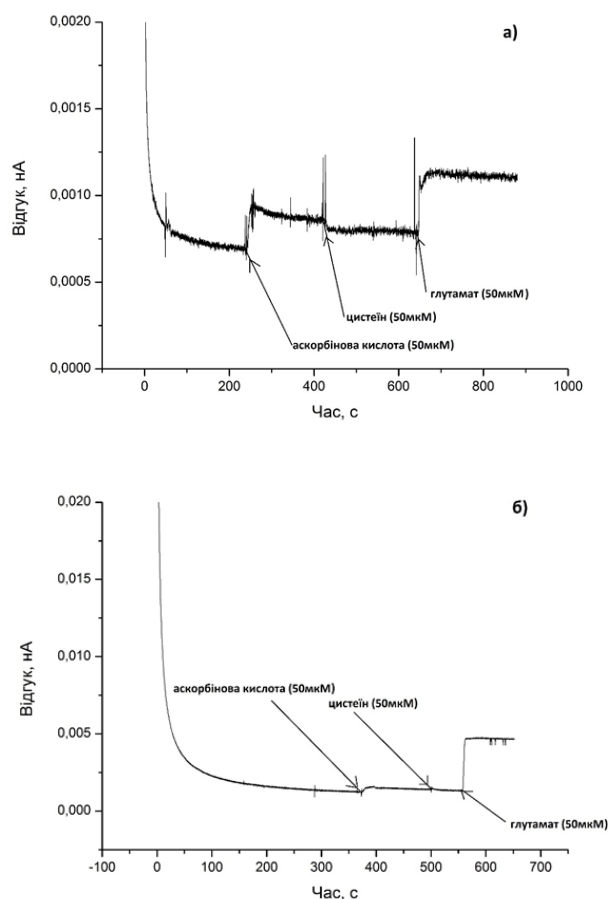


Рис. 10. Відгуки амперометричного перетворювача на додавання електроактивних речовин до (а) та після (б) нанесення ПФД мембрани. Концентрація перекису водню складала 100 мкМ, аскорбінової кислоти – 50 мкМ, цистеїну – 50 мкМ. Вимірювання проводились у 25 мМ НЕРЕС буфері, рН 7,4, за постійного потенціалу +0,6 В відносно Ag/AgCl електрода порівняння

Селективність будь-якого біосенсора залежить як від селективності перетворювача (що була покращена використанням додаткової ПФД-мембрани), так і від селективності біоселективного елементу. Відповідно, було перевірено селективність біосенсора відносно різних амінокислот (рис. 11). Виявлено невисоку чутливість до аспарагіну, глутаміну, аспарагінової кислоти та гістидину, що була

меншою в 50-100 разів, за чутливість біосенсора до глутамату. Відповідно присутність цих амінокислот в зразку не призводить до суттєвого відхилення у вимірюваннях, а інші амінокислоти не спричиняли відгуку біосенсора. Чутливість до деяких амінокислот можна пояснити неідеальною селективністю ГлОД до глутамату, а також наявністю у препараті ГлОД слідових кількостей інших ферментів (наприклад, оксидази L-амінокислот).

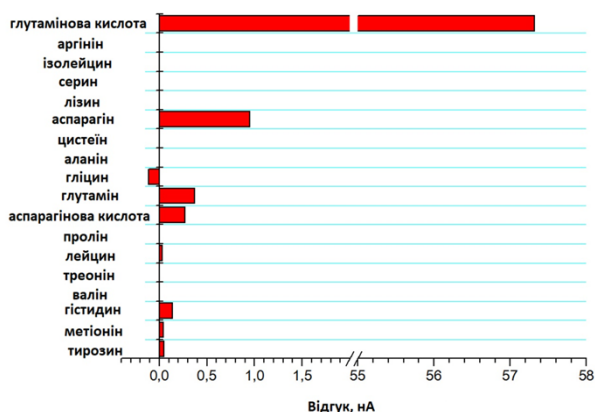


Рис. 11. Відгуки біосенсора на додавання різних амінокислот. Концентрації амінокислот – 1000 мкМ. Вимірювання проводились у 25 мМ НЕРЕС буфері, рН 7,4, за постійного потенціалу +0,6 В відносно Ag/AgCl електрода порівняння

Крім того, з літературних даних, відомо, що біологічні рідини можуть містити інші інтерференти, що можуть впливати на селективність біосенсора. Подальші дослідження показали, що сечовина, ЕДТА, глюкоза, лимонна кислота, бензойна кислота, азид натрію, α -кетоглутарат, NaCl, KCl та CaCl₂ не призводили до відгуків біосенсора при концентрації даних речовин у робочій комірці 1 мМ.

Аналітичні характеристики оптимізованого біосенсора

Останнім етапом розробки кожного біосенсора є дослідження його аналітичних характеристик. Відповідно, при дослідженні аналітичних характеристик розробленого біосенсора було встановлено, що, за умови оптимізації конструкції та параметрів роботи біосенсора, при використанні 25 мМ НЕРЕС

буферу, рН 7,4, мінімальна межа визначення глутамату становила 2 мкМ. Вона несуттєво змінювалась в залежності від конкретного біосенсора та зростала в процесі використання. Калібрувальний графік біосенсора для визначення глутамату наведено на рис. 12. Лінійний діапазон роботи біосенсора був від 5 до 600 мкМ, чутливість до глутамату становила 150-200 нА/мМ, а час відгуку – 5-20 с. (в залежності від концентрації глутамату).

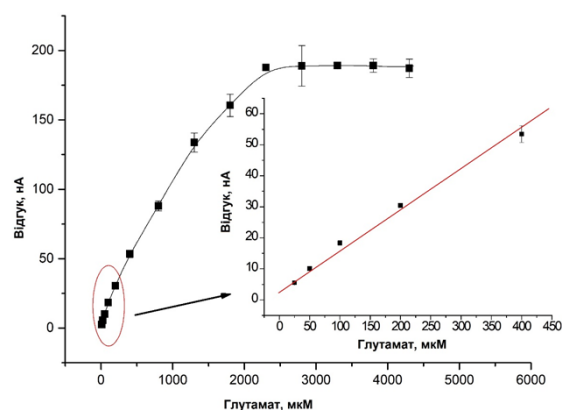


Рис. 12. Калібрувальний графік глутамат-чутливого біосенсора. Вимірювання проводились у 25 мМ НЕРЕС буфері, рН 7,4, за постійного потенціалу +0,6 В відносно Ag/AgCl електрода порівняння

Отримані аналітичні характеристики розробленого біосенсора свідчать про перспективність застосування даного біосенсора при аналізі концентрації глутамату в зразках сироватки крові.

Висновки

В роботі було розроблено амперометричний глутамат-чутливий біосенсор на основі іммобілізованої ГлОД та платинового дискового електрода, створено його лабораторний прототип, оптимізовано роботу та досліджено робочі характеристики.

В ході роботи було підібрано оптимальні умови іммобілізації ферменту на поверхні перетворювача: найбільш стабільні та високі відгуки біосенсора досягалися при змішуванні 1 об'єму розчину ГлОД (8%) та 4 об'ємів розчину ГА (0,05-0,1%) та тривалості іммобілізації на повітрі протягом 35 хвилин.

При підборі оптимальних умов експлуатації розробленого біосенсора було отримано залежність величини відгуків біосенсора від температури робочого буферного розчину. Також було показано, що розроблений біосенсор може працювати в біологічних зразках, що містять білкові компоненти, хоча і спостерігається деякий спад величини відгуку (10-12% при наявності 3% БСА в розчині).

Було проаналізовано селективність запропонованого в роботі біосенсора. Перевіряли, як селективність амперометричного перетворювача відносно електроактивних речовин, так і селективність біоселективного елемента відносно різних компонентів біологічних рідин. Дослідження аналітичних характеристик глутамат-чутливого біосенсора виявило, що його лінійний діапазон роботи становив від 5 до 600 мкМ субстрату, а чутливість – 150-200 нА/мМ при часі відгуку 5-20 с. Мінімальна границя визначення складала 2 мкМ глутамату.

Таким чином, розроблений біосенсор характеризувався гарними аналітичними характеристиками і є перспективним для вимірювання концентрації глутамату в реальних зразках сироватки крові.

Подяка

Робота була проведена завдяки фінансовій підтримці від НАН України в рамках цільової програми наукових досліджень НАН України ««Розумні» сенсорні прилади нового покоління на основі сучасних матеріалів та технологій».

Список використаної літератури

[1]. Han M, Kopeck W, Solov'yov Ia et al. Glutamate Water Gates in the Ion Binding Pocket of Na⁺ Bound Na⁺, K⁺-ATPase // *J. Sci. Rep*, 7 (2017).

[2]. Mark P Mattson. Glutamate and Neurotrophic Factors in Neuronal Plasticity and Disease // *Ann New York Acad Sci*, 1144(1), pp 97-112 (2009).

[3]. Lasse K Bak, Arne Shousboe, Helle S Waagepetersen. The glutamate/GABA- glutamine cycle: aspects of transport, neurotransmitter homeostasis and ammonia transfer // *J. Neurochem*, 98(3), pp 641-653 (2016).

[4]. Meldrum BS. Glutamate as a neurotransmitter in the brain: review of physiology and pathology // *J. Nutr*, 130, pp 1007-1015 (2000).

[5]. Batra B, Pundir C S. An amperometric glutamate biosensor based on immobilization of glutamate oxidase onto carboxylated multiwalled carbon nanotubes/gold nanoparticles/chitosan composite film modified Au electrode // *Biosens Bioelectron*, 47, pp 496-501 (2013).

[6]. A Aliprandi, M Longoni, L Stanzani et al. Increased plasma glutamate in stroke patients might be linked to altered platelet release and uptake // *J. Cerebr. Blood Flow Metabol*, 25, pp 513-519 (2005).

[7]. P R Beljaars, R. van Dijk, E. Bisschop, M. Spiegelenberg. Liquid chromatographic determination of free glutamic acid in soup, meat product, and Chinese food: interlaboratory study // *J. Assoc. Offic. Anal. Chem. Int*, 79, pp 697-702 (1996).

[8]. Christine A Farthing, Don E Farthing, Ronald E Gress et al. Determination of L-Glutamic Acid and γ -Aminobutyric Acid in Mouse Brain Tissue Utilizing GC-MS/MS // *J Chromatogr B Analyt Technol Biomed Life Sci*, 1068-1069, pp 64-70 (2017).

[9]. R W Kondrat, K Kanamori, B D Ross, In vivo microdialysis and gas chromatography/mass spectrometry for ¹³C-enrichment measurement of extracellular glutamate in rat brain // *J. Neurosci. Methods*, 120, pp 179-192 (2002).

[10]. Richard W Kondrat, Keiko Kanamori, Brian D Ross In vivo microdialysis and gas chromatography/mass spectrometry for ¹³C-enrichment measurement of extracellular glutamate in rat brain // *J Neurosci Methods*, 120 (2), pp 179-92 (2002).

[11]. Shin HJ, Park NH, Lee W et al. Metabolic profiling of tyrosine, tryptophan, and glutamate in human urine using gas chromatography-tandem mass spectrometry combined with single SPE cleanup // *J Chromatogr B Analyt Technol Biomed Life Sci*, 1051, pp 97-107 (2017).

[12]. W H Church, CS Lee, K M Dranchak, Capillary electrophoresis of glutamate and aspartate in rat brain dialysate. Improvements in detection and analysis time using cyclodextrins // *J. Chromatogr. B: Biomed. Sci. Appl.*, 700, pp 67-75 (1997).

[13]. Gündüz T, Gündüz N, Kiliç E et

al. Titrations in non-aqueous media. Part X. Potentiometric and conductimetric titrations of amino acids with tetrabutylammonium hydroxide in pyridine and acetonitrile solvents // *Analyst*, 113, pp 715–719 (1988).

[14]. Innocenti B, Parpura V, Haydon P G. Imaging Extracellular Waves of Glutamate during Calcium Signaling in Cultured Astrocytes // *J. Neurosci*, 20(5), pp 1800–1808 (200).

[15]. Carolina C Acebal, Adriana G Lista, Beatriz Fernandez-Band. Simultaneous determination of flavor enhancers in stock cube samples by using spectrophotometric data and multivariate calibration // *J Food Chem*, 106(2) pp 811-815 (2008).

[16]. Murachi T, Tabata M Use of a bioreactor consisting of sequentially aligned L-glutamate dehydrogenase and L-glutamate oxidase for the determination of ammonia by chemiluminescence // *Biotechnol Appl Biochem*, 9 (4), pp 303-309 (1987).

[17]. An L, Li S, Murdoch JB, Araneta MF et al. Detection of glutamate, glutamine, and glutathione by radiofrequency suppression and echo time optimization at 7 tesla // *Magn Reson Med*, 73 (2), pp 451-458 (2015).

[18]. Defaix C, Solgadi, A, Pham, T H et al. Rapid Analysis of Glutamate, Glutamine and GABA in Mice Frontal Cortex Microdialysis Samples Using HPLC Coupled to Electrospray Tandem Mass Spectrometry // *J. Pharm. Biomed. Anal*, 152, pp 31–38 (2018).

[19]. Fontana A C K. Protocols for Measuring Glutamate Uptake: Dose-Response and Kinetic Assays in In Vitro and Ex Vivo Systems // *Curr. Protoc. Pharmacol*, 82 (1), p 45 (2018).

[20]. Campos C D M, deCampos Braga P A, Reyes F G Ret al. F. Elimination of the Artefact Peaks in Capillary Electrophoresis Determination of Glutamate by Using Organic Solvents in Sample Preparation // *J. Sep. Sci*, 38(21), pp 3781–3787 (2015).

[21]. Hitoshi Kusakabe, Yuichiro Midorikawa et al. Methods for Determining L-Glutamate in Soy Sauce with L-Glutamate Oxidase. (1984).

[22]. Villarta RL, Cunningham DD, Guilbault GG Amperometric enzyme electrodes for the determination of l-glutamate // *Talanta*, 38(1), pp 49-55 (1991).

[23]. Hughes G, Pemberton RM, Fielen PR et al. Screen-Printed Amperometric Biosensor for the Determination of Glutamate in Food and Clinical Applications // *Methods Mol Biol*, 1572, pp 1-12 (2017).

[24]. Hughes G, Pemberton RM, Fielen PR et al. A novel reagentless glutamate microband biosensor for real-time cell toxicity monitoring // *Anal Chim Acta*, b933, pp 82-88 (2016).

[25]. Zhiming Liu, Tsutomu Horiuchi, Osamu Niwa et al. NADH and glutamate on-line sensors using Os-gel-HRP/GC electrodes modified with NADH oxidase and glutamate dehydrogenase. (1999).

[26]. Ling D, Wu G, Wang C et al. The preparation and characterization of an immobilized l-glutamic decarboxylase and its application for determination of l-glutamic acid // *Enzyme Microb Technol*, 27(7), pp 516-521 (2000).

[27]. Shi R, Stein K Flow. Injection Methods for Determination of L-Glutamate Using Glutamate Decarboxylase and Glutamate Dehydrogenase Reactors With Spectrophotometric Detection // *Analyst*, 9 (1996).

[28]. Yu H, Ma Z, Wu Z. Immobilization of Ni-Pd/core-shell nanoparticles through thermal polymerization of acrylamide on glassy carbon electrode for highly stable and sensitive glutamate detection // *Anal Chim Acta*, 896, pp 137-142 (2015).

[29]. Bernd AA, Dremel, Rolf D Schmid. Comparison of two fibre-optic L-glutamate biosensors based on the detection of oxygen or carbon dioxide, and their application in combination with flow-injection analysis to the determination of glutamate // *Anal Chim Acta*, 248(2), pp 351-359 (1991).

[30]. Iiiyas md isa, Sulaiman Ab Ghani A non-plasticized chitosan based solid state electrode for flow injection analysis of glutamate in food samples // *Food Chem*, 112(3), pp 756-759 (2009)

[31]. Brahwa Barta, Seema Kumari, Chandra Shekar Pundir. Construction of glutamate biosensor based on covalent immobilization of glutamate oxidase on polypyrrole nanoparticles/polyaniline modified gold electrode // *Enz Microb Tech*, 57, pp 69-77 (2014).

[32]. Kwong AWK, Grundig B, Hu J et al. Comparative study of hydrogel-immobilized L-

glutamate oxidases for a novel thick-film biosensor and its application in food samples // *Biotech Lett*, 22, pp 267-272 (2000).

Стаття надійшла до редакції 20.04.2020 р.

UDC 543.06:577.15:543.553

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2020.2.205823>

DEVELOPMENT AND OPTIMIZATION OF CONSTRUCTION OF AMPEROMETRIC BIOSENSOR BASED ON THE GLUTAMATE OXIDASE FOR DETECTION OF GLUTAMATE IN THE SERUM SAMPLES

D. O. Mruga^{1,2}, D. Yu. Kucherenko¹, T. O. Borisova³, S. V. Dzyadevych^{1,2}, O. O. Soldatkin^{1,2}

¹Institute of Molecular Biology and Genetics, NAS of Ukraine,
150 Zabolotnogo str., 03680, Kyiv, Ukraine

²Taras Shevchenko Kyiv National University,
64 Volodymyrska str., 01003, Kyiv, Ukraine

³Palladin Institute of Biochemistry, NAS of Ukraine,
9 Leontovicha str., 01601, Kyiv, Ukraine

Summary

Glutamate or glutamic acid is the most common amino acid in the body - it constitutes about a third of all circulating amino acids in the blood. Glutamate plays an important part in the biochemical pathways and physiological processes of humans and other animals. In addition to its role as a source of synthesis of essential amino acids and a building material for proteins, it also performs regulatory functions in the body.

High levels of glutamate in the blood and other body fluids indicate the presence of ischemic stroke, epilepsy or other neurological disorders, it serves as a marker of diabetic retinopathy and pancreatic cancer, and can be a means of diagnostics of early autism. That is why there is a need to develop new devices for monitoring the concentration of glutamate in serum.

Today a new biotechnological direction, the development of biosensors, is very actively developing. Accordingly, it is important to create a mobile, accurate, fast, selective biosensor for measuring the content of glutamate in biological samples.

The aim of this work was to develop the optimal design of an amperometric biosensor based on glutamate oxidase for determination of concentrations of glutamate in the serum and select the best conditions for its operation.

Research methods: The amperometric method of analysis was used in the work. Platinum disk electrodes were used as amperometric transducers. The working electrodes, the auxiliary platinum electrode and the Ag/AgCl reference electrode were connected to the PalmSens potentiostat according to the three-electrode amperometric measurement scheme. The 8-channel multiplex connected to the potentiostat and allowed to receive signals simultaneously from several working amperometric electrodes. Immobilization of glutamate oxidase on the sensitive surface of the amperometric transducer was performed using the method of covalent crosslinking of the enzyme with BSA in a solution of glutaraldehyde.

The results of the study: In the course of the work the optimal conditions of enzyme immobilization on the surface of the transducer were selected: the most stable and high biosensor responses were achieved by mixing 1 volume of glutamate oxidase solution (8%) and 4 volumes of glutaraldehyde solution (0.05-0.1%). and the duration of immobilization in air for 35 minutes.

When selecting the optimal operating conditions of the developed biosensor, the dependence of the magnitude of the biosensor responses on the temperature of the working buffer solution was obtained. It was also shown that the developed biosensor can work in biological samples containing protein components, although there is some decrease in the magnitude of the response (10-12% in the presence of 3% BSA in solution).

The selectivity of the proposed biosensor was analyzed. Both the selectivity of the amperometric transducer with respect to electroactive substances and the selectivity of the bioselective element with respect to the various components of biological fluids were tested.

A study of the analytical characteristics of the glutamate-sensitive biosensor revealed that its linear operating range was from 5 to 600 μM of substrate, and the sensitivity was 150-200 nA/mM at a response time of 5-20 s. The minimum limit of determination was 2 μM glutamate.

Conclusions: The design and optimization of the amperometric glutamate-sensitive biosensor based on immobilized glutamate oxidase were developed and optimized, its laboratory prototype was created, the operating conditions were adapted and the operating characteristics were investigated. It is shown that the developed biosensor based on glutamate oxidase was characterized by high analytical characteristics and is promising for measuring the concentration of glutamate in real serum samples.

Keywords: amperometric method, biosensor, immobilized enzyme, glutamate oxidase, glutamate concentration

УДК 543.06:577.15:543.553

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2020.2.205823>

РОЗРОБКА ТА ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ АМПЕРОМЕТРИЧНОГО БІОСЕНСОРА НА ОСНОВІ ГЛУТАМАТОКСИДАЗИ ДЛЯ АНАЛІЗУ ГЛУТАМАТУ В СИРОВАТЦІ КРОВІ

Д. О. Мруга^{1,2}, Д. Ю. Кучеренко¹, Т. О. Борисова³, С. В. Дзядевич^{1,2}, О. О. Солдаткін^{1,2}

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

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

³Інститут біохімії імені О. В. Палладіна НАН України,
вул. Леонтовича, 9, 01601, м. Київ, Україна

Реферат

Глутамат або глутамінова кислота є найбільш поширеною амінокислотою в організмі – вона складає близько третини всіх циркулюючих в крові амінокислот. Глутамат займає важливе місце в біохімічних шляхах та фізіологічних процесах людини та інших тварин. Крім ролі

джерела синтезу замінних амінокислот і будівельного матеріалу для білків, він також виконує регуляторні функції в організмі.

Високий рівень глутамату в крові та інших біологічних рідинах свідчить про наявність ішемічного інсульту, епілепсії чи інших неврологічних розладів, він є маркером діабетичної ретинопатії та раку підшлункової залози, а також може бути засобом діагностування раннього аутизму. Саме тому існує потреба в розробці нових пристроїв для моніторингу концентрації глутамату в плазмі крові.

На сьогодні дуже активно розвивається новий біотехнологічний напрямок – розробка біосенсорів. Відповідно є актуальним створення мобільного, точного, швидкого, селективного біосенсора для вимірювання вмісту глутамату в біологічних зразках

Мета даної роботи полягала в розробці оптимальної конструкції амперометричного біосенсора на основі глутаматоксидази для визначення концентрації глутамату в сироватці крові та підбір найкращих умов його експлуатації.

Методи дослідження: В роботі використовували амперометричний метод аналізу. Як амперометричні перетворювачі використовували платинові дискові електроди. Робочі електроди, допоміжний платиновий електрод та Ag/AgCl електрод порівняння за триелектродною схемою амперометричних вимірювань під'єднували до потенціостату PalmSens. 8-ми каналний мультиплексор під'єднувався до потенціостату та дозволяв отримувати сигнали одночасно з кількох робочих амперометричних електродів. Імобілізацію глутаматоксидази на чутливу поверхню амперометричного перетворювача проводили за допомогою методики ковалентного зшивання ферменту з БСА в розчині глутарового альдегіду.

Результати дослідження: В ході роботи було підібрано оптимальні умови імобілізації ферменту на поверхні перетворювача: найбільш стабільні та високі відгуки біосенсора досягалися при змішуванні 1 об'єму розчину ГлОД (8%) та 4 об'ємів розчину ГА (0,05-0.1%) та тривалості імобілізації на повітрі протягом 35 хвилин.

При підборі оптимальних умов експлуатації розробленого біосенсора було отримано залежність величини відгуків біосенсора від температури робочого буферного розчину. Також було показано, що розроблений біосенсор може працювати в біологічних зразках, що містять білкові компоненти, хоча і спостерігається деякий спад величини відгуку (10-12% при наявності 3% БСА в розчині).

Було проаналізовано селективність запропонованого біосенсора. Перевірено як селективність амперометричного перетворювача відносно електроактивних речовин, так і селективність біоселективного елемента відносно різних компонентів біологічних рідин.

Дослідження аналітичних характеристик глутамат-чутливого біосенсора виявило, що його лінійний діапазон роботи становив від 5 до 600 мкМ субстрату, а чутливість – 150-200 нА/мМ при часі відгуку 5-20 с. Мінімальна границя визначення складала 2 мкМ глутамату.

Висновки: В роботі розроблено та оптимізовано конструкцію амперометричного глутамат-чутливого біосенсора на основі імобілізованої ГлОД, створено його лабораторний прототип, адаптовано умови функціонування та досліджено його робочі характеристики. Показано, що розроблений біосенсор на основі ГлОД характеризувався високими аналітичними характеристиками і є перспективним для вимірювання концентрації глутамату в реальних зразках сироватки крові.

Ключові слова: амперометричний метод, біосенсор, імобілізований фермент, глутаматоксидаза, концентрація глутамату

OPTICAL AND OPTOELECTRONIC AND RADIATION SENSORS

ОПТИЧНІ, ОПТОЕЛЕКТРОННІ І РАДІАЦІЙНІ СЕНСОРИ

PACS 61.46.Hk, 68.65.Hb, 71.15.Mb, 78.55.Et; УДК 544.774, 546.48/22

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2020.2.202478>

ВЛАСНІ ДЕФЕКТИ В КВАНТОВИХ ТОЧКАХ CdZnS

I. М. Купчак¹, Д. В. Корбутяк¹, Н. Ф. Серпак²

¹Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, 41, пр. Науки, Київ, 03028, kupchak@isp.kiev.ua

²Вінницький національний медичний університет ім. М.І. Пирогова, 56, вул. Пирогова, Вінниця, Україна, 21018, snatusia@gmail.com

ВЛАСНІ ДЕФЕКТИ В КВАНТОВИХ ТОЧКАХ CdZnS

I. М. Купчак, Д. В. Корбутяк, Н. Ф. Серпак

Анотація. Дефекти у квантових точках можуть впливати на їх оптичні характеристики, створюючи додаткові канали випромінювальної та безвипромінювальної рекомбінації. Методом функціоналу густини проведено розрахунки структурних та електронних характеристик вакансій металу (кадмій, цинк) та міжвузлової сірки, як найбільш імовірних типів дефектів у нанокристалах $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$. Розраховано повну та парціальну густину електронних станів, проведено аналіз структурної релаксації. Виходячи з отриманих теоретичних результатів та наявних експериментальних даних зроблено висновок, що з усіх розглянутих типів дефектів лише вакансії кадмію можуть бути центрами випромінювальної рекомбінації у квантових точках $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$.

Ключові слова: квантові точки, дефекти, вакансія, CdZnS, метод функціоналу густини

NATIVE DEFECTS IN CdZnS QUANTUM DOTS

I. M. Kupchak, D. V. Korbutyak, N. F. Serpak

Abstract. Defects in quantum (QDs) not only can affect their optical properties, but also create additional channels of radiative and non-radiative recombination. We studied the structural and electronic characteristics of metal (cadmium, zinc) vacancies and interstitial sulfur as the most probable types of defects in $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ nanocrystals by means the density functional theory (DFT). The total

and partial density of electronic states were calculated, the analysis of structural relaxation was carried out. Based on the obtained theoretical results and available experimental data, we concluded that among the all types of defects considered here, only cadmium vacancies can be the centers of radiative recombination in $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ quantum dots.

Keywords: quantum dots, defects, vacancy, CdZnS, density functional method

СОБСТВЕННЫЕ ДЕФЕКТЫ В КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ CdZnS

И. М. Купчак, Д. В. Корбутяк, Н. Ф. Серпак

Аннотация. Дефекты в квантовых точках могут влиять на их оптические характеристики, создавая дополнительные каналы излучательной и безызлучательной рекомбинации. Методом функционала плотности проведены расчёты структурных и электронных характеристик вакансий металла (кадмий, цинк) и межузельной серы, как наиболее вероятных типов дефектов в нанокристаллах $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$. Рассчитано полную и парциальную плотность электронных состояний, проведён анализ структурной релаксации. Исходя из полученных теоретических результатов и имеющихся экспериментальных данных, сделан вывод, что из всех рассмотренных типов дефектов только вакансии кадмия могут быть центрами излучательной рекомбинации в квантовых точках $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$.

Ключевые слова: квантовые точки, дефекты, вакансия, CdZnS, метод функционала плотности

Вступ

Квантові точки (КТ) напівпровідників АІВІ в останні десятиліття є одними з найбільш досліджуваних об'єктів. Значна увага приділяється як розвитку технологій виготовлення, так і експериментальним і теоретичним дослідженням їх властивостей. Такий інтерес викликаний в першу чергу завдяки квантово-розмірному ефекту, внаслідок якого люмінесцентні характеристики КТ залежать не лише від компонентного складу, а і від їх розміру. Зокрема, КТ CdS, вирощені методами колоїдної хімії, мають одноmodalний розподіл, що дає досить вузьку смугу фотолюмінесценції та високий квантовий вихід [1]. Такі особливості КТ дозволяють використовувати їх як джерела світла зі стабільним випромінюванням вузького спектру, в світлодіодах, лазерах, датчиках, фотоелектричних пристроях, фотоелектричних перетворювачах, сонячних елементах, елементах пам'яті і т.д. [2-6]. При великих розмірах КТ форма спектральних смуг фотолюмінесценції визначається лише міжзонними чи екситонними переходами, добре вивченими і широко описаними в літературі [7-

9]. Однак при розмірах 2-5 нм і менше зростає співвідношення поверхня/об'єм, що призводить до збільшення інтенсивності поверхневої люмінесценції. Крім того, при малих розмірах стає важко контролювати стехіометричність КТ, що призводить до появи дефектів — вакансій, міжвузлових атомів та ін., що утворюють локальні енергетичні рівні у забороненій зоні на які захоплюються носії. Це створює додатковий канал як випромінювальної, так і безвипромінювальної рекомбінації, що суттєво "глушить" екситонну люмінесценцію. Навіть більше, дефекти впливають не лише на люмінесцентні характеристики, а й на інші властивості, наприклад, магнітні [10]. При великих розмірах КТ така дефектна люмінесценція створює конкуренцію екситонній, що суттєво впливає на оптичні характеристики нанокристалів в цілому і робить проблематичним їх застосування у світловипромінюючих приладах.

Дослідженню дефектної природи люмінесценції і встановленню типів дефектів, відповідальних за випромінювальну люмінесценцію, присвячено велика кількість робіт [11-13]. В багатьох роботах висувалось припущення, що дефектна люмінесценція в КТ CdS відбуваєть-

ся через центри $V_{Cd}-V_S$ [14,15], через акцепторні центри V_{Cd} [16-19]. Крім того, тип дефектів, відповідальних за люмінесценцію, залежить не лише від матеріалу КТ, а і від матеріалу її оточення [12], і для деяких матеріалів оточення актуальними стають також міжвузлові включення сірки S_I . Однак, незважаючи на велику кількість типів можливих дефектів як у самих КТ, так і в матеріалі їх оточення, більшість дослідників схилиються до думки, що дефектами, відповідальними за випромінювальну рекомбінацію у КТ CdS, є вакансії кадмію V_{Cd} і міжвузлова сірка S_I .

Враховуючи труднощі у технологіях з отриманням стехіометричних нанокристалів, останнім часом значну увагу дослідників привертають КТ на основі твердих сплавів напівпровідників $A_{1-x}B_xC$. У цьому випадку керувати оптичними характеристиками КТ можна не лише змінюючи їх розмір, а і шляхом зміни їх компонентного складу [20-22], контролювати який з технологічного боку значно простіше ніж для бінарних сполук. Введенням домішки цинку до КТ CdS, в залежності від концентрації можна отримати ширину забороненої зони у діапазоні від 2.42 до 3.91 еВ, що дозволяє розширити застосування такого матеріалу. Так, потрібні сполуки CdZnS широко використовуються як широкозонний матеріал для вікон гетероперехідних сонячних елементів і фотопровідних пристроїв. У системах сонячних батарей, заміна плівок CdS на потрібний матеріал з більшою шириною забороненої зони, яким є CdZnS, призводить до зменшення втрат вікон на поглинання світла, причому значно перспективнішим виглядає застосування при цьому саме КТ [23]. Крім того, при легуванні КТ CdS цинком збільшується густина електронних станів поблизу дна забороненої зони і вдосконалюється кристалічна структура [22,24], що збільшує інтенсивність їх люмінесценції. Природа люмінесценції у таких КТ тісно пов'язана з дефектною структурою окремих сполук CdS та ZnS, оскільки такі технології виготовлення КТ $Cd_{1-x}Zn_xS$ як метод хімічного співосадження передбачають отримання наноматеріалу у вигляді композиту $(CdS)_{1-x}(ZnS)_x$. Крім цього, експериментальні спектри ФЛ КТ $Cd_{1-x}Zn_xS$ містять смуги, форма і енергетичне

положення яких залежать від концентрації x , і зберігаються навіть при екстремальних значеннях $x=0$ та $x=1$ [22]. Виходячи з цього, в даній роботі ми досліджуємо електронну та атомну структуру НК CdS, ZnS та їхнього твердого розчину що містить вакансії металу V_{Cd} , V_{Zn} та міжвузлову домішку сірки S_I . Такі дефекти як вакансія сірки чи комплекси за їх участю є малоімовірними, оскільки описані технології виготовлення передбачають наявність надлишку сірки у розчині, і тому тут не розглядаються, хоча, в цілому, для інших матеріалів вони можуть мати місце.

Методика розрахунку

Розрахунки атомної структури КТ проводилися методом функціоналу густини (DFT) в наближенні узагальненого градієнта (GGA), реалізованого у програмному пакеті Quantum-Espresso [25]. Кластер $Cd_{33}S_{33}$ помістили у просту кубічну елементарну комірку зі сталою ґратки 25 Å, завдяки чому, при періодичному розміщенні таких елементарних комірок, відстань між сусідніми КТ становить близько 12 ангстрем. Цієї відстані цілком достатньо для того щоб вважати КТ ізольованими і не враховувати кулонівську взаємодію між ними. Крім того, враховано поправку Мартіні-Туркермана [26] в повну енергію, що дозволяє коректно описати далекодійну кулонівську взаємодію для таких ізольованих систем. Використовувалися ультра-м'які псевдопотенціали Пердю-Берка-Ернцгергофа [27] з врахуванням $4d^{10}5s^2$ валентних електронів для кадмію та $3s^23p^4$ для сірки. Інтегрування зони Бріллюена проводилося з використанням однієї Г-точки k-простору, та схеми Метфеселя-Пакстона [28] з параметром розмиття 0.05 еВ. При розкладі хвильової функції за плоскими хвилями використовувалося максимальне значення величини кінетичної енергії 400 еВ. Серія тестових розрахунків з іншими значеннями показала, що такої величини кінетичної енергії достатньо для отримання задовільної точності розрахунків, що гарантує аналогічну точність і для розрахунків всіх інших подібних систем.

Результати і обговорення

Для моделювання нанокристалу, що містить

дефекти, вибрано 66-атомний кластер $\text{Cd}_{33}\text{S}_{33}$, отриманий “вирізанням” сферичної області об’ємного матеріалу гексагонального CdS , із центром в середині елементарної комірки. Така система є стехіометричною і містить “магічне число” атомів, а тому володіє мінімумом обірваних зв’язків на поверхні. Для моделювання ZnS використовувався цей самий кластер, у якому кадмій замінено на цинк. У свою чергу, в якості твердого сплаву вибрано систему $\text{Cd}_{16}\text{Zn}_{17}\text{S}_{33}$, у якому сорт атома металу кластера $\text{Cd}_{33}\text{S}_{33}$ розподілявся випадковим чином. Така система зберігає умову мінімуму поверхневих зв’язків і має компонентний склад близький до $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}$. Всі системи геометрично оптимізувалися за всіма внутрішніми змінними до досягнення величини сил Гельмана — Фейнмана 10^{-3} а.о., після чого проводилися розрахунки енергетичного спектру. Оскільки геометрична оптимізація потребує значну кількість обчислювальних ресурсів, ми моделювали кожен дефект лише одним способом, за виключенням вакансії кадмію у кластері CdS , для якого розглядалися дві системи з різними видаленими атомами.

У правій частині рис. 1а показано початкову атомну структуру бездефектного кластера CdS , положення атомів в якому відповідають положенням у об’ємному кристалі. Жовтим кольором позначено атоми сірки, сірим — атоми кадмію. Зеленим кольором показано розподіл квадрату хвильової функції рівня НОМО. Видно, що хвильова функція розподілена по кластеру з певною симетрією, і локалізована на атомах сірки. Геометрична оптимізація призводить до суттєвих змін у положеннях атомів, однак, як видно з рис. 1b, певний близький порядок зберігається. При цьому у розрахованій повній густині електронних станів (DOS), показаній на лівій панелі рис. 1b, з’являється чітко виділена заборонена зона шириною 1.66 eV, яку позначено пунктирними лініями. Для зручності, ми вирівняли всі спектри за рівнем LUMO, а нульова енергія відповідає вершині валентної зони оптимізованого бездефектного кластера. У порівнянні, для початкового кластера заборонена зона практично відсутня: як видно з рис. 1a, вона містить велику кількість локалізованих станів. Крім того, у числах за-

повнення енергетичних рівнів присутні нецілі значення, що свідчить про “металізованість” поверхні кластера. Значна частина хвильової функції рівня НОМО зосереджена на частині поверхні кластера і, як і в початковому кластері, включає в основному стани сірки. Енергія зв’язку кластера при оптимізації збільшується від 2.42 eV/атом до 2.72 eV/атом. Таким чином, релаксація кластера призводить до спотворення його кристалічної структури, однак покращує електронні характеристики. Це відбувається через “самовідновлення” поверхні [29], при якій sp^3 гібридні зв’язки поверхневого атома металу трансформуються у sp^2 зв’язки з трьома найближчим атомами неметалу. У свою чергу, така реконструкція призводить до зсуву поверхневих станів у валентну зону, збільшуючи густину станів у її вершині.

Червоним кружечком позначено атом кадмію, який в подальшому видаляється для моделювання вакансії V_{Cd} . У лівій частині червоною лінією показано парціальну густину електронних станів (PDOS) лише тих трьох атомів сірки, що утворюють хімічні зв’язки з цим відміченим атомом кадмію. Як видно, у бездефектному кластері ці атоми сірки в околі майбутнього дефекту формують енергетичні рівні у глибині валентної зони. При видаленні атома кадмію без відповідної релаксації, хвильова функція НОМО змінює свою локалізацію і тепер включає стани найближчих до вакансії атомів сірки, як видно з відповідної PDOS на рис. 1c. Заборонена зона при цьому збільшується до 1.81 eV, однак такий стан є нестабільним, оскільки енергія зв’язку кластера зменшується на 50 меВ/атом. Після геометричної оптимізації, енергія зв’язку повертається до значень 2.73 eV/атом, що близьке до значення енергії зв’язку бездефектного кластера. Хвильова функція рівня НОМО при цьому залишається локалізованою на атомах сірки в околі вакансії, які і далі роблять значний внесок у формування цього стану, як видно з PDOS рис. 1d. Для іншого кластера, у якому вакансія кадмію утворена в іншому місці, результати принципово не відрізняються, однак дефектний рівень лежить дещо глибше у забороненій зоні, а відповідна хвильова функція локалізована на атомах сірки в околі вакансії.

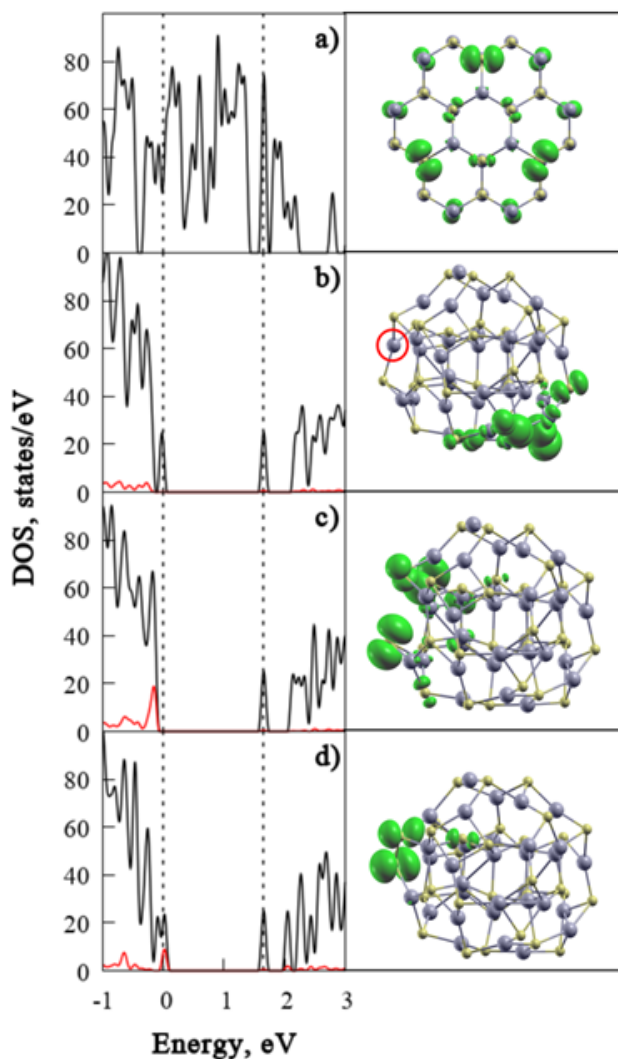


Рис.1. Атомна структура та густина електронних станів кластера CdS (позначення — див. текст)

Такі ж розрахунки ми провели і для решти типів дефектів. На рис. 2 (колонка 1) показано густина електронних станів (DOS) розраховану для кластерів CdS (рядок (a)), CdZnS (рядок (b)) і ZnS (рядок (c)). Чорні криві відповідають бездефектним структурам, червона — структура з вакансією кадмію, синя — з вакансією цинку. Пунктирні вертикальні лінії відділяють заборонену зону відповідних бездефектних систем. Всі криві вирівняні за рівнем LUMO (дном зони провідності) відповідних бездефектних систем. Видно, що у всіх випадках тут спостерігаються окремі смуги в області забороненої зони: для CdS ця смуга розташована поблизу стелі валентної зони в околі 0.11 eV,

яка для CdZnS зсувається ближче до валентної зони так що її положення стає 60 meV. У кластері ZnS також спостерігається додаткова смуга в області 0.82 eV, яка для CdZnS також зсувається ближче до валентної зони у положення 0.66 eV. Очевидно, для малих кластерів, якими є $Cd_{33}S_{33}$, різниця в один атом може суттєво перенормувати енергетичний спектр і, зокрема, змінити ширину забороненої зони. Тому, щоб в'ясувати чи можна вважати ці смуги пов'язаними з дефектними станами, ми розрахували парціальну густину станів (PDOS) лише тих атомів сірки що раніше утворювали зв'язки з видаленими атомами кадмію та цинку. Результат показаний у колонці 2 рисунку 2: тут нульова енергія відповідає рівню HOMO-1 (позначено чорною пунктирною лінією), червоні і сині пунктирні лінії показують рівень LUMO кластерів з вакансією кадмію і цинку, відповідно. Як видно з рисунків, PDOS для кластерів CdS і ZnS мають добре локалізовані у забороненій зоні смуги, що відповідають енергетичним положенням рівнів HOMO повної DOS показаним у колонці 1 рисунку 2. Теж саме стосується і PDOS CdZnS: для вакансії цинку рівень HOMO є добре локалізований у забороненій зоні і, очевидно, має дефектну природу, тоді як рівень HOMO-1 PDOS має значно меншу інтенсивність на відміну від повної DOS, де їхня інтенсивність приблизно однакова. PDOS кластера CdZnS з вакансією кадмію також демонструє окремий пік поблизу нульової енергії, положення максимум цього піку відповідає енергії 60 meV рівня HOMO повної DOS, тоді як рівень HOMO-1 PDOS має значно меншу інтенсивність у порівнянні з його інтенсивністю у повній DOS. Таким чином, рівень HOMO можна вважати дефектним у всіх кластерах з вакансією металу.

Важливо відмітити, що інтенсивність смуг PDOS, що відповідають рівню HOMO, мають меншу інтенсивність ніж відповідні рівні повної DOS. Це пов'язано з тим, що крім атомів сірки, що знаходяться в околі вакансії, інші поверхневі атоми сірки в тій чи іншій мірі також приймають участь у формуванні цих дефектних рівнів. Наприклад, у бездефектному CdS рівень HOMO формується 3p станами трьох поверхневих атомів сірки, що зв'язані у лан-

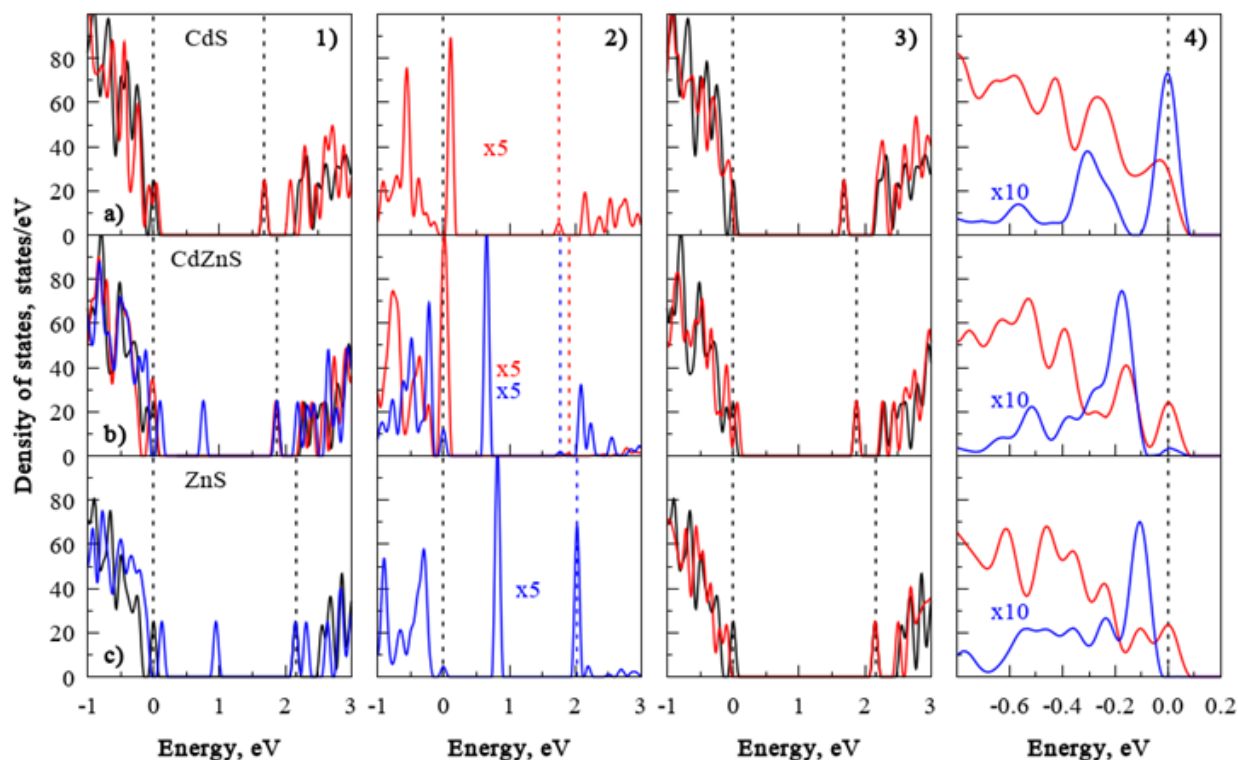


Рис.2. Повна (колонка 1 і 3) та парціальна (колонка 2 і 4) густина електронних станів кластерів CdS (a), CdZnS (b) та ZnS (c), що містять дефекти: вакансія металу (колонка 1 і 2) і міжвузлова сірка (колонка 3 і 4). Див. опис у тексті

цюжок S-Cd-S-Cd-S. При утворенні вакансії відбувається структурна релаксація, що призводить до перерозподілу густини електронного заряду. В результаті, зростає внесок у рівень НОМО станів атомів сірки, що знаходяться в околі вакансії, тоді як внесок інших атомів сірки зменшується. Подібні процеси спостерігаються також і у кластерах CdZnS та ZnS при утворенні вакансії металу.

При введенні домішкового атома сірки у міжвузля кластера, ситуація не така однозначна як з вакансіями. Розрахована повна густина станів кластерів CdS, CdZnS та ZnS з міжвузловою сіркою показана у колонці 3 рисунка 2. Аналогічно до рисунків у колонці 1, чорна крива позначає DOS бездефектних кластерів, червона — DOS відповідних кластерів з міжвузловою домішкою сірки. Всі спектри вирівняні за рівнем LUMO, а рівень НОМО бездефектного кластера встановлено як початок відліку енергії, пунктирні чорні лінії позначають заборонену зону бездефектних кластерів. Як видно, на відміну від DOS кластерів з вакансією, у забороненій зоні кластерів з міжвуз-

ловою сіркою відсутні будь-які локальні піки, а певні зміни спостерігаються в околі стелі валентної зони. У цілому, ширина забороненої зони тут змінюється, у першу чергу, за рахунок більшої кількості атомів. Щоб детально дослідити енергетичні рівні поблизу вершини валентної зони, ми розрахували PDOS лише станів міжвузлової сірки, показану у колонці 4 рисунка 2. Тут червона крива позначає повну DOS, а синя — PDOS кластерів з дефектом. Спектри вирівняно за рівнями НОМО, значення якого встановлено рівним нулю. Як видно, у кластері CdS при утворенні дефекту рівень НОМО значною мірою формується станами міжвузлової сірки, однак цей рівень не є локальним і його інтенсивність у близько 5 разів менша ніж інтенсивність відповідного піку повної DOS, а, отже, роль цього дефекту тут не є визначальною. У кластері CdZnS ці стани також присутні у рівні НОМО, однак їх внесок ще менший. І, зрештою, у кластері ZnS міжвузлова сірка утворює енергетичні рівні у глибині валентної зони.

Висновки

Ми провели розрахунки атомної та електронної структури квантових точок CdS, ZnS та $Cd_{1-x}Zn_xS$, що містять власні дефекти, шляхом моделювання відповідних кластерів. Зі всіх розглянутих типів дефектів, лише вакансія кадмію дає стани у забороненій зоні поблизу її дна і чітко проявляється в спектрах ФЛ КТ CdS у вигляді окремої смуги [19]. Вакансія цинку також дає стани у забороненій зоні, однак ці рівні є глибокими і переходи за їхньою участю дадуть смуги люмінесценції у довгохвильовій області, чого у відомих нам експериментальних роботах не зустрічалося. Міжвузлова сірка дає стани в околі дна забороненої зони, збільшуючи тим самим густину станів для кластера CdS. При додаванні цинку, ці стани зсовуються у глибину валентної зони, і не можуть приймати участь у рекомбінації носіїв. Таким чином, серед всіх розглянутих типів дефектів, лише вакансія кадмію є кандидатом у центри випромінювальної рекомбінації. Так як для двох різних моделей вакансії кадмію, що досліджувалися у роботі, отримано дещо різні значення енергій дефектних рівнів, то у спектрах фотолюмінесценції ансамблю квантових точок, що характеризуються певною дисперсією розмірів, будуть спостерігатися розмиті смуги, котрі будуть включати свічення як дефектних рівнів, так і екситонне випромінювання від бездефектних кристалів відповідних розмірів. З іншого боку, оскільки міжвузлова сірка збільшує густину станів у вершині валентної зони, стабілізація КТ сірковмісними сполуками, такими як тіол-гліколева кислота (TGA), приведе до збільшення інтенсивності міжзонної (екситонної) рекомбінації не лише за рахунок пасивації поверхні і, як наслідок, зменшення конкурентної поверхневої (дефектної) люмінесценції, а також за рахунок можливих утворень дефектів S_i .

Список використаної літератури

- [1]. D. V. Korbutyak, O. V. Kovalenko, S. I. Budzulyak, S. M. Kalytchuk, I. M Kupchak. Light-emitting properties of A2B6 semiconductor quantum dots // *Ukr. J. Phys. Rev.*, 7, pp. 48-95 (2012).
- [2]. С. В. Сорокин, С. В. Гронин, И. В. Седова, et al. . Молекулярно-пучковая эпитаксия гетероструктур широкозонных соединений A2B6 для низкопороговых лазеров с оптической и электронной накачкой // *ФТП.*, 49(3), ст. 342-34 (2015).
- [3]. A. Mukherjee, B. Satpati, S. R. Bhattacharyya, R. Ghosh, P. Mitra. Synthesis of nanocrystalline CdS thin film by SILAR and their characterization. // *Phys. E.*, 65, pp. 51-55 (2015).
- [4]. S. Wang, W. Dong, X. Fang, et al. CdS and CdSe quantum dot co-sensitized nanocrystalline TiO2 electrode: Quantum dot distribution, thickness optimization, and the enhanced photovoltaic performance. // *J. Power. Sources.*, 273, pp. 645-653 (2015).
- [5]. M. Tomakin, M. Altunbaş, E. Bacaksiz, S. Çelik. Current transport mechanism in CdS thin films prepared by vacuum evaporation method at substrate temperatures below room temperature. // *Thin Solid Films*, 520(7), pp. 2532-2536 (2012).
- [6]. Y. Li, S. Q. Yuan, X. J. Li. White light emission from CdS/Si nanoheterostructure array. // *Mater. Lett.*, 136, pp. 67-70 (2014).
- [7]. T. Inoshita, H. Sakaki. Electron-phonon interaction and the so-called phonon bottleneck effect in semiconductor quantum dots // *Phys. B.*, 227(1-4), pp. 373-377 (1996).
- [8]. U. Bockelmann, T. Egeler. Electron relaxation in quantum dots by means of Auger processes // *Phys. Rev. B.*, 46(23), pp. 15574-15577 (1992).
- [9]. A. V. Fedorov, A. V. Baranov, I. D. Rukhlenko, T. S. Perova, K. Berwick. Quantum dot energy relaxation mediated by plasmon emission in doped covalent semiconductor heterostructures // *Phys. Rev. B.*, 76(4), pp. 045332 (2007).
- [10]. M. P. Lima, L. Cabral, E. Margapoti, et al. Defect-induced magnetism in II-VI quantum dots // *Phys. Rev. B.*, 99(1), pp. 014424 (2019).
- [11]. V. A. Smyntyna, V. M. Skobeeva, K. A. Verheles, N. V. Malushin. Influence of technology on the formation of luminescence centers in CdS quantum dots // *Journal of Nano- and Electronic Physics.*, 11(3), pp. 05031 (2019).
- [12]. S. V. Rempel, Y. V. Kuznetsova, I. D. Popov, A. A. Rempel. Impact of the matrix on optical properties of nanocomposites with CdS

- QDs // *J. Alloys. Compd.*, 823, pp. 153811 (2020).
- [13]. T. Lee, K. Shimura, D. Kim. Surface modification effects on defect-related photoluminescence in colloidal CdS quantum dots // *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 20(17), pp. 11954-11958 (2018).
- [14]. V. M. Skobeeva, V. A. Smyntyna, O. I. Sviridova, D. A. Struc, A. V. Tyurin. Opticheskie svojstva nanokristallov sul'fida kadmiya, poluchennyh zol'-gel' metodom v zhelatine // *Zhurnal prikladnoj spektroskopii*. b 75(4), pp. 556-562 (2008).
- [15]. V. Smyntyna, B. Semenenko, V. Skobjeva, M. Malushyn. Vplyv poverkhni nanokystaliv CdS na jikhni ljuminescentni vlastyivosti // *Elektronika ta informacijni tekhnologhiji*; 2, pp. 45-50 (2012).
- [16]. P. Mandal, S. S. Talwar, S. S. Major, R. S. Srinivasa. Orange-red luminescence from Cu doped CdS nanophosphor prepared using mixed Langmuir–Blodgett multilayers // *J. Chem. Phys.*, 128(11), pp. 114703 (2008).
- [17]. H. Lee, H. Yang, P. H. Holloway. Functionalized CdS nanospheres and nanorods // *Phys B.*, 404(22), pp. 4364-4369 (2009).
- [18]. S. Q. Yuan, P. F. Ji, Y. Li, Y. L. Song, F. Q. Zhou. Unusual blueshifting of optical band gap of CdS nanocrystals through a chemical bath deposition method // *Adv. Optoelectron.*, 2015, pp. 1-5 (2015).
- [19]. I. M. Kupchak, N. F. Serpak, O. A. Kapush, D. V. Korbutjak. Elektronni kharakterystyky poverkhnevyykh vakansij u nanokystalakh CdS // *Fizyka i khimija tverdogho tila.*, 19(1), pp. 34-39 (2018).
- [20]. L. Kumari, A. K. Kar. Compositional variation dependent colour tuning and observation of Förster resonant energy transfer in Cd_{1-x}Zn_xS nanomaterials // *New J. Chem.*, 44(3), pp. 870-883 (2020).
- [21]. A. G. Milekhin, N. A. Yeryukov, L. L. Sveshnikova, et al. CdZnS quantum dots formed by the Langmuir-Blodgett technique // *J. Vac. Sci. Technol. B*, 31(4), pp. 04D109 (2013).
- [22]. D. V. Korbutyak, V. P. Kladko, N. V. Safiryuk, et al. Synthesis, Luminescent and structural properties of the Cd_{1-x}Cu_xS and Cd_{1-x}Zn_xS nanocrystals // *J. Nano- Electron. Phys.*, 9(5), pp. 05024 (2017)
- [23]. K. Wu, H. Li, V. I. Klimov. Tandem luminescent solar concentrators based on engineered quantum dots // *Nat Photonics.*, 12(2), pp. 105-110 (2018).
- [24]. S. Muruganandam, G. Anbalagan, G. Murugadoss. Synthesis and structural, optical and thermal properties of CdS:Zn²⁺ nanoparticles // *Appl Nanosci.* 4(8), pp. 1013-1019 (2014).
- [25]. P. Giannozzi, S. Baroni, N. Bonini, et al. QUANTUM ESPRESSO: a modular and open-source software project for quantum simulations of materials // *J. Phys. Condens. Matter.*, 21(39), pp. 395502 (2009).
- [26]. G. L. Martyna, M. E. Tuckerman. A reciprocal space based method for treating long range interactions in ab initio and force-field-based calculations in clusters // *J. Chem. Phys.*, 110(6), pp. :2810 (1999).
- [27]. J. P. Perdew, K. Burke, M. Ernzerhof. Generalized Gradient Approximation Made Simple // *Phys Rev Lett.*, 77(18), pp. 3865-3868 (1996).
- [28]. M. Methfessel, A. T. Paxton. High-precision sampling for Brillouin-zone integration in metals // *Phys Rev B.*, 40(6), pp. 3616-3621 (1989).
- [29]. A. Puzder, A. J. Williamson, F. Gygi, G. Galli. Self-healing of CdSe nanocrystals: First-principles calculations // *Phys Rev Lett.*, 92(21), pp. 1-4 (2004).

Стаття надійшла до редакції 12.05.2020 р.

NATIVE DEFECTS IN CdZnS QUANTUM DOTS

I. M. Kupchak¹, D. V. Korbutyak¹, N. F. Serpak²

¹ V. Lashkarev Institute of Semiconductor Physics, NAS Ukraine, 45, Prospect Nauky, Kyiv 03680, Ukraine kupchak@isp.kiev.ua

² Vinnytsia National Pirogov Medical University, Pyrohova St, 56, Vinnytsia, 21018, Ukraine, snatusia@gmail.com

Summary

Defects in quantum dots not only affect their electron and optical characteristics, but also create additional channels of radiative and nonradiative recombination. Depending on the manufacturing technology, they can be of a different nature and formed both in the nanocrystal and in the material of its surrounding, what makes their study a non-trivial task. The goal of this work is to establish the type of intrinsic defects responsible for radiative recombination in CdS, ZnS and Cd_{1-x}Zn_xS quantum dots.

The calculations were performed using the density functional theory in the generalized gradient approximation. As a quantum dot model we used the atomic “magic” clusters Cd₃₃S₃₃, Zn₃₃S₃₃ and Cd₁₆Zn₁₇S₃₃, where the sort of metal atom was distributed randomly. We modeled a metal vacancy (V_{Cd}, V_{Zn}) by removing one atom of the corresponding sort from the cluster surface, and interstitial sulfur S_i, inserting an additional sulfur atom between the nearest metal atoms. All systems were geometrically optimized, after that the total and partial densities of electronic states were calculated and the atomic structure was analyzed.

All the systems showed significant structural relaxation during the geometric optimization. The calculated density of electronic states of clusters with a cadmium vacancy contains a localized band near the top of the valence band, while that with a zinc vacancy such a band is in the depth of the gap. The calculated partial density of electronic states shows that these bands are formed by the states of sulfur atoms in the vicinity of the metal vacancy. The densities of states of the clusters with the interstitial sulfur do not contain local bands in the gap. Based on the obtained theoretical results and available experimental data, we concluded that among the all the considered types of defects, only cadmium vacancies can be centers of radiative recombination at Cd_{1-x}Zn_xS quantum dots.

Keywords: quantum dots, defects, vacancy, CdZnS, density functional method

PACS 61.46.Hk, 68.65.Hb, 71.15.Mb, 78.55.Et; UDC 544.774, 546.48/22

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2020.2.202478>

ВЛАСНІ ДЕФЕКТИ В КВАНТОВИХ ТОЧКАХ CdZnS

І. М. Купчак¹, Д. В. Корбутяк¹, Н. Ф. Серпак²

¹Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, 41, пр. Науки, Київ, 03028, kupchak@isp.kiev.ua

²Вінницький національний медичний університет ім. М.І. Пирогова, 56, вул. Пирогова, Вінниця, Україна, 21018, snatusia@gmail.com

Реферат

Дефекти у квантових точках можуть впливати на їх електронні та оптичні характеристики, створюючи додаткові канали випромінювальної та безвипромінювальної рекомбінації. В залежності від технології виготовлення, вони можуть мати різну природу і утворюватися як у самому нанокристалі, так і в матеріалі його оточення, що робить їх дослідження нетривіальною задачею. Метою даної роботи є встановлення типу власних дефектів, відповідальних за випромінювальну рекомбінацію у квантових точках CdS, ZnS та $Cd_{1-x}Zn_xS$.

Розрахунки проведено методом функціоналу густини в наближенні узагальненого градієнта. У якості моделі квантової точки використовувався “магічний” кластер $Cd_{33}S_{33}$, $Zn_{33}S_{33}$ та $Cd_{16}Zn_{17}S_{33}$, у якому сорт атома металу розподілявся випадковим чином. Ми моделювали вакансію металу (V_{Cd} , V_{Zn}) видаляючи один поверхневий атом відповідного сорту, та міжвузлову сірку S_p , розміщуючи додатковий атом сірки між найближчими атомами металу. Всі системи були геометрично оптимізовані, після чого було розраховано повну і парціальну густину електронних станів та проведено аналіз атомної структури.

Всі системи показали значну структурну релаксацію під час геометричної оптимізації. Розрахована густина електронних станів кластерів з вакансією кадмію містить локалізовану смугу поблизу вершини валентної зони, тоді як з вакансією цинку — у глибині забороненої зони. Розрахована парціальна густина електронних станів показує, що ці смуги формуються станами атомів сірки в околі вакансії металу. Густина станів кластерів з міжвузловою сіркою не містять локальних смуг в забороненій зоні. Виходячи з отриманих теоретичних результатів та наявних експериментальних даних в роботі зроблено висновок, що з усіх розглянутих типів дефектів лише вакансії кадмію можуть бути центрами випромінювальної рекомбінації у квантових точках $Cd_{1-x}Zn_xS$.

Ключові слова: квантові точки, дефекти, вакансія, CdZnS, метод функціоналу густини

СЕНСОРИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ

SENSORS AND INFORMATION SYSTEMS

UDC 621.317

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2020.2.205825>

IMPROVEMENT GENERATING OF THE TEST SIGNALS FOR DETERMINATION OF THE IMPEDANCE PARAMETERS IN WIDE FREQUENCY RANGE

V. G. Melnyk¹, P. I. Borschov¹, V. K. Beliaev², O. D. Vasylenko¹, O. L. Lameko¹, O. V. Slitskiy¹

¹Institute of electrodynamic National Academy of Sciences of Ukraine, 56 Pr. Peremohy, 03057, Kyiv – 57. E-mail: melnik@ied.org.ua

²National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Heroyiv Oborony st., 15, Kyiv, 03041, Ukraine

IMPROVEMENT GENERATING OF THE TEST SIGNALS FOR DETERMINATION OF THE IMPEDANCE PARAMETERS IN WIDE FREQUENCY RANGE

V. G. Melnyk, P. I. Borschov, V. K. Beliaev, O. D. Vasylenko, O. L. Lameko, O. V. Slitskiy

Abstract. A brief analysis of modern methods for measuring impedance parameters and error sources that limit their accuracy in a wide range of frequencies is given. An effective way is substantiated to solve the main problem - a significant increase in the errors of the separation of the information signal into quadrature components with increasing frequency. The schemes of construction of the broadband single-phase and multi-phase digital generators of test and reference signals using Johnson's ring counter, which have very small phase errors, as well as the control scheme of the phase ratio of the testing and reference signals are detail considered in the article. The considered structures and principles of operation of the impedance meters with the use of impedance - voltage transformation, of the bridge method with balancing by module and phase of the imbalance signal and their combinations have been developed on their basis.

Keywords: impedance, measurement, phase error, test signal, reference signal

УДОСКОНАЛЕННЯ ГЕНЕРУВАННЯ ТЕСТОВИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ІМПЕДАНСУ В ШИРОКОМУ ДІАПАЗОНІ ЧАСТОТ

В. Г. Мельник, П. І. Борщов, В. К. Беляєв, О. Д. Василенко, О. Л. Ламеко, О. В. Сліцький

Анотація. Дано короткий аналіз сучасних методів вимірювання параметрів імпедансу та джерел похибок, що обмежують їх точність в широкому діапазоні частот. Обґрунтовано ефективний шлях вирішення основної проблеми – значного збільшення похибок розділення інформативного сигналу на квадратурні складові при підвищенні частоти. Детально розглянуті схеми побудови широкосмугових однофазних та багатофазних цифрових генераторів тестових і опорних сигналів з використанням кільцевих лічильників Джонсона, які мають дуже малі фазові похибки, а також схема керування співвідношенням фаз тестових та опорних сигналів. Розглянуто розроблені на їх основі структури і принципи дії вимірювачів імпедансу з застосуванням перетворення імпеданс – напруга, мостового методу з балансуванням за модулем і фазою сигналу нерівноваги та їх комбінації.

Ключові слова: імпеданс, вимірювання, фазова похибка, тестовий сигнал, опорний сигнал

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ТЕСТОВЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИМПЕДАНСА В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

В. Г. Мельник, П. И. Борщев, В. К. Беляев, А. Д. Василенко, А. Л. Ламеко, А. В. Слицкий

Аннотация. Дан краткий анализ современных методов измерения параметров импеданса и источников погрешностей, которые ограничивают их точность в широком диапазоне частот. Обоснован эффективный способ решения основной проблемы - значительного увеличения погрешностей разделения информационного сигнала на квадратурные составляющие с увеличением частоты. В статье подробно рассмотрены схемы построения широкополосных однофазных и многофазных цифровых генераторов тестовых и контрольных сигналов с использованием кольцевого счетчика Джонсона, которые имеют очень малые фазовые ошибки, а также схема управления соотношением фаз испытательных и эталонных сигналов. Рассмотрены разработанные на их основе структуры и принципы работы измерителей импеданса с использованием преобразования импеданс-напряжение, а также мостового метода с балансировкой по модулю и фазе сигнала дисбаланса и их комбинаций.

Ключевые слова: импеданс, измерение, фазовая ошибка, тестовый сигнал, опорный сигнал

Introduction

To measure passive electrical quantities, in particular the parameters of electrical circuit components, informative parameters of sensitive elements of many types of sensors, characteristics of various substances, materials and biological objects, it is necessary to generate test signals that affect the object of measurement and causes a response (measurement signal) on the output of the measuring circuit, which includes the object of

study. The most informative and accurate results are obtained when using sinusoidal test signals in a wide range of frequencies: from infrared (small fractions of Hz) to the radio frequency range (tens and hundreds of MHz).

For practical purposes, the most relevant is the measurement in the sound and ultrasonic frequency ranges (up to 1MHz). There are several well-established ways to solve such problems based on methods of direct transformations of the measuring signal, the use of bridge measuring circuits

with balancing, as well as combined methods that combine the best qualities of the first and second ways [1 - 9]. Based on them, it has been created and now manufactures a variety of equipment for measuring impedance parameters: active and reactive resistance or conductivity, modulus and phase angle or phase angle tangent, capacitance, inductance, etc. Such instruments are intended for measuring in a wide range of parameters values and frequency, in different modes and for different equivalent circuits of the measurement object. Among them are known the instruments of Wayne Kerr Electronics, Agilent, GW Instek and of others. From the modern domestic developments should be noted precision RLC-meters MHC-1100 and MHC-1200 [6, 7, 10].

Unfortunately, for many new tasks, existing devices are either metrologically imperfect or very complex and expensive. They are often unsuitable for the using in the sensor systems, for the purposes of an object state diagnostics and process monitoring, especially at high frequencies.

The aim of the work is to expand the possibilities for optimization of technical and economic characteristics of the means of determining the impedance parameters in a wide range of frequencies, taking into account the intended purpose of the equipment.

Status of the question and existing problems

Means for measuring of the parameters of complex resistances - impedances Z or admittances Y , common name - immitances, belong to active measuring systems in which the object of measurement is subjected to a calibrated test effect. The object generates a response signal to this effect (informative current or voltage), proportional to it modulo and has changed by phase. Two its informative components are corresponding to the measuring parameters: active Re and reactive Im , or modulus and phase angle. These components are calibrated by modulo using scale transducers and reference measures (bridge methods [2 - 4]) or a phase-sensitive voltmeter (methods of direct impedance conversion are considered, in particular in [8]). All these operations are performed by the measuring channels. In the general case, it is a closed loop or a sequence of blocks consisting of functional converters (analog, digital, combined).

Their functionality, metrological parameters, mass and size indicators, energy consumption, cost, as well as the method of measurement used, ultimately determine the technical and economic characteristics of a particular type of equipment. The channel includes a test signal generator, a measuring circuit with a measuring object, a device for excretion and converting an informative signal, units for generating reference signals and for analog-digital conversion, devices for comparing signals and digital data processing and also the unit of measurement process control.

When using bridge methods, the separation errors in determining the components of the measured impedance are determined by the phase errors in the bridge branches which associated with the quadrature parasitic parameters of the reference measures, scale converters and connecting circuits. Calibration errors are determined by deviations of the actual values of the main parameter of the reference measures and other blocks from the nominal values, and also by relative value of their non-informative quadrature parameters, which in a wide range of frequencies can reach of large values.

In devices with direct immitance conversion, the information signal is divided into two components by quadrature synchronous detectors. The accuracy of this operation depends on the error of the phase relationships between the test signal and the reference signals of the detectors, as well as on the phase errors of the measuring circuit and the of device its output signal conversion. It is quite difficult to achieve a small level of these errors or to correct them by structural and algorithmic methods in a wide range of frequencies. The existing ways to reduce them significantly complicate the equipment and measurement algorithm. The operation of calibration modulo of the obtained impedance components is performed using an ADC with highly stable source of reference DC voltage and usually does not cause difficulties.

There are specialized chips currently on the market, which combine all the above blocks of the impedance-metric channel [11]. The separation of the quadrature components of the measuring signal is performed in them by means of the Fourier transform. On their basis, quite simple devices for various purposes can be created [12, 13], but their

metrological capabilities are very limited.

Reducing of the phase errors in the measuring channel with ensuring acceptable technical and economic characteristics of the devices is the main task under expanding the range of operating frequencies of the impedance parameters meters and increasing their accuracy. This task is especially relevant for the development of new technologies in technical and biomedical fields. A promising way to solve it is to improve the methods of generating test and reference signals and optimize on this basis the methods of determining the parameters of impedance. The ideas of the necessary technical solutions were proposed several decades ago [14 - 17], but were not then implemented in practice due to insufficient development of the element base. In [14 - 16], the structures of AC bridges with signal frequency conversion in the bridge circuit were proposed. In these devices, the sinusoidal voltage generator of the bridge is replaced by a highly stable source of constant reference voltage, to which the branches of the bridge are connected: the object of measurement and reference measures. At the inputs of these branches are installed digital-to-analog converters (dividers) of DC voltage, and after them - digital-to-analog converters, which multiply the DC voltage by the codes of the values of the function $\sin 2\pi f_t t$; where f_t is the frequency of the test signal. These codes obtain using a clock counter with a decoder. Formed quasi-sinusoidal (stepped) voltages are applied to the measurement object and to the reference measures of resistance or capacitance. Their spectrum does not contain harmonics with frequencies below $(4n \pm 1) f_t$, where n is the number of steps in the $1/4$ period of the quasi-sinusoid, when taking into account certain requirements for the selection and formation of the steps in approximating function [18, 19]. The values of n and f_t determine the required frequency f_c of the counter clocking: $f_c = 4nf_t$. Depending on the nature of the object of measurement and the problem to be solved, the value of n can vary from 1 to several tens.

In these works, it was proposed to use a ring Johnson's counter to generate the controlling code for digital-to-analog convertor (DAC). DAC of the generator is based on the principle of sequential addition and subtraction of n currents. Each

of them is proportional to the height of one of the steps of the quasi-sinusoid. The currents are formed with use of precise resistors from the reference voltage. This allows you to significantly reduce the transients on the fronts of the steps, and thus expand the frequency range. Another advantage of this solution is the ability to obtain reference voltages for quadrature synchronous detectors directly from the logic signals of the ring counter, forming the test voltages. This allows achieving the minimum possible phase differences between these voltages. The structure and circuitry of the generator will be discussed in more detail below.

Structure and circuit solutions for construction of the broadband digital generators of test and reference signals

The general structure of the generator of test and reference signals, the simplified schemes of the ring counter with the decoder and of the digital-to-analog converter of the generator (COUNTER, DECODER, DAC accordingly) are presented on Fig. 1 a, b, c. Under the action of clocking pulses T_1 , at the outputs of the triggers of the counter (Q) are created voltages of the form "meander" with a frequency f_c , shifted by one clock. Fig. 1 d shows a timing diagram of obtaining from these voltages, using logic circuits overlap of their low levels, the logic signals $D_1 \dots D_{n/2}$ to control the keys of the driver DAC of quasi-sinusoidal voltage U_T , as well of the reference voltages for synchronous detector U_{IF} and U_{QF} , which are respectively in-phase and quadrature to U_T .

The peculiarity of this structure is that each of the steps is formed by a separate resistor of the DAC. The conductivities of these resistors are chosen in proportion to the heights of the respective steps, from which consist the each of $1/4$ periods U_T . Firstly, these resistors are been alternately connecting by high-speed switches to a positive reference voltage U_{ref} and then in the reverse order are turned off. Thus a positive half-wave of a quasi-sinusoid is formed. A negative half-wave is formed similarly at a negative reference voltage $-U_{ref}$. The currents of the resistors are summed at the input of the operational amplifier, forming a quasi-sinusoidal voltage at its output. It is important that this method of its formation provides

minimal switching interference and that the time of operation of the keys relative to TI is identical. Therefore, the undistorted shape of the output signal is maintained up to the maximum operating frequencies of the used element base (approximately 50 MHz). The total U_T delay relative to U_{IF} and U_{QF} is approximately 30 nsec. due to the operation time of the keys under the action of signals $D_1 \dots D_{n/2}$ and the inertia of the operational amplifier of the DAC. It is partially compensated by the same delay of operation under the action of U_{IF} and U_{QF} of similar keys of the synchronous detector.

Another part of the delay can be compensated by the correction of the operational amplifier. This is the base of possibility obtaining very small both amplitude and phase errors of the through

characteristic of the transformation of the measuring channel as a whole in a very wide range of frequencies.

Development of principles of construction of digital generators of test signals and impedance channels on their basis

Functional digital generators with integral multiplying DACs are currently widely used for various purposes, including and in impedance measuring equipment [6, 7, 20 - 22]. The other approach to their realization described above has an important advantage: it allows, in addition to the test quasi-sinusoidal signal, to obtain more accurate reference signals for synchronous detectors - rectangular (meander) or quasi-sinusoidal in the form of control voltages (of codes). This provides the possibility of obtaining in-phase and quadra-

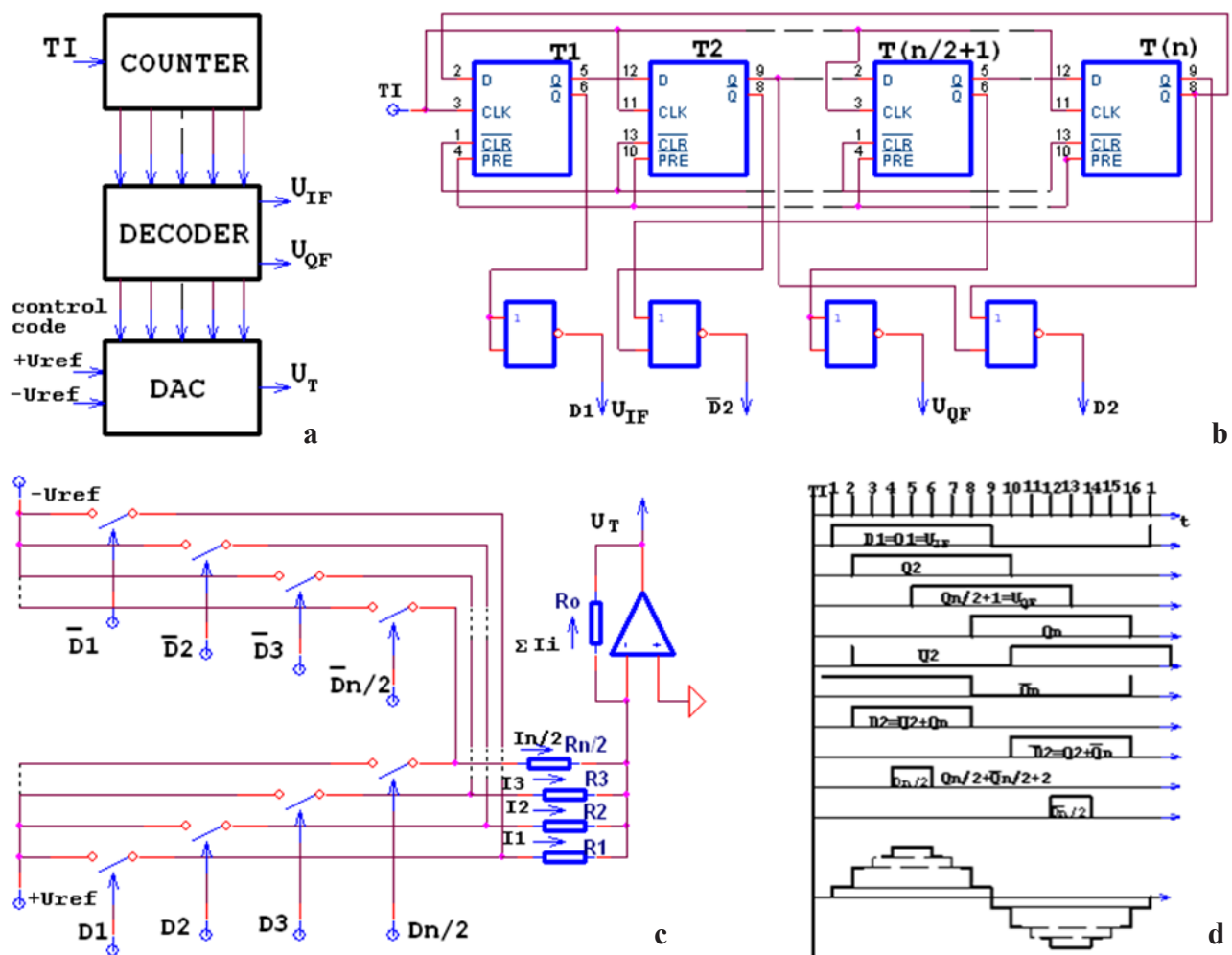


Figure 1. General structure of the generator of test and reference signals (Fig. 1a), simplified scheme of the ring counter with a decoder (Fig. 1b), digital-to-analog converter of the generator (Fig. 1c), diagram of formation the control signals for DAC's keys and reference voltages of a synchronous detector

ture signals, or one having a different phase, with high discreteness in time and with a very stable in time binding to the test signal.

The presence of such voltages allows us to successfully solve the problem of accurately dividing the measuring signal into informative quadrature components in a wide frequency range, with reaching the simplicity of the measuring channel and the high measurement speed.

Another advantage of this approach to the construction of the quasi-sinusoidal voltage generator is the ability to combine several such devices to obtain two (or more) signals with a calibrated phase difference and the ability of precisely discrete control that difference. On the basis of such multiphase generators can be implemented bridge impedance meters with balancing of the bridge circuit by adjusting the phase and voltage amplitude in the branches of the bridge, which has only one reference measure [14, 15, 20, 23].

The peculiarity of this solution is that the phase balancing is performed in digital form by a discrete change of the delay between the cycles of

clocking of the counters of digital generators. This is realized by means of additional counters with adjustable initial installation, which form time shifts of clocking and synchronizing pulses of these generators [23]. The installation errors of the phase difference of the output signals of the multiphase generator are determined by the difference of the parasitic delays of the digital signals in identical channels of their formation and do not exceed a few nanoseconds. The time offset errors of the test signal relative to the reference signals may be significantly greater due to delays in the digital-to-analog converter, but they are stable and can be compensated.

The use of a multiphase test signal generator can significantly improve the metrological characteristics of both bridge measuring devices and channels with direct conversion through the use of the previously proposed phase adjustment of the reference voltage of the synchronous detector [17]. Consider the scheme of such a channel, shown in Fig. 2.

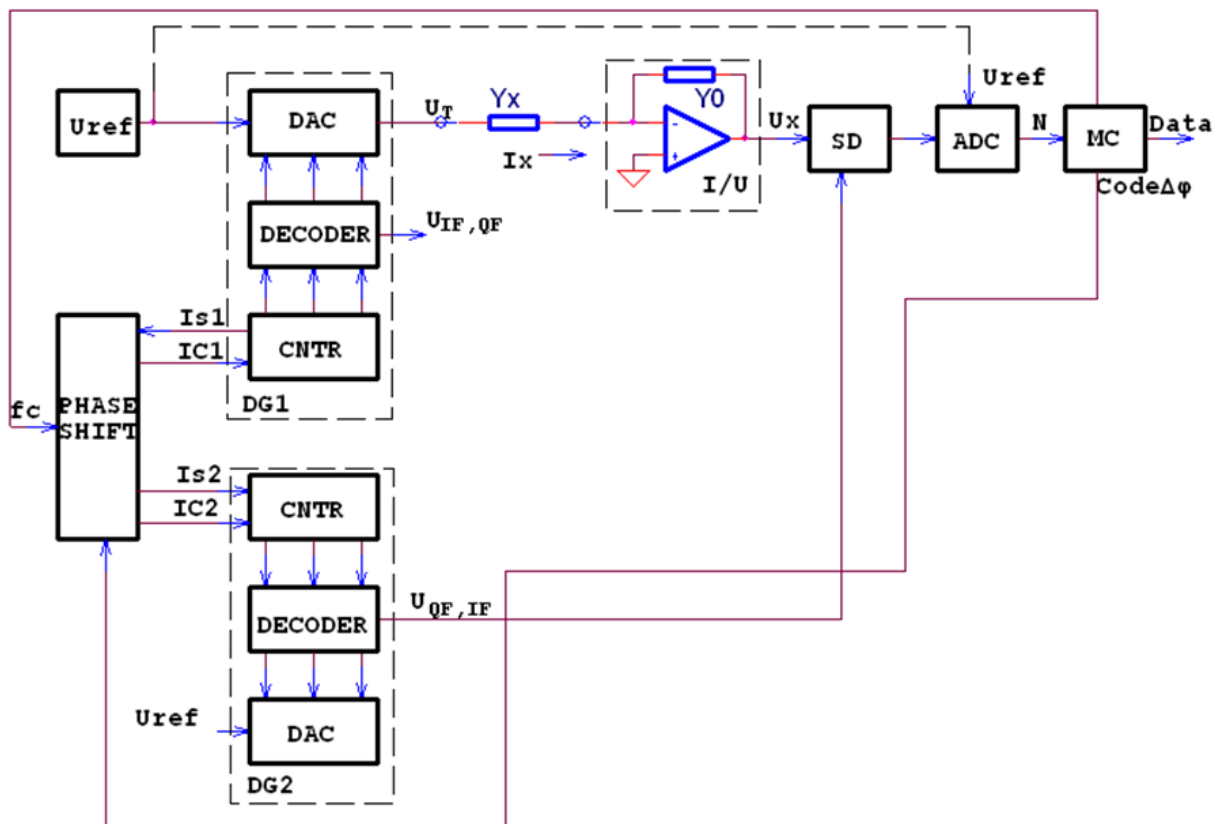


Figure 2. The scheme of the converter of an immitans parameters with phase adjustment of the reference voltage of a synchronous detector

The device contains: a source of reference voltage U_{ref} ; identical digital generators DG1, 2 quasi-sinusoidal test signals U_t , the amplitude of which is determined by the voltage U_{ref} ; the converter I/U of current I_x through the object of measurement Y_x in normalized relatively to U_t information signal U_x ; synchronous SD detector and analog-to-digital converter ADC, which provide selection and conversion into digital code N of the information signal component that coincides in phase with the reference signal of the synchronous detector. The output reference signal $U_{IF, QF}$ (in-phase or quadrature) of the generator DG2 is used as such reference signal. Clocking of digital generators and synchronization of their output signals phases is carried out by clocking pulses Ic1,2 and synchronization pulses Is1,2, which are obtained from the clock sequence fc of the microcontroller MC using the delay generator PS. The circuitry of this device is discussed below. The MC processes the results of the transformation N to obtain ready-made measurement data, and also controls the measurement process, in particular generates delay codes $\Delta\phi$ of the signals of the generator DG2. The normalization of the measurement results Y_x (to obtain the value of the modulo of measured parameter) is performed relative to the value of the reference measure Y_0 taking into account the values of reference voltages in DAC of the generators and in ADC, as well as by accurately forming of the delay $\Delta\phi$ of the test signal voltage U_t (to obtain the value of the phase angle).

In the channel under consideration, the key synchronous detector operates with a rectangular reference signal (meander) received from the CNTR counter through a decoder. Other DG2 nodes can be used for synchronous detection by processing of the information signal with weight coefficients, which provides better suppression of its harmonics and increase the accuracy of measurements. It should be emphasized that the reference voltages for digital generators and ADC are obtained from one high-stable source. Therefore, such a measuring channel can be considered as a bridge device with frequency conversion in the branch of the measuring object. The DC voltage U_{ref} is converted in this branch into a test signal U_t with a frequency f_t by the DAC multiplier in

DG1. Then, the obtained measuring signal U_x is converted into a pulsating DC voltage by multiplying on a reference signal with a synchronous detector. This signal converts in the charge of the integrating capacity of ADC. The branch of the reference measure operates on direct current and contains only the measure (divider) of the reference voltage in the ADC where it is compared with the detected signal.

The algorithm for performing measurements is based on the following operations. In the initial state, the phase of the reference voltage $U_{IF, QF}$ for the synchronous detector is set in quadrature to the phase of the test signal U_t of DG1 (if a resistor is used as a reference measure Y_0). If Y_x is the active conductivity with a small phase angle, the result of the ADC transformation will be close to zero. In this case, FS changes the phase $U_{IF, QF}$ of DG2 to in-phase with U_t , and the result of the conversion in ADC will become correspond to the modulus of Y_x . If Y_x is a reactive conductivity of high-quality, then the zero result of the conversion in ADC will be obtained under in-phase or anti-phase reference signal $U_{IF, QF}$ relative to U_t (depending on the nature of the reactivity Y_x). The modulus of its value will be obtained under quadrature $U_{IF, QF}$ relative U_t .

When measuring the parameters Y_x of a complex nature, the phase shift 90° between U_x and $U_{IF, QF}$ of DG2 is achieved in the first stage by adjusting the phase shift delay $\Delta\phi$ of the signal $U_{IF, QF}$ in one or the other direction. After reaching of the code N value close to zero, the change of the phase of a reference signal SD on 90° could be made and Y_x modulo will be determined. This can be realized by phase adjustment by the PS unit or with switching the reference voltages IF - QF. The phase angle Y_x , the tangent of its phase angle or loss angle, as well as its other parameters are calculated by the microcontroller according to the obtained values of the amplitude and phase delay, taking into account the clock frequency f_c and, accordingly, f_t .

At high frequencies of the test signal, the discreteness of the phase shift control between the signals DG1 and DG2 may be insufficient to obtain the required resolution of the object's phase angle measurement. In this case, additional bits of the code of this angle can be obtained by us-

ing the results of measuring the residual value of the quadrature component U_x after balancing the measuring circuit by phase in the first stage of measurement.

The circuit of the impedance parameter meter discussed above implements a combined measurement method that combines the principle of the impedance parameters direct conversion into digital codes and the phase angle balancing method. In this scheme the phase shift of the signal in the object of measurement is compensated by the phase shift of the synchronous detector's reference signal. This significantly reduces the errors from the non-informative influence of the measurement object's quadrature parameter under direct transducing its main parameter. At the same time, the modular errors (from the instability of the test signal level, the transmission ratio of the measuring circuits and the amplification path of the information signal) remain unchanged and limit the achievable accuracy of the instruments. This is especially actual for high-precision and high-sensitivity measurements under large background values of a parameter that is homogeneous with the informative. In these cases use the bridge methods of measurement with full compensation (balancing) of the measuring circuit output signal at the operating point of the conversion characteristic. When working with impedance-type sensors, such balancing usually occurs for the conventional zero value of their informative parameter, and its small changes under the influence of measured parameter are measured by the method of direct conversion of the output signal of the bridge. However, to achieve high measurement accuracy in a wide range of frequencies (above 10 - 20 kHz and below 100 Hz) in existing AC bridges with two balancing circuits - on the active and reactive parameters of the object impedance, difficult due to an increase in both amplitude and phase errors of in the reference branches of the bridge circuit. Therefore, when broadband impedance meters are needed, it is often found that the technical and economic performance of existing devices is unsatisfactory.

Previous studies [20 - 22], including of the authors [15, 23] have shown the prospects for solving this problem using two-channel (two-phase) the test signal digital generators, which allow to

perform fully balance the AC bridge with a single reference measure for the any impedance. It is possible use reference measure, which has the best characteristics in the required frequency range: of capacitance or active resistance. Obtaining the required phase of the signal, that balances the bridge circuit, is achieved by adjusting the phase difference between the test voltages applied to the object of measurement and to the reference measure. Based on the above circuit solutions, a fairly simple and technological device for implementing this method was developed.

The diagram of formation the two coherent test signals and their corresponding reference signals with precise discrete adjustment of the phase difference between them shown on Fig. 3. In the development performed by the authors, the discreteness of the quasi-sinusoid was 32 steps per period. Circuits of signal generators ("Digital generator" 1 and 2) differ in this case. In the decoder of one of them (master) there are two schemes of formation of sync pulses: the scheme of internal synchronization of the ring counter (loop end) at the end of a cycle and for synchronization of the external device with a phase shift corresponding to a phase of an output signal 90° (mid cycle). This pulse is fed to the clocks generation unit (clock sequencer), which forms the clock sequences CI1 for the master counter, and time-shifted relative to it sequences CI2 for the slave counter. The mutual shift of these sequences is precisely regulated by the 4-bit delay counter FD2 according to the "delay codes" 2, set by the microcontroller MPC of the device. To increase the discreteness of the phase control, the MPC generates pulses TI0 with a frequency 16 times higher than the frequency of DG's counters clocking (to clocking the master generator, they are divided 16 times by a similar counter FD1). Therefore, this discreteness is 1/16 of the duration of one step. If the ratio of the frequency TI0 and the test signal U_t allows, the number of bit FD1, 2 can be much higher, and the discreteness of the phase shift control is correspondingly higher. The same counter FD3 serves for less discrete control (signal Res) of the synchronization moment of the initial state of the slave generator relative to the internal synchronization of the master generator. This delay is ± 8 intervals of clock pulses CI (of durations of one step of the quasi-sinusoid) and is

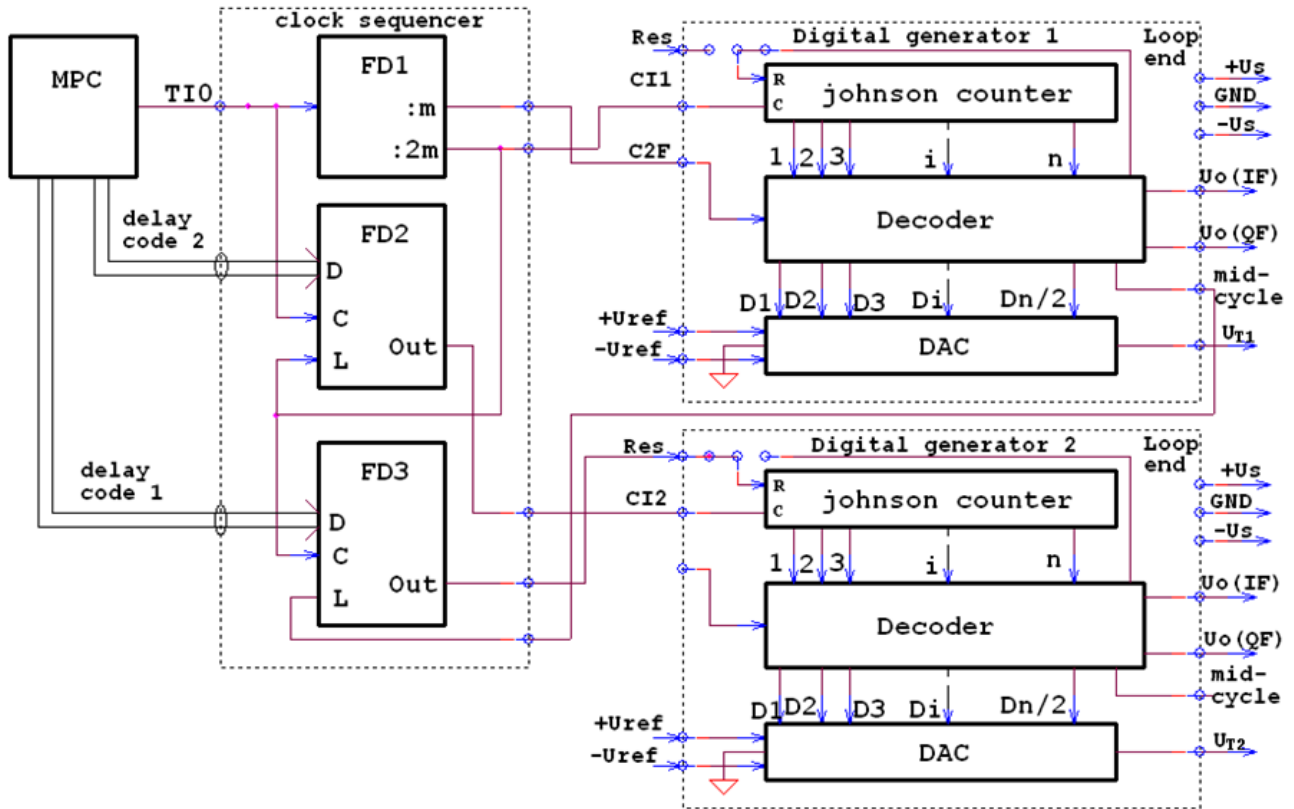


Figure 3. The scheme of formation of two sets of test and reference signals with precise regulation of their phase difference

regulated with the delay counter FD3 using delay code 1. This allows you to adjust the phase ratio of the output signals of the generators within $0^\circ \dots +180^\circ$. If in the decoder of the leading generator to form one more sync pulse (for a phase -90°) adjustment of phase shift of test signals becomes also possible within $(0^\circ \dots -180^\circ)$.

The diagram of a measuring channel based on a bridge circuit, with balancing the modulus and phase of the output signal is shown on Fig. 4. It differs from the scheme in fig. 2 by the presence in the measuring circuit of the second branch, which includes DG2 and the reference measure Y_0 . The reference resistor (R_1) is installed in the feedback circuit of the current/voltage converter I/U at the output of the bridge circuit, and determines the transmission coefficient of the bridge imbalance signal. The characteristics of I/U converter in this case gives little effect on the metrological parameters of the measuring channel. In the high-frequency or low-frequency sections of a wide range of frequencies, these parameters can be optimized by the appropriate choice of the kind

of the measure Y_0 (capacitance or active conductivity, respectively), which provides a significant increase in measurement accuracy. The second difference is the ability to control the amplitude of the test voltage at the output of DG2 using the regulator of its reference voltages U_B and $-U_B$. It includes a balancing DAC of the bridge (DAC_B), a current-voltage converter (I/U) and an inverter (INV).

The measurement process consists of two stages. Initially, as in the above-mentioned channel with direct impedance conversion, the phase shift of the current in the object of measurement is compensated by the phase shift of the synchronous detector's reference voltage at zero values of the reference voltages U_B and $-U_B$. In the second stage, the voltage at the output of DG2 increases until the equilibrium of the bridge circuit is reached. If the measure Y_0 is a resistor, the phase of this voltage must be opposite to the current phase of the object being measured. If Y_0 is a capacitor, this phase must be delayed by 90° . As mentioned above, additional data bits can be de-

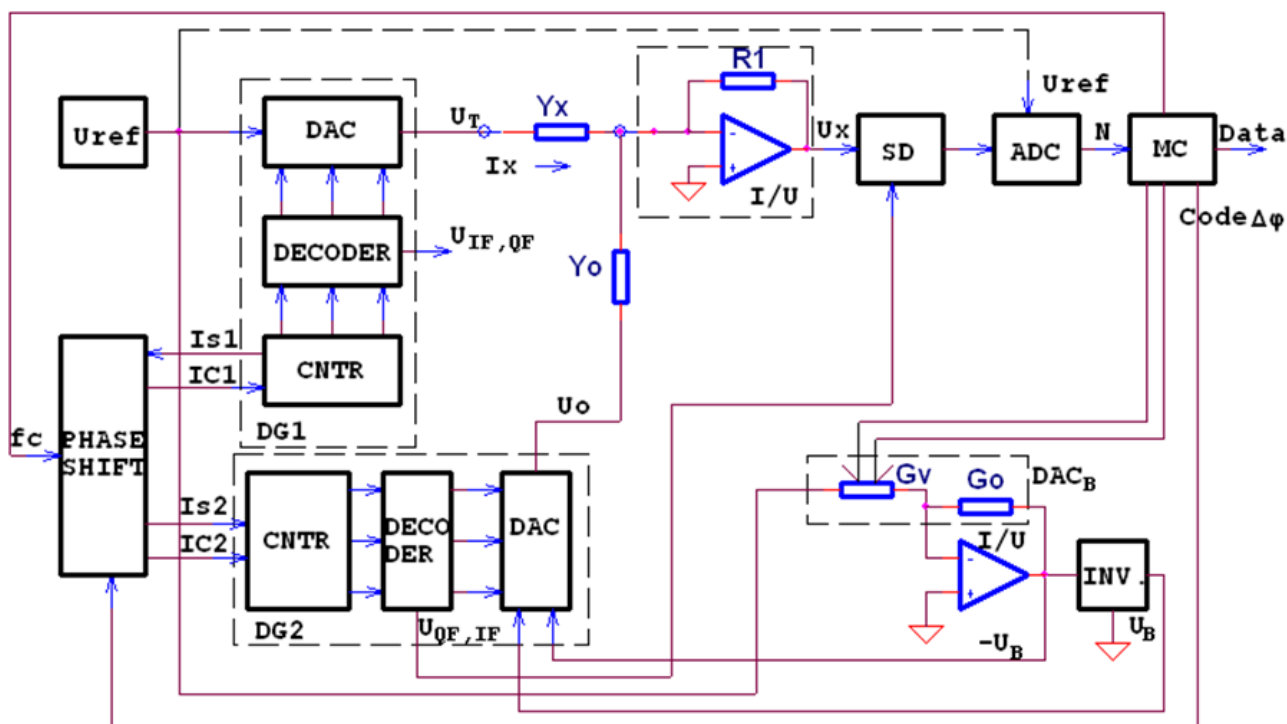


Figure 4. The scheme of the measuring channel based on the bridge circuit with balancing the module and phase of the output signal

terminated by converting the residual imbalance signal into the ADC in the case of insufficient discreteness of the result codes obtained by the performed bridge balancing.

Based on the results of the development, prototypes of basic measuring modules with single-phase and two-phase test signal generators were made. Their description and results of metrological research will be presented in the continuation of this article.

Conclusions

1. Phase errors of separation of immitances into active and reactive components are the main problem for obtaining high accuracy of their measurements in a wide range of frequencies. Traditional principles of construction of impedance-metric means do not provide achievement of an acceptable ratio of metrological and technical and economic characteristics of devices.

2. A promising way to reduce the phase errors of immitance parameters meters in a wide range of frequencies is the use of digital generators of quasi-sinusoidal test signals based on Johnson's ring counter and DAC with sequential summation

and subtraction of currents forming the quasi-sinusoidal stair-step voltage. This provides minimal switching interference and time differences of the signal's components from which the quasi-sinusoidal test voltage and in-phase and quadrature voltages to control key synchronous detectors are synthesized.

3. The proposed schemes of immitance parameters meters based on the developed digital generators and on the bridge circuit balanced by module and phase, and also the circuit of combined type with partial balancing and direct conversion of the output signal, provide simplicity and manufacturability of devices and low phase errors.

References

- [1]. Kibble P. B. Rayner G. H. Coaxial Alternative Current Bridges // Briston; Pdam Hilder Ltd. 203 p. (1984).
- [2]. Karandeev K. B. Mostovye metody izmerenij // Gostehizdat USSR, (1952).
- [3]. Grinevich F. B. Avtomaticheskie mosty peremennogo toka // Novosibirsk: Izd. SO AN SSSR, 215 s. (1964).
- [4]. Novik A. I. Sistemy uravnoveshivaniya

precizionnyh bystrodejstvuyushih odno-parametrovyh mostov peremennogo toka // *Tehnichna elektrodinamika*. 1997. №5. S. 65 – 69.

[5]. F. B. Grinevich, M. N. Surdu *Vysokotochnye variacionnye izmeritelnye sistemy peremennogo toka* // Kiev: Naukova dumka, 192 s. (1989)

[6]. M. M. Surdu, Z. Ya. Monastirskij *Variacijni metodi pidvishennya tochnosti vimiryuvachiv imitansu* // K.: In-t elektrodinamiki NAN Ukrayini, 385 s. (2015).

[7]. M. Surdu *Variational Calibration*, Published in the book: «Metrology» Edited by: Anil Akdogan. Chapter 3. IntechOpen 01. 08. 2018.

[8]. Pohodilo Ye. V., Homa V. V. *Vimiryuvachi CLR z peretvorennyam «imitans — napruga»* // Lviv: Lvivska politehnika, 292 s. (2011).

[9]. A. D. Vasilenko, V. G. Melnik, A. I. Novik, L. N. Semenycheva *Povyshenie razreshayushej sposobnosti immitansometricheskikh kanalov* // *Tehnichna elektrodinamika*. 2013. № 1. S. 70 – 81.

[10]. Labuzov A. E., Lameko A. L., Surdu M. N. *Precizionnye izmeriteli impedansa (RLC-metry: Sostoyanie rynka i tendencii razvitiya)*. // Rezhim dostupu: <http://www.promix.com.ua/public/RLC.pdf>.

[11]. AD5933 *Obzor. Osobennosti i preimushestva*. Rezhim dostupu: <https://www.analog.com/ru/products/ad5933.html>.

[12]. Hoya J., Lentka Gr. *Portal analyzer for impedance spectroscopy. XIX IMEKO World Congress. September 6-11, 2009, Lisbon, Portugal. P. P. 497-502*. Режим доступу: https://pdfs.semanticscholar.org/0027/a81d802a3fd565d69c7239710d105c6a34ea.pdf?_ga=2.153056890.2112044939.1588864114-1395720667.1588864114.

[13]. Hoya J., Lentka Gr *Interface circuit for impedance Sensors using two specialized Single-chip Microsystems Sensors and Actuators A Physical*, 2010, 163, 1, p. 191-197.

[14]. Melnik V. G. *Nizkochastotnye cifrovye ekstremalnye mosty peremennogo toka izmeritelnye cepi i algoritmy uravnoveshivaniya*. Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniceskikh nauk AN USSR // Institut elektrodinamiki, Kiev, 1988, 20 s.

[15]. A. S. 1524005 (SSSR) *Avtomaticheskij most peremennogo toka*. Kromplyas B. A., Melnik V. G. Surdu M. N., Skripchenko I. A. // Institut

elektrodinamiki AN USSR. Zayavka №4387628. 03.03.1989.

[16]. A. S. 1265624 (SSSR) *Avtomaticheskij cifrovoj most peremennogo toka* Grinevich F. B., Novik A. I., Melnik V. G., Ornatskij O. A., Surdu M. N., Skripchenko I. A. // Institut elektrodinamiki AN USSR. Zayavka №3824063, 13.12.1984. Zaregistrovano v Gosreestre izobretenij SSSR 22.06.1986.

[17]. A. S. 853560. *Avtomaticheskij most peremennogo toka*. Surdu M. N., Ornatskij O. A., Melnik V. G // Institut elektrodinamiki AN USSR. Zayavka №2847759, 30.11.1979. Zaregistrovano v Gosreestre izobretenij SSSR 07.04.1981.

[18]. Surdu M. N., Melnik V. G., Ornatskij O. A. *K vyboru metodiki rascheta parametrov kvazisinusoidalnogo napryazheniya*. // V kn.: “Tehnika elektricheskikh izmerenij”, “Naukova dumka”, Kiev, 1979. s. 41-48.

[19]. Surdu M. N., Melnik V. G., Ornatskij O. A. *Pogreshnosti formirovaniya kvazisinusoidalnogo napryazheniya cifrovogo generatora* // V kn.: “Tehnika elektricheskikh izmerenij”, “Naukova dumka”, Kiev, 1979, s. 13-19.

[20]. M. N. Surdu, D. M. Surdu. *AC bridges with phase controlled dividers – theory and experimental results (Mosty peremennogo toka s fazovym upravleniem – teoriya i rezultaty eksperimenta)* // *Ukrayinskij metrologichnij zhurnal*. 2015. № 3. s. 16 – 24.

[21]. Surdu M. N., Lameko A. L., Surdu D. M. Kursin S. H *Avtomaticheskaya precizionnaya sistema dlya metrologicheskogo obespecheniya izmerenij parametrov impedansa* // Ch. 1 *Principy dejstviya*, *Izmeritel'naya Tehnika*, 2012, №7, str. 51-57.

[22]. M. Surdu, A. Lameko, D. Surdu, S. Kursin, M. Mukharovsky, A. Akhmadov, S. Shevkun *Accurate universal set of automatic comparators for impedance parameters units reproduction and transfer* // XVIII IMEKO TC4 Symposium and IX Semetro, Natal, (2011).

[23]. Melnik V. G., Slickij A. V., Vasilenko A. D. *Kvaziuravnoveshennyj konduktometricheskij most dlya biosensornoj sistemy s balansirovkoj po modulyu i faze*. // “Sensorna elektronika ta mikrosistemni tehnologiyi”, 2016. – T. 13, №3. - s. 91-100.

UDC 621.317

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2020.2.205825>

IMPROVEMENT GENERATING OF THE TEST SIGNALS FOR DETERMINATION OF THE IMPEDANCE PARAMETERS IN WIDE FREQUENCY RANGE

V. G. Melnyk¹, P. I. Borschov¹, V. K. Beliaev², O. D. Vasylenko¹, O. L. Lameko¹, O. V. Slitskiy¹

¹Institute of electrodynamic National Academy of Sciences of Ukraine, 56 Pr. Peremohy, 03057, Kyiv – 57. E-mail: melnik@ied.org.ua

²National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Heroyiv Oborony st., 15, Kyiv, 03041, Ukraine

Summary

A brief analysis is given of modern methods for measuring impedance parameters and sources of error, limiting their accuracy in a wide range of frequencies and the possibilities of their use in newest, in particular sensor, technologies on technical and economic characteristics. An effective way to solve the main problem - a significant increase in the errors of the separation of the informative signal into the an active Re and a reactive Im components with increasing frequency due to insufficient accuracy of the test's and reference's signals phase ratio is substantiated. New principles of construction of the digital generators of test and reference signals by synthesis of quasi-sinusoidal voltage by means of Johnson's ring counters and the digital-to-analog converters with sequential summation and subtraction of currents that forms stair-step voltage are considered detail. This, as well as the simplicity and identity of the structures of the formation of the test and reference signals, provide minimal switching interference and time inconsistencies of the test voltage with in-phase and quadrature voltages to control key synchronous detectors. The construction of a simple two-phase digital generator of test and reference signals with precise control of the phase difference in the two channels of voltage generation is considered. The schemes of impedance parameter meters based on the developed digital generators are proposed: with a bridge circuit balanced by module and phase, and a combined type with partial balancing and direct conversion of the output signal, which provide simplicity and manufacturability of devices and low phase error. Based on the results of the development, prototypes of basic measuring modules with single-phase and two-phase test signal generators were made. Their description and results of metrological research will be presented in the continuation of this article.

Keywords: impedance, measurement, phase error, test signal, reference signal

УДК 621.317

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2020.2.205825>

УДОСКОНАЛЕННЯ ГЕНЕРУВАННЯ ТЕСТОВИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ІМПЕДАНСУ В ШИРОКОМУ ДІАПАЗОНІ ЧАСТОТ

В. Г. Мельник¹, П. І. Борщов¹, В. К. Беляєв², О. Д. Василенко¹, О. Л. Ламеко¹, О. В. Сліцький¹

¹ Інститут електродинаміки НАН України пр. Перемоги 56, м. Київ-57, 03057, Україна. E-mail: melnik@ied.org.ua

² Національний університет біоресурсів та природокористування України, Вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041, Україна.

Реферат

Дано короткий аналіз сучасних методів вимірювання параметрів імпедансу і джерел похибок, що обмежують їх точність в широкому діапазоні частот, та можливості їх використання в новітніх, зокрема сенсорних, технологіях за техніко-економічними характеристиками. Обґрунтовано ефективний шлях вирішення основної проблеми – значного збільшення похибок розділення інформативного сигналу на активну Re та реактивну Im складові при підвищенні частоти через недостатню точність співвідношення фаз тестових та опорних сигналів. Детально розглянуто нові принципи побудови цифрових генераторів тестових та опорних сигналів шляхом синтезу квазісинусоїдальної напруги за допомогою кільцевих лічильників за кодом Джонсона та цифро-аналогового перетворювача з послідовним підсумовуванням і відніманням струмів, що формують сходинки квазісинусоїди. Це, а також простота та ідентичність структур формування сходинок тестових і опорних сигналів, забезпечують мінімальні комутаційні завади та часові незгодженості тестової напруги з синфазною і квадратурною до неї напругами для управління ключовими синхронними детекторами. Розглянуто побудову простого двофазного цифрового генератора тестових та опорних сигналів з точним регулюванням різниці фаз в двох каналах формування напруги. Запропоновані схеми вимірювачів параметрів імпедансу на основі розроблених цифрових генераторів: з мостовим колом, що урівноважується за модулем та фазою, і комбінованого типу з частковим урівноваженням та прямим перетворенням вихідного сигналу, які забезпечують простоту і технологічність приладів при низьких фазових похибках. За результатами проведених розробок були виготовлені прототипи базових вимірювальних модулів з однофазним та двофазним генераторами тестових сигналів. Їх опис та результати метрологічних досліджень будуть представлені в продовженні даної статті.

Ключові слова: імпеданс, вимірювання, фазова похибка, тестовий сигнал, опорний сигнал

До 70-річчя члена-кореспондента НАН України Блонського Івана Васильовича

Доктору фізико-математичних наук, професору, члену-кореспонденту НАН України, завідувачу відділу фотонних процесів Інституту фізики НАН України, керівнику ЦККП "Лазерний фемтосекундний комплекс" НАН України при Інституті фізики НАН України БЛОНСЬКОМУ Івану Васильовичу 23 червня 2020 р. виповнюється 70 років.

Народився Іван Васильович на Івано-Франківщині. Після закінчення в 1967 році із Золотою медаллю Серафинецької середньої школи поступив на фізичний факультет Чернівецького державного університету, який закінчив у 1972 році. У цьому ж році поступив в аспірантуру Інституту фізики, після закінчення якої неперервно працює в ІФ НАН України на посадах: молодшого наукового співробітника (до 1982 р.), старшого наукового співробітника (до 1992 р.), провідного наукового співробітника (до 1993 р.), завідувача лабораторії фотоакустики і оптики (до 1994 р.), заступника директора з наукової роботи (1994 - 2004 рр.), головного наукового співробітника (до 2005 р.), завідувача відділу фотонних процесів, керівника Центру колективного користування приладами НАН України при Інституті фізики НАН України "Лазерний фемтосекундний комплекс" (із 2005 р. по теперішній час).

В 1978 р. захистив кандидатську, а в 1990 р. докторську дисертації. Предмет дисертаційних робіт – фізика екситонних явищ в квазідвомірних напівпровідниках. У 1993 році присуджено звання професора, а згодом - почесного Соросівського професора. В 1997 році обраний член-кореспондентом НАН України по спеціальності "Експериментальна фізика твердого тіла".

Основні наукові здобутки Івана Васильовича відносяться до фізики твердого тіла; оптики наноструктур; взаємодії лазерного випромінювання з речовиною, прецизійних лазерних технологій.

Зокрема, ним встановлені основні механізми екситонного поглинання та випромінювання світла в класі напівпровідників з шаруватою структурою. Доведено, що відображення особливостей структурної будови таких матеріа-



лів, які займають проміжний тип між іонно-ковалентними і органічними напівпровідниками, двомірними і трьохмірними структурами проявляється не в характері електрон-діркової взаємодії в екситоні (моделі екситона), а в його динамічних властивостях. У кристалах з проміжною силою екситон-фононного зв'язку виявлено особливий тип екситонних збуджень – рухливі слабозв'язані стани екситонів з деформацією ґратки. Визначені основні механізми енергетичної релаксації анізотропних поляритонів та розвинуто модель колективних збуджень типу „зв'язана мода” в гранично анізотропних середовищах. Отримані результати по цій частині роботи узагальнені в двох монографіях.

Під керівництвом Блонського І. В. розвинуто модель імпульсного фотоакустичного відклику багат шарових структур, яку використано при створенні термохвильового інтроскопу та оптоакустичного спектрометра оригінальних конструкцій. З використанням розвинутого методу вперше в режимі "in – situ" досліджено оптичні, теплові та пружні характеристики шарів пористого кремнію (пор.-Si), які знаходяться в механічному контакті з монокристалічним кремнієм в режимі товщинного профілювання. Вперше спостережено ефект та пояснено природу фотогенерації звуку гігантської інтенсивності при імпульсному фотозбудженні наночасток CdS, інкорпорованих у власних порожнинах цілітних матриць. Ці та ряд інших результатів дозволили розвинути новий напрямок – фотоакустика гетеро структур (Державна премія України, 1994 рік).

Поєднуючи методи фото-, термо- і тунельної люмінесценції, вивчено комбінований вплив квантоворозмірного фактору і фактору структурного розупорядкування на генераційні, транспортні та рекомбінаційні процеси в наноструктурах неорганічного та органічного походжень. В наночастках кремнію виявлено та досліджено розмірну залежність ефективності електронного оже-розсіяння та нові механізми локалізації електронних збуджень, властиві квантовим точкам і дротинам. Для квантових точок запропоновано і експериментально підтверджено існування ефекту "двохтактового зарядового поршню", рушійною силою якого є електронний оже-процес (здвоєний електронний перехід), який є причиною "самовиштовхування" носіїв заряду із фотозбуджених кремнієвих наночасток з послідуною їх локалізацією на периферійних оксидних оболонках. В квантових дротинах виявлено новий тип локалізації носіїв заряду пастками "топологічного" походження, генетично пов'язаними з флуктуаціями діаметра дротин по їх довжині, що із врахуванням квантоворозмірного ефекту породжує складний рельєф внутрішньокристалічного потенціалу. Вперше виявлено немонотонність температурної залежності беккерелівського коефіцієнту затухання в тунельній люмінесценції квантових

дротин напівпровідників неорганічного та органічного походження, природу якої пояснено з позицій реалізації "дифузійного кластеру" в ансамблі пасткових станів, в межах якого здійснюється тунельний транспорт по механізму перезахоплення.

Під керівництвом І. В. Блонського і за його безпосередньої участі введено в дію унікальний для України широкодіапазонний лазерний фемтосекундний комплекс, який відповідає кращим світовим стандартам. З його використанням, на прикладі наночасток благородних металів досліджено вплив фактору просторового обмеження на динамічні електронні процеси. Зокрема, в наночастках Cu, інкорпорованих в SiO₂ матрицю при опроміненні зразків фемтосекундними імпульсами вперше виявлено знакозмінний характер залежності резонансної частоти поверхневих плазмонів від часу, який супроводжується немонотонною зміною напівширини плазмової смуги по мірі остигання електронного газу. Запропонована модель, яка пояснює отримані результати з позицій особливостей еволюції діелектричного відгуку такого композитного середовища внаслідок реалізації ефекту Керра в умовах гігантського підсилення локального поля. Проведені дослідження закономірностей поширення фемтосекундних лазерних імпульсів у прозорих середовищах від моменту розвитку оптичної керівської нелінійності через стадію самофокусування, утворення плазми, філаментатії променя (розбиття суцільного променя на дискретні треки) до руйнування матеріалу з появою і поширенням супроводжуючих руйнування ударних хвиль.

Розвинуті основи фізики лазерного пробою прозорих середовищ, які використано для задач прецизійної мікрообробки прозорих матеріалів (гранти УНТЦ, та контракти з Інститутом фізики, точної механіки і оптики Академії наук Китаю та фірмою LG-Electronics).

В останні роки основна увага була зосереджена на розвитку в Україні нового перспективного наукового напрямку – фемтооптики матеріалів, перспективних для оптоелектронних та телекомунікаційних використань.

Напрямок базується на взаємодії ультракорот-

ких фемтосекундних ($\tau \sim n \times 10^{-15}$ с) імпульсів тривалістю в кілька періодів Е/М хвилі з речовиною, що супроводжується проявом низки яскравих ще недостатньо вивчених нових явищ, які і формують передній край сучасної оптичної науки – нестационарну нелінійну оптику, або як її скорочено називають – фемтооптику. До таких явищ в першу чергу відносять утворення особливих фізичних тіл плазмово-польової природи – лазерних фемтосекундних філаментів, генерацію суперконтинууму випромінювання фемтосекундної тривалості надширокого спектрального складу, «квазібілий» спектр якого охоплює область від 300 нм до 3 мкм, конічної емісії та ряду інших.

Зі створенням в 2003 р. при Інституті фізики ЦККП «Лазерний фемтосекундний комплекс» такі дослідження були започатковані і в Україні і активно ведуться по трьох основних напрямках.

– Створення дослідницьких методик, які б відповідали кращим міжнародним стандартам, або повністю були оригінальними.

– Дослідження з їх використанням нестационарних нелінійних оптичних явищ та кінетики лазерної абляції матеріалів, перспективних для оптоелектронних та телекомунікаційних використань, в широкому часовому діапазоні ($n \times 10^{-15}$ с \square $n \times 10^{-9}$ с).

– На основі отриманих результатів – створення сучасних економічно привабливих технологій продукування масивів елементів мікрооптики, перспективних для практичних впроваджень (мікрохвилеводи, мікролінзи, мікродзеркала тощо).

Для їх реалізації створені нові дослідницькі комплекси:

– Фемтосекундний часороздільний мікроскоп, призначений для дослідження кінетики лазерної абляції матеріалів у часовому інтервалі 150 фс – 10 нс, з кроком сканування - 0.1 мкм (0.7 фс);

– Методика часороздільної оптичної поляриметрії, яка дозволяє здійснювати пряме спостереження просторово-часової трансформації фемтосекундних лазерних імпульсів у прозорих середовищах; часова роздільна здатність – 150 фс; просторова – 2 мкм;

– Методика «Керрівський затвор», яка призначена для широкодіапазонних часороздільних досліджень спектрів вторинного випромінювання у спектральному діапазоні 280 – 800 нм, з часовим інтервалом 300 фс – 2 нс.

Використання створених методик часороздільної мікроскопії дозволило вперше виявити:

– Кінетику просторово-часової трансформації (самостиснення в часі з подальшим розділенням) надпотужних ($\square 1012$ Вт/см²) фемтосекундних світлових імпульсів (кварц, сапфір);

– «Притягувальну» та «відштовхувальну» взаємодію двох філаментів;

– Нове явище – періодичну структуру філаментів в монокристалах з додатним та від'ємним двопророзомленням.

Вказані результати вже отримали суттєві практичні застосування у технології продукування масивів елементів мікрооптики, а саме:

– Створення масивів мікролінз і мікродзеркал в халькогалідному склі 65GeS₂-25Ga₂S₃-10CsCl методом одноімпульсної фс лазерної абляції;

– Запис мікрохвилеводів в кристалічному кремнії за допомогою фс лазерних імпульсів з довжиною хвилі 1.55 мкм.

Відмічені, та ряд інших наукових результатів Івана Васильовича, опубліковані в п'яти монографіях, 6 оглядах та у 224 наукових працях.

Блонський І.В.: член експертної ради ВАК України (2005-2010 рр – заступник голови, з 2015 р. – голова); входить до складу наукових рад НАН України з проблем: “Лазерна фізика, лазерні технології”; “Фізика напівпровідників”, “Фізика твердого тіла”; в робочу групу програми НАН України “Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології”, редколегію журналів “Український фізичний журнал”, “Semiconductor Physics. Quantum Electronics. Optoelectronics” і нашого журналу.

Під керівництвом професора Блонського І.В. захищено три докторських і 12 кандидатських дисертацій.

Блонський І.В. – двічі лауреат (1993, 2004 рр.) Державної премії України в галузі науки і техніки, керівник та учасник робіт по ряду міжнародних грантів,

Заслужений діяч науки і техніки України.

З приємністю відзначимо і нашу багатолітню співпрацю з Іваном Васильовичем Блонським, людиною творчою, активною і оптимістичною, у наукових дослідженнях і в редколегії нашого журналу. Іван Васильович продовж багатьох років бере участь у роботі програмних комітетів Міжнародних наукових форумів,

що проводяться на базі нашого університету.

Тож вітаємо Вас, шановний Іване Васильовичу, зі славним Ювілеєм і щиро зичимо Вам доброго здоров'я, щастя, творчої наснаги і нових здобутків на науковій ниві!

Редколегія

**Національна академія наук України
Міністерство освіти і науки України
Інститут скінтіляційних матеріалів НАНУ
Інститут радіофізики та електроніки імені О. Я. Усикова НАНУ
Харківський національний університет радіоелектроніки
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
Одеський національний університет імені І.І. Мечникова
Українське фізичне товариство**

**XI МІЖНАРОДНА
НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ
" Функціональна база наноелектроніки "**

14 вересня - 19 вересня 2020 р, м Одеса, Україна

Шановні колеги!

Запрошуємо Вас взяти участь в роботі X Міжнародної наукової конференції "Функціональна база наноелектроніки", яка відбудеться в м. Одеса 14 вересня - 19 вересня 2020 року.

Участь у конференції буде цікава для науковців, експертів, аспірантів, фахівців підприємств усіх форм власності, навчальних закладів, академічних інститутів України і зарубіжжя.

НАУКОВІ НАПРЯМКИ КОНФЕРЕНЦІЇ:

- Фізика і теорія наноструктур для електроніки
- Електродинаміка і наноелектроніка ТГц діапазону
- Метаматеріали і їх застосування в наноелектроніці ТГц і ГГц діапазонів
- Методи формування, діагностики і дослідження наноструктур і нанооб'єктів включаючи біологічні
- Математичне моделювання в наноелектроніці
- Наноелектронні сенсори та інформаційні системи. Наноелектронні сенсори для біомедичної інженерії
- Магнітні наноструктури для спінової (і нано-) електроніки ГГц і ТГц діапазонів
- МЕМС і НЕМС в електроніці
- Нанофотоніка. процеси, структури і пристрої
- Нелінійні процеси в штучних середовищах / метаматеріалів і прилади на їх основі

ВАЖЛИВІ ДАТИ:

Подача заявки і матеріалів для опублікування	15.07.2020
Повідомлення про прийняття матеріалів	15.08.2020
Реєстрація онлайн	До 31.08.2020
День реєстрації	14.09.2020
Відкриття конференції	15.09.2020

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ ВНЕСОК:

Організаційний внесок включає в себе видання програми, збірника наукових праць конференції, а також витрати, пов'язані з покриттям витрат на організацію і проведення конференції, в тому числі витрати на рекламу, зв'язок, каву-брейк та ін.

Рішення про прийняття Оргкомітетом доповідей після їх рецензування та банківські реквізити для перерахування грошових коштів Вам буде надіслано у повідомленні до 15 серпня 2020 р. у другому інформаційному листі.

**ДЛЯ УЧАСТІ У РОБОТІ КОНФЕРЕНЦІЇ
НЕОБХІДНО НАДАТИ:**

- Заявку (Додаток 1).
- Електронну версію доповіді відправляйте (E-mail: fbn.conference@gmail.com) англійською мовою (3-5 сторінок, максимум 6 співавторів), оформленої відповідно вимог до оформлення доповіді і прикладеним зразком (Додаток 2).

**АДРЕСА ОРГАНІЗАЦІЙНОГО
КОМІТЕТУ:**

61072, м. Харків, просп. Науки, 60
Інститут скінтіляційних матеріалів
НАН України
E-mail: fbn.conference@gmail.com
Сайт конференції:
fbn-conference.isma.kharkov.ua

ПРОГРАМНИЙ КОМІТЕТ**СПІВГОЛОВИ ПРОГРАМНОГО КОМІТЕТУ:**

- Лепіх Я.І. проф., д. ф.-м. н., Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, м. Одеса, Україна
- Сліпченко М.І. проф., доктор ф.-м. наук, ІСМА НАНУ, м. Харків, Україна
- Тарапов С.І. член-кор. НАНУ, проф., д. ф.-м. н., ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАНУ, м. Харків, Україна

ЧЛЕНИ ПРОГРАМНОГО КОМІТЕТУ:

- | | | | |
|-----------------|---|-------------------|---|
| Азаренков М.О. | академік НАНУ, проф., проректор ХНУ імені В.Н. Каразіна, м. Харків, Україна | Кузнецов А.П. | проф., проректор Білоруського державного університету інформатики і радіоелектроніки, м. Мінськ, Білорусь |
| Беляєв О.Є. | академік НАНУ, проф., директор Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ, м. Київ, Україна | Негрійко А.М. | член-кор. НАНУ, зам. директора Інституту фізики НАНУ, м. Київ, Україна |
| Бондаренко І.М. | проф., зав. каф. ХНУРЕ, м. Харків, Україна | Просвірін С. Л. | проф. Радіоастрономічного інституту НАНУ, м. Харків, Україна |
| Гордієнко Ю.О. | проф. ХНУРЕ, м. Харків, Україна | Проценко І. Ю. | доктор ф.-м. наук, проф., Зав. каф. Електроніки, загальної та прикладної фізики СУМДУ, м. Суми, Україна |
| Готра З.Ю. | проф., зав. каф. НТУ «Львівська політехніка», м. Львів, Україна | Сизов Ф.Ф. | член-кор. НАНУ, проф. Інституту фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАНУ, м. Київ, Україна |
| Гриньов Б.В. | академік НАНУ, проф., директор ІСМА НАНУ, м. Харків, Україна | Скришевський В.А. | проф., зав. каф. Інституту високих технологій Київського національного університету ім. Т.Г.Шевченка, м.Київ, Україна |
| V. Dyakonov | Prof., Dr., Head of Experimental Physics VI, Julius-Maximilians Universität Würzburg, Germany | В. N. Chichkov | Prof., Dr., Gottfried Wilhelm Leibniz Universität / Institut für Quantenoptik, Hannover, Germany |
| Зависляк І.В. | проф. Київського національного університету ім. Т.Г. Шевченка, м. Київ, Україна | Якименко Ю.І. | академік НАНУ, проф., перший проректор НТУУ «КПІ», м. Київ, Україна |
| Катрич В.О. | проф., д. ф.-м. н., проректор ХНУ імені В.Н. Каразіна, м. Харків, Україна | Ямпольський В.О. | член-кор. НАНУ, проф. ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАНУ, м. Харків, Україна |
| Кладько В.П. | член-кор. НАНУ, проф., Заст. директора Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ, м. Київ, Україна | A. Medvids | Dr., Prof., Riga Technical University, Latvia |
| Костильов, В.П. | д. ф.-м. н., зав. лаб. Інституту фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАНУ, м. Київ, Україна | E. Sheregij | Dr., Prof., Rzeszow University, Poland |
| Кочелап В.О. | член-кор. НАНУ, проф., Зав. відділом Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ, м. Київ, Україна | Fukai Shan | Prof., Vice Dean of College of Microtechnology and Nanotechnology, China |
| Кордюк О.А. | член-кор. НАНУ, проф., д. ф.-м. н., Директор київського академічного університету, м. Київ, Україна | | |

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 російською, або англійською мовою і супроводжуватися файлами тексту і малюнків на CD. Рукописи, які пропонуються авторами з України або країн СНД до видання англійською мовою обов'язково доповнюються україномовною або російськомовною версією. Електронна копія може бути надіслана електронною поштою.

2. Прийнятні формати тексту: MS Word (rtf, doc).

3. Прийнятні графічні формати для рисунків: EPS, TIFF, BMP, PCX, WMF, MS Word і MS Graf, JPEG. Рисунки створені за допомогою програмного забезпечення для математичних і статистичних обчислень, повинні бути перетворені до одного з цих форматів.

4. На статті авторів з України мають бути експертні висновки про можливість відкритого друку.

Рукописи надсилати за адресою:

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

Телефон / факс +38(048) 723-34-61,

E-mail: semst-journal@onu.edu.ua,

http: // semst.onu.edu.ua

Здійснюється анонімне рецензування рукописів статей.

Правила підготовки рукопису:

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

Авторське право переходить Видавцю.

Титульний аркуш:

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

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

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

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

5. Анотація: до 1000 символів.

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

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

Для авторів з закордону, які не володіють українською або російською мовами, пп. 2-5 викладаються англійською мовою.

7. До кожного примірника статті додаються реферати українською та англійською мовами (кожен реферат на окремому аркуші). Особливу увагу слід приділяти написанню резюме статті англійською мовою. Для цього доцільно користуватися послугами кваліфікованих спеціалістів-лінгвістів з подальшим науковим редагуванням тексту автором(-ами). Перед словом «реферат» необхідно написати повну назву статті відповідною мовою, УДК, прізвища та ініціали авторів, назви установ. Реферат обсягом 200-250 слів має бути структурованим: мета (чітко сформульована), методи дослідження, результати дослідження (стисло), узагальнення або висновки.

Після тексту реферату з абзацу розміщуються ключові слова.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Кожен рисунок повинен бути надрукований на окремому аркуші і мати розмір, що не перевищує 160x200 мм. Для тексту на рисунках використовуйте шрифт 10pt. Одиниці виміру повинні бути позначені після коми

(не в круглих дужках). Усі рисунки повинні бути пронумеровані в порядку їх появи в тексті, з частинами позначеними як (а), (б), і т.д. Розміщення номерів рисунків і напису усередині малюнків не дозволяються. Зі зворотної сторони, напишіть олівцем назву, прізвище(а) автора(-ів), номер малюнка і позначте верх стрілкою.

Фотографії повинні бути оригінальними. Кольоровий друк можливий, якщо його вартість сплачується авторами чи їх спонсорами.

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

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

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

варіант статті після рецензування.

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

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

Відхилені статті не повертаються.

До уваги авторів

Міжнародна агенція ISSN встановила скорочену назву нашого журналу «**Sens. elektron. mikrosist. tehnol.**» Просимо Вас у своїх посиланнях і бібліографічних даних статей використовувати саме таку назву оскільки по ній буде здійснюватися посилання на Вашу статтю.

INFORMATION FOR AUTHORS

THE REQUIREMENTS ON PAPERS PREPARATION

Journal «Sensor Electronics and 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 conclu-

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

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

1. Manuscripts should be submitted in duplicate in Ukrainian, English, or Russian, a hard copy and supplemented with a text file and figures on a CD. Manuscripts which are offered by authors from Ukraine or CIS countries to the edition in English are necessarily supplemented by Ukrainian or Russian version. An electronic copy may be submitted by e-mail.

2. Acceptable text formats: MS Word (rtf, doc).

3. Acceptable graphic formats for figures: EPS, TIFF, BMP, PCX, CDR, WMF, MS Word and MS Graf, JPEG. Figures created using software for mathematical and statistical calculations should be converted to one of these formats.

4. For articles of authors from Ukraine there should be expert conclusions about an opportunity of an open print.

Manuscripts should be sent to:

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

Phone / fax +38(048) 723-34-61,

E-mail: semst-journal@onu.edu.ua,

http: // semst.onu.edu.ua

Manuscripts of articles anonymous reviewing is carried out

The manuscript preparation rules:

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

Copyright transfer to the Publisher.

Title Page:

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

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

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

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

5. Abstract: up to 1000 characters.

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

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

For authors from abroad which do not know Ukrainian or Russian languages, items 2-5 may be 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 conclu-

sions. After the text of the abstract from the item key words are placed.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Each figure should be printed on a separate page and have a size not exceeding 160x200 mm. For text inside figures, use 10pt. Measurement

units should be indicated after a comma (not in blankets). All figures are to be numbered in order of its appearance in the text, with sections denoted as (a), (b), etc. Placing the figure numbers and captions inside figures is not allowed. On the backside, write with a pencil the paper title, author(s) name(s) and figure number, and mark the topside with an arrow.

Photographs should be submitted as original prints. Color printing is possible if its cost is covered by the authors or their sponsors.

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

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

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

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

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

Not accepted manuscripts will not be returned.

To author attention

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

Комп'ютерне верстання – С. О. Остапенко

Підп. до друку 24.06.2020. Формат 60×84/8.
Ум.-друк. арк. 10. Тираж 300 пр.
Зам. № 2106.

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