

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

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

**СЕНСОРНА
ЕЛЕКТРОНІКА
І МІКРОСИСТЕМНІ
ТЕХНОЛОГІЇ
2024 – Т. 21, № 4**

Науково-технічний журнал

Заснований 13.11.2003 року
Виходить 4 рази на рік

УДК 681.586

Засновник Одеський національний
університет імені І. І. Мечникова

За підтримки Українського фізичного
товариства

Ідентифікатор медіа: R30-03678
(zareestrovano Natsionalnoyu Radoyu
Ukrayini z pytanyu telebachennya
i radiomovlennya vid 28.03.2024 za № 1050)

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

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

Видається за рішенням Вченої ради
Одеського національного університету
імені І. І. Мечникова
Протокол № 5 від 17.12.2024 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
2024 – VOL. 21, No. 4**

Scientific and Technical Journal

Established on 13.11.2003
Published 4 times a year

UDC 681.586

Founded by Odesa I. I. Mechnikov
National University

With the support of the Ukrainian Physical
Society

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

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

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

Published as per the resolution of the Academic
Council of Odesa I. I. Mechnikov National
University
Minutes No. 5 dated 17.12.2024

Editorial Board address:
2 Dvorianska St, ISEPTC (RL-3),
Odesa I. I. Mechnikov National University,
Odesa, 65082, Ukraine
Tel/Fax: +38(048)723-34-61

Редакційна колегія

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

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

Editorial Board

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

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

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

ЗМІСТ CONTENTS

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

M. V. Strikha, M. D. Hurieiev
ANALYTICAL MODEL FOR THE SWITCHING VOLTAGE AND GAIN COEFFICIENT OF A CMOS INVERTER WITH NANOCHANNEL 2D TRANSISTORS 4

M. B. Стрїха, М. Д. Гурєєв
АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ НАПРУГИ ПЕРЕМІКАННЯ І КОЕФІЦІЄНТА ПІДСИЛЕННЯ CMOS ІНВЕРТОРА З НАНОКАНАЛЬНИМИ 2D ТРАНЗИСТОРАМИ

R. Ya. Leshko, H. Ya. Bandura, I. V. Bilynskyi, Ya. Yu. Melnyk, M. V. Kvyk
THE INTERSUBBAND OPTICAL ABSORPTION COEFFICIENT OF THE QD WITH ACCEPTOR IMPURITY UNDER APPLIED ELECTRIC FIELD 14

P. Ya. Leshko, G. Ya. Bandura, I. V. Bilinskyi, Ya. Yu. Melnyk, M. V. Kvyk
КОЕФІЦІЄНТ МІЖПІДЗОННОГО ОПТИЧНОГО ПОГЛИНАННЯ КВАНТОВОЇ ТОЧКИ З АКЦЕПТОРНОЮ ДОМІШКОЮ В ПРИКЛАДНОМУ ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ

Хімічні сенсори Chemical sensors

O.M. Kostiukevych, V.A. Skryshevsky
CHEMICAL SENSORS WITH MEMRISTIVE PROPERTIES: REVIEW .25

O. M. Костюкевич, В. А. Скришевський
ХІМІЧНІ СЕНСОРИ ІЗ МЕМРІСТИВНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ (ОГЛЯД)

Технологія виробництва сенсорів Sensors production technologies

Ya. I. Lepikh, I. K. Doycho, A. P. Balaban
FORMATION OF OHMIC CONTACT IN MICROELECTRONIC DEVICES WITH POROUS SURFACE SUBSTRATES 46

Я. І. Леніх, І. К. Дойчо, А. П. Балабан
ФОРМУВАННЯ ОМІЧНОГО КОНТАКТУ В МІКРОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЯХ З ПІДКЛАДКАМИ ЗІ ШПАРИСТОЮ ПОВЕРХНЕЮ

**Пам'яті Івана Васильовича
Блонського 51**

**Інформація для авторів.
Вимоги до оформлення статей у журнал 55**

**Information for authors.
Paper preparation requirements 58**

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

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

PACS numbers: 71.15.Mb, 71.20.-b, 73.22.Pr, 73.23.Ad, 84.32.Ff, 85.35.-p
DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.4.318865>

АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ НАПРУГИ ПЕРЕМИКАННЯ І КОЕФІЦІЄНТА ПІДСИЛЕННЯ CMOS ІНВЕРТОРА З НАНОКАНАЛЬНИМИ 2D ТРАНЗИСТОРАМИ

М. В. Стріха^{1,2}, М. Д. Гурєєв¹

¹Київський національний університет ім. Тараса Шевченка,
факультет радіофізики, електроніки і комп'ютерних систем,
пр. Академіка Глушкова, 4г, Київ, Україна, тел. (044) 526 0532;

²Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України,
пр. Науки, 41, Київ, Україна, тел. (044) 525 6033,
E-mail: maksym_strikha@hotmail.com

АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ НАПРУГИ ПЕРЕМИКАННЯ І КОЕФІЦІЄНТА ПІДСИЛЕННЯ CMOS ІНВЕРТОРА З НАНОКАНАЛЬНИМИ 2D ТРАНЗИСТОРАМИ

М. В. Стріха, М. Д. Гурєєв

Анотація. В роботі побудовано аналітичну модель для напруги перемикання і коефіцієнта підсилення CMOS інвертора з наноканальними 2D транзисторами. Одержані вирази дозволяють змоделювати значення цих двох основних параметрів пристрою, що є базою для логічних елементів сучасної нонелектроніки. Підтверджено можливість створення ефективних інверторів з великим коефіцієнтом підсилення на основі транзисторів з каналами з 2D моношарів дихалькогенідів перехідних металів та з наборів вуглецевих нанотрубок. Показано, що фактором, який обмежує коефіцієнт підсилення, є небажаний у транзисторах ефект зниження каналного бар'єру за рахунок стоку (за прямування цього ефекту до нуля коефіцієнт підсилення прямує до нескінченності).

Ключові слова: CMOS інвертор, 2D наноканальний транзистор, коефіцієнт підсилення, дихалькогеніди, вуглецеві нанотрубки

ANALYTICAL MODEL FOR THE SWITCHING VOLTAGE AND GAIN COEFFICIENT OF A CMOS INVERTER WITH NANOCHANNEL 2D TRANSISTORS

M. V. Strikha, M. D. Hurieiev

Abstract. The study presents an analytical model for the switching voltage and gain factor of a CMOS inverter with 2D nanochannel transistors. The derived expressions enable the modeling of these two fundamental parameters of the device, which serves as the basement for logic elements in contemporary nanoelectronics. The feasibility of creating efficient inverters with a high gain factor based on transistors with channels made of 2D monolayers of transition metal dichalcogenides and arrays of carbon nanotubes has been confirmed. It was demonstrated that the gain factor is restricted by the drain induced barrier lowering (DIBL) effect, which is undesirable for FETs (when DIBL trends to zero the gain factor becomes infinitely large).

Keywords: CMOS inverter, 2D nanochannel transistor, gain factor, dichalcogenides, carbon nanotubes

CMOS (комплементарний, базований на поєднанні двох польових транзисторів метал-оксид-напівпровідник *p*- та *n*-типу) інвертор є основою для логічних елементів сучасної нанoeлектроніки завдяки надійності та низькому енергоспоживанню (див. напр. [1]). За цими показниками він суттєво переважає інші типи інверторів (напр. інвертори з опором). Проте виклики, пов'язані з переходом до ультракоротких каналів (10 нм і менше) у кремнії, змушують шукати нові 2D напівпровідникові матеріали [2–4]. Серед них сьогодні чільне місце за дослідницьким інтересом посідають дихалькогеніди перехідних металів (ДПМ, загальна формула MX_2 , де *M*-метал і *X*-халькоген) [4]. Ці структури поєднують граничну тонкість графену з властивостями напівпровідника (сам графен є напівметалом, або безщілинним напівпровідником, і через те на ньому так і не було створено робочого польового транзистора для логічних пристроїв, оскільки симетрична ВАХ графенового каналу ускладнює створення чітко розрізнених станів ON та OFF [5]).

Моношари ДПМ MoS_2 , WS_2 , $MoSe_2$, WSe_2 , $MoTe_2$ є напівпровідниками із прямою забороненою зоною, в яких перехід електрона із зони провідності до валентної зони не супроводжується зміною імпульсу. Тому ДПМ відмінно підходять для створення транзисторів в електроніці та випромінювачів і датчиків в оптиці. Перевагою ДПМ є те, що вони легко інтегруються з металевими нанострічками, вуг-

лецевими нанотрубками (ВНТ) та графеновими каналами [4]. Така інтеграція дозволяє подолати технологічні обмеження, що накладаються процесами літографії, й перейти в область ультракороткоканальних пристроїв.

Однак суттєвою проблемою для створення таких пристроїв є те, що більшість моношарів ДПМ і, насамперед, MoS_2 , реалізуються тільки як матеріали *n*-типу. Відсутність функціонального транзистора *p*-типу певний час обмежувала їх застосування в комплементарній металооксидній напівпровідниковій електроніці. Тому в [6] було створено інвертор з коефіцієнтом підсилення 1,3, в якому *n*-MOSFET було реалізовано з каналом MoS_2 , а *p*-MOSFET – з каналом на наборі ВНТ відповідної хіральності, що виявляють напівпровідникову діркову провідність.

Однак уже в [7] було повідомлено про створення комплементарного інвертора, який базується на MoS_2 транзисторі *n*-типу і WSe_2 транзисторі *p*-типу. Переваги, надані технологією CMOS і високопровідними каналами ДПМ (при розташуванні на підкладці з високою діелектричною проникністю, де розсіяння носіїв у каналі на іонізованих домішках у підкладці суттєво пригнічено, можна досягнути значень рухливості 200–250 cm^2/Vs), дозволили виготовити на одній підкладці комплементарний інвертор з високим коефіцієнтом підсилення 13,7. Чисельно характеристики такого транзистора було змодельовано в [8].

Проте універсальної моделі для інвертора, який інтегрує n -MOSFET з каналом MoS_2 , та p -MOSFET – з каналом на ВНТ чи на дірковому WSe_2 , досі запропоновано не було. У цій роботі ми пропонуємо просту універсальну модель для такого CMOS інвертора, базовану на новітній моделі транспорту в короткоканальних транзисторах [9], що працюють у квазібалістичному/ балістичному режимі провідності, що дозволяє отримати залежності напруги перемикавання та коефіцієнти підсилення як функції параметрів системи.

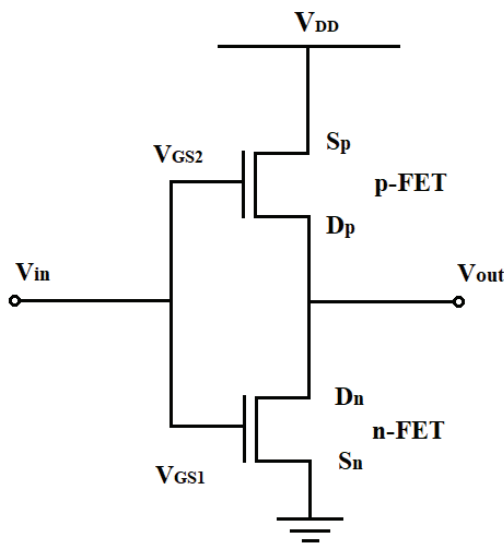


Рис. 1. Схема статичного CMOS інвертора.

На рис. 1 зображено стандартну схему статичного CMOS інвертора. Звернімо увагу, що витік n -FET приєднано до заземленого терміналу, а витік p -FET – до терміналу живлення. Опір кожного з транзисторів, зображених на цій схемі, в режимі OFF при напрузі на затворі, нижчій від порогової $|V_{GS}^{(n,p)}| < |V_T^{(n,p)}|$, нескінченно великий, а в режимі ON, при напрузі на затворі, вищій від порогової $|V_{GS}^{(n,p)}| > |V_T^{(n,p)}|$ – скінченний. Тому, коли вхідна напруга V_{in} висока, n -FET працює в режимі ON, а p -FET у режимі OFF. Це означає, що вихід електрично відімкнений від напруги живлення V_{DD} , і напруга на ньому $V_{out} = 0$. Навпаки, при низькій вхідній напрузі n -FET працює в режимі OFF, а p -FET у режимі

ON. Це означає, що на вихід подається напруга живлення, і для низького опору p -FET $V_{out} = V_{DD}$.

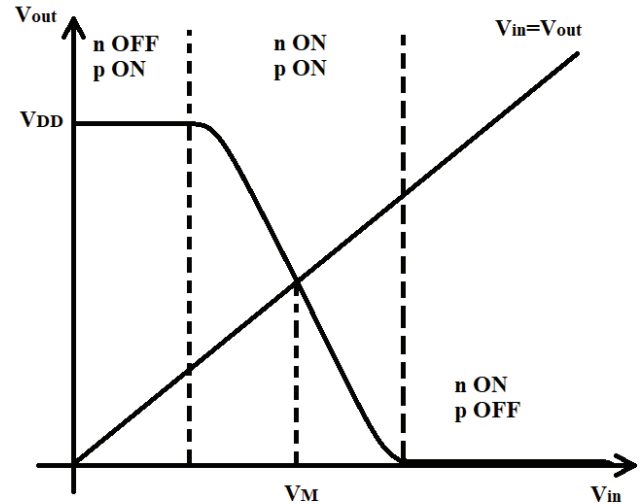


Рис. 2. Характеристика перетворення напруги CMOS інвертора.

Характеристику перетворення напруги CMOS інвертора зображено на рис. 2. Її може бути побудовано зі співвідношень для струмів та напруг на затворах і витоках двох транзисторів:

$$I_{DS}^{(n)} = -I_{DS}^{(p)}, \quad (1)$$

$$V_{GS}^{(n)} = V_{in}, \quad V_{GS}^{(p)} = V_{in} - V_{DD}, \quad (2)$$

$$V_{DS}^{(n)} = V_{out}, \quad V_{DS}^{(p)} = V_{out} - V_{DD}. \quad (3)$$

Напруга перемикавання інвертора V_M визначається з умови

$$V_{in} = V_{out}, \quad (4)$$

а нахил характеристики в перехідній області визначається значенням коефіцієнта підсилення

$$g = \left. \frac{dV_{out}}{dV_{in}} \right|_{V_{in}=V_{out}=V_M}. \quad (5)$$

Чим більшим є значення g , тим швидше відбувається перемикавання інвертора з логічного стану 0 в 1 і навпаки. До того ж, вузька перехідна область забезпечує вищу стійкість інвертора до шумів.

Звернемо увагу, що в області малих входних напруг, де $V_{out} = V_{DD}$ і n -FET перебуває в режимі OFF, p -FET пропускає відносно невеликий струм і працює в лінійній області [9, 10]. В області напруги перемикавання V_M у перехідній області струми через обидва транзистори великі, й вони працюють у режимі насичення струму. Нарешті, в області великих напруг, де $V_{out} = 0$ і вже p -FET перебуває в режимі OFF, n -FET пропускає відносно невеликий струм і працює в лінійній області (див. рис. 2).

Далі нашою метою є знайти аналітичні вирази для базових характеристик інвертора на нанотранзисторах – напруги перемикавання (4) і коефіцієнта підсилення (5).

Для цього запишемо вирази для струмів на стоках n -FET і p -FET, що входять до виразу (1), у режимі насичення [9, 11]:

$$I_{DS}^{(n)} = W^{(n)} C_{ox}^{(n)} (V_{GS}^{(n)} - V_T^{(n)} + \delta^{(n)} V_{DS}^{(n)}) v_T^{(n)} \left(\frac{T^{(n)}}{2 - T^{(n)}} \right). \quad (6)$$

Тут $W^{(n)}$ – ширина каналу провідності n -FET, $C_{ox}^{(n)}$ – віднесена до одиниці площі ємність підзатворного оксиду цього каналу, $V_T^{(n)}$ – порогова напруга n -FET, при якій він перемикається зі стану OFF у стан ON, $\delta^{(n)}$ – коефіцієнт ефекту DIBL (індукованого стоком зниження бар'єру), який призводить до того, що і в області насичення струм стоку не залишається цілком сталим, а повільно зростає зі збільшенням напруги на стоку;

$$v_T^{(n)} = \sqrt{\frac{2kT}{\pi m^{(n)}}} \quad (7)$$

усереднена за кутами теплова швидкість інжекції невідроджених електронів з ефективною масою $m^{(n)}$ у канал n -FET у точці віртуального витоку, яка виконує для транзисторів нанорозмірів (де розсіяння носіїв у наноканалі невелике, або й відсутнє) функцію швидкості насичення [9, 11]. Звернімо увагу на те, що вираз (6) записано для статистики Максвела-Больцмана невідроджених носіїв. Нарешті, в (6)

$$T^{(n)} = \frac{\lambda^{(n)}}{\lambda^{(n)} + L^{(n)}} \quad (8)$$

коефіцієнт проходження каналу, який описує ймовірність того, що інжектований у точці віртуального витоку в канал електрон дійде до стоку, а не повернеться внаслідок розсіювання назад на витік. У дифузійному режимі цей коефіцієнт малий, а в квазібалістичному – наближається до одиниці. У (8) $\lambda^{(n)}$ – довжина вільного пробігу електронів у каналі щодо розсіювання назад, $L^{(n)}$ – довжина каналу n -FET. Останній співмножник у круглих дужках у (6) є наслідком того, що заряд у точці віртуального витоку формується за рахунок трьох потоків електронів: з боку витоку, з боку стоку, і з боку витоку, але розсіяних під час проходження каналу назад у бік витоку (аналіз виведення цього множника див. у [9, 11]).

Вираз для струму на стоку p -FET можна записати аналогічно до (6), з урахуванням зміни полярності носіїв заряду:

$$I_{DS}^{(p)} = W^{(p)} C_{ox}^{(p)} (V_T^{(p)} - \delta^{(p)} V_{DS}^{(p)} - V_{GS}^{(p)}) v_T^{(p)} \left(\frac{T^{(p)}}{2 - T^{(p)}} \right). \quad (9)$$

Усі позначення в (9) аналогічні до наведених вище позначень у (6). Зазначимо, що вираз (9) застосовний як для p -FET з каналами на основі моношарів ДПМ, типу реалізованих у [7] з використанням моношару діркового WSe_2 , так і (з певними застереженнями) для щільного набору покладених паралельно ВТН з дірковою провідністю, які було використано для створення інвертора в [6].

Напругу перемикавання інвертора можна знайти, спершу підставивши до виразів (6), (9) вирази (2), (3), а потім підставивши результати до (1) і врахувавши (4). При цьому ми нехтуємо малими доданками з добутками $\delta^{(n)} V_{DS}^{(n)}$ та $\delta^{(p)} V_{DS}^{(p)}$, обумовленими ефектом DIBL.

Як наслідок отримуємо:

$$V_M = \frac{W^{(n)} C_{ox}^{(n)} V_T^{(n)} v_T^{(n)} \left(\frac{T^{(n)}}{2 - T^{(n)}} \right) + W^{(p)} C_{ox}^{(p)} (V_T^{(p)} + V_{DD}) v_T^{(p)} \left(\frac{T^{(p)}}{2 - T^{(p)}} \right)}{W^{(n)} C_{ox}^{(n)} v_T^{(n)} \left(\frac{T^{(n)}}{2 - T^{(n)}} \right) + W^{(p)} C_{ox}^{(p)} v_T^{(p)} \left(\frac{T^{(p)}}{2 - T^{(p)}} \right)}. \quad (10)$$

Надалі зробимо мотивоване припущення, що $C_{ox}^{(n)} = C_{ox}^{(p)}$ (підкладка під обома транзисторами є спільною і однорідною) і вважатимемо,

що напруга живлення значно перевищує порогові напруги, $V_{DD} \gg V_T^{(n)}, V_T^{(p)}$. Це дозволяє суттєво спростити й унаочнити вираз (10):

$$V_M = \frac{V_{DD}}{1 + K}; \quad K = \frac{W^{(n)} v_T^{(n)} \left(\frac{T^{(n)}}{2 - T^{(n)}} \right)}{W^{(p)} v_T^{(p)} \left(\frac{T^{(p)}}{2 - T^{(p)}} \right)} = \frac{W^{(n)}}{W^{(p)}} \sqrt{\frac{m^{(p)}}{m^{(n)}}} \frac{T^{(n)} (2 - T^{(p)})}{T^{(p)} (2 - T^{(n)})}. \quad (11)$$

Якщо провідність в обох транзисторах має квазібалістичний характер, і коефіцієнти проходження (8) близькі до одиниці, маємо

$$K = \frac{W^{(n)}}{W^{(p)}} \sqrt{\frac{m^{(p)}}{m^{(n)}}}. \quad (12)$$

Натомість коли режим проходження суто дифузійний, і коефіцієнти (8) значно менші від одиниці, маємо:

$$K = \frac{W^{(n)}}{W^{(p)}} \sqrt{\frac{m^{(p)}}{m^{(n)}}} \frac{T^{(n)}}{T^{(p)}} = \frac{W^{(n)} L^{(p)}}{W^{(p)} L^{(n)}} \sqrt{\frac{m^{(p)}}{m^{(n)}}} \frac{\lambda^{(n)}}{\lambda^{(p)}}. \quad (13)$$

Співвідношення (11–13) дозволяють, варіюючи параметри каналів обох транзисторів (насамперед – їх ширину і товщину) отримувати бажане співвідношення напруги перемикачів до напруги живлення інвертора. Оскільки

оптимальним є значення $V_M = V_{DD}/2$, у балістичному випадку зазвичай більшу ефективну масу носіїв у p -FET можна скомпенсувати більшою шириною каналу цього транзистора з метою одержання $K = 1$. У дифузійному випадку додаткову різницю довжин вільного пробігу можна скомпенсувати різними довжинами відповідних каналів.

Коефіцієнт підсилення знайдемо з виразу (5). Для цього продиференціюємо співвідношення (1), до якого підставлено (6), (9), з урахуванням (2), (3). При цьому ми вже не можемо знехтувати в (6), (9) малими доданками з добутками $\delta^{(n)} V_{DS}^{(n)}$ та $\delta^{(p)} V_{DS}^{(p)}$, обумовленими ефектом DIBL, оскільки інакше отримаємо нескінченно великий коефіцієнт підсилення (вертикальну сходинку в характеристиці перетворення напруги на рис. 2). Як наслідок одержуємо:

$$g = - \frac{W^{(n)} C_{ox}^{(n)} v_T^{(n)} \left(\frac{T^{(n)}}{2 - T^{(n)}} \right) + W^{(p)} C_{ox}^{(p)} v_T^{(p)} \left(\frac{T^{(p)}}{2 - T^{(p)}} \right)}{W^{(n)} C_{ox}^{(n)} v_T^{(n)} \left(\frac{T^{(n)}}{2 - T^{(n)}} \right) \delta^{(n)} + W^{(p)} C_{ox}^{(p)} v_T^{(p)} \left(\frac{T^{(p)}}{2 - T^{(p)}} \right) \delta^{(p)}}. \quad (14)$$

Знак «мінус» у (14) відповідає негативному нахилу кривої на рис. 2. За умови

$C_{ox}^{(n)} = C_{ox}^{(p)}$ вираз (14) спрощується:

$$g = - \frac{1 + K}{\delta^{(n)} K + \delta^{(p)}}. \quad (15)$$

Оскільки коефіцієнти ефекту DIBL у ефективно сконструйованих транзисторах є малими, порядку кількох одиниць на 10^{-2} [9, 10] (контроль за висотою бар'єру в каналі має здійснюватися напругою на затворі; вплив з боку напруги стоку є небажаним, бо призводить до

зростання підпорогового розкиду [12] і погіршує функціональність транзистора), то за значень K , що визначаються виразами (9) – (11), вираз (15) призводить до високих значень коефіцієнту підсилення.

Як видно з вигляду (15), за умови $\delta^{(n)} = \delta^{(p)}$ коефіцієнт підсилення g взагалі не залежить від параметру K (криві 1–3 рис. 3). За умови $\delta^{(n)} < \delta^{(p)}$ модуль коефіцієнта підсилення g при зростанні K збільшується (криві 4, 6 рис. 3), а за умови $\delta^{(n)} > \delta^{(p)}$ – зменшується (криві 5, 7 рис. 3). Як впливає з рис. 3, добір параметрів каналів дозволяє одержати коефіцієнти підсилення, в рази більші за значення, одержані в роботі [7], і вищі, аніж стандартні величини для кремнієвих інверторів (25–30).

В нашій роботі побудовано аналітичну модель, на основі якої одержано вирази для напруги перемикачання і коефіцієнта підсилення CMOS інвертора з наноканальними 2D транзисторами. Одержані вирази дозволяють змоделювати значення цих двох основних параметрів пристрою, що є базою для логічних елементів сучасної нанонелектроніки.

Підтверджено можливість створення ефективних інверторів з великим коефіцієнтом підсилення на основі транзисторів з каналами з 2D моношарів дихалькогенідів перехідних металів та з наборів вуглецевих нанотрубок. Показано, що фактором, який обмежує коефіцієнт підсилення, є небажаний у транзисторах ефект DIBL (за прямування цього ефекту до нуля коефіцієнт підсилення прямує до нескінченності). Але слід пам'ятати, що в короткоканальних транзисторах, де досягнути цілковитого геометричного електростатичного екранування складно, і вплив зміни потенціалу стоку досягає точки віртуального витоку, ефект DIBL обмежити теж непросто [9].

Звернімо увагу, що одержані нами вирази для напруги перемикачання й коефіцієнта підсилення (10), (11) відрізняються за виглядом від тих, що наводяться в стандартних підручниках (див. напр. [13]). Це обумовлено тим, що замість виразів (6), (9) для струмів насичення в короткоканальних нанотранзисторах автори університетських курсів досі використовують вирази для струмів у довгоканальних транзисто-

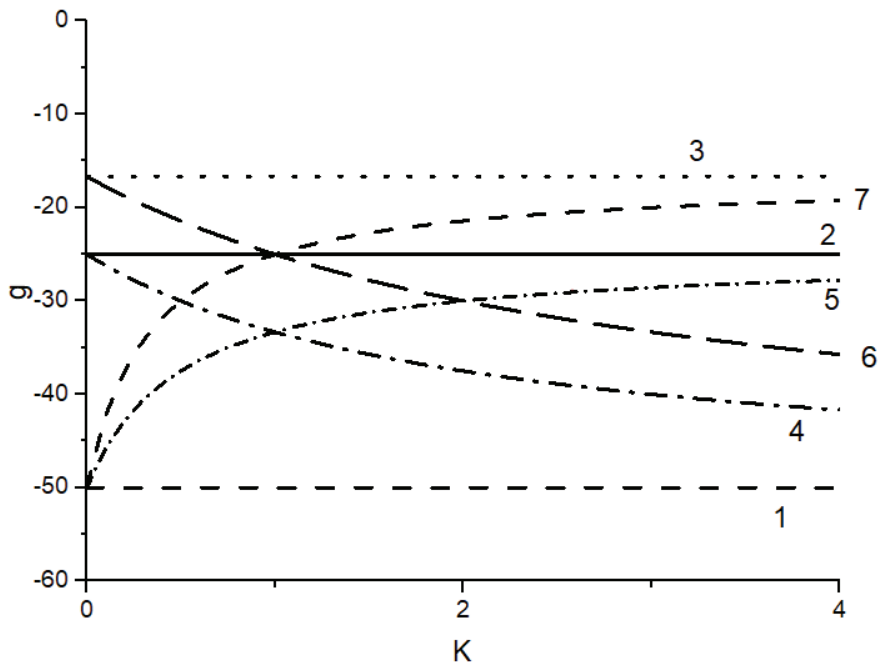


Рис. 3. Коефіцієнт підсилення (15) як функція K (крива 1 – $\delta^{(n)} = \delta^{(p)} = 0,02$; 2 – $\delta^{(n)} = \delta^{(p)} = 0,04$; 3 – $\delta^{(n)} = \delta^{(p)} = 0,06$; 4 – $\delta^{(n)} = 0,02, \delta^{(p)} = 0,04$; 5 – $\delta^{(n)} = 0,04, \delta^{(p)} = 0,02$; 6 – $\delta^{(n)} = 0,02, \delta^{(p)} = 0,06$; 7 – $\delta^{(n)} = 0,06, \delta^{(p)} = 0,02$).

рах, де насичення обумовлене «перетисканням» (pinch-off) каналу областями виснаження. Такі вирази передбачають квадратичну залежність струму насичення від напруги на затворі, на той час як реальні експериментальні залежності цих струмів від напруги на затворі – лінійні (див. [9, 14]), як це й передбачано виразами (6), (9).

Звернімо також увагу на те, що вирази (10), (11) одержано нами для статистики Максвелла-Больцмана для невивіржених носіїв, що слід вважати добрим наближенням для стандартних режимів роботи CMOS інверторів.

Список використаної літератури

- [1]. Woorham Bae. CMOS Inverter as Analog Circuit: An Overview. *J. Low Power Electron. Appl.* **9**, 26 (2019); doi:10.3390/jlpea9030026
- [2]. Filip A. Rasmussen and Kristian S. Thygesen. Computational 2D Materials Database: Electronic Structure of Transition-Metal Dichalcogenides and Oxides. *J. Phys. Chem. C* **119**, 13169–13183 (2015).
- [3]. Keshari Nandan, Amit Agarwal, Somnath Bhowmick and Yogesh S. Chauhan. Two-dimensional semiconductors based field-effect transistors: review of major milestones and challenges. *Frontiers in Electronics* (2023); doi: 10.3389/felec.2023.1277927
- [4]. M. V. Strikha, K. O. Korzh. Fundamentalni mezhi dovzhyn kanaliv providnosti polovykh tranzystoriv na monosharakh dykhalkohenidiv perekhidnykh metaliv. *Sens. elektron. mikrosist. tehnol.* **19**, No.1/2, 4–18 (2022). (in Ukrainian).
- [5]. Yu. O. Kruglyak, M. V. Strikha. Uzahalnena model Landauera-Datta-Lundstroma v zastosuvanni do transportnykh yavlyshch u hrafeni. *Ukrainskyi fizychnyi zhurnal. Ohliady.* **10**, 3–32 (2015) (in Ukrainian).
- [6]. Jun Huang, Sivasubramanian Somu and Ahmed Busnaina. A molybdenum disulfide/carbon nanotube heterogeneous complementary inverter. *Nanotechnology* **23**, 335203 (2012); doi:10.1088/0957-4484/23/33/335203
- [7]. Ah-Jin Cho, Kee Chan Park & Jang-Yeon Kwon. A high-performance complementary inverter based on transition metal dichalcogenide field-effect transistors. *Nanoscale Research Letters*, **10**, 115 (2015).
- [8]. F. F. Mao, Z. Jin, L. Y. Shang, Z. G. Hu, and J. H. Chu. Static characteristics of CMOS digital circuit based on transition metal dichalcogenide transistors. *AIP Advances* **9**, 085031 (2019); doi: 10.1063/1.5112078
- [9]. M. Lundstrom, *Fundamentals of Nanotransistors* (Singapore: World Scientific: 2018); www.nanohub.org/courses/NT
- [10]. Yu. O. Kruglyak, M. V. Strikha. Fyzyka nanotranzystoriv: ustrii, metryka ta keruvannia. *Sens. elektron. mikrosist. tehnol.* **15**, No.4, 18–40 (2018) (in Ukrainian).
- [11]. Yu. O. Kruglyak, M. V. Strikha. Fyzyka nanotranzystoriv: rozsiannia elektroniv i model prokhozhenia MOSFET. *Sens. elektron. mikrosist. tehnol.* **17**, No. 2, 16–34 (2020) (in Ukrainian).
- [12]. M. V. Strikha, K. O. Korzh. Analytical model for a subthreshold swing in a mosfet with a source based on cold metal. *Sens. elektron. mikrosist. tehnol.* **20**, No. 3, 30–37 (2023) (in Ukrainian).
- [13]. CMOS inverter: DC analysis: <https://www.egr.msu.edu/classes/ece410/mason/files/Ch7.pdf>; CMOS inverter: https://bjpcjp.github.io/pdfs/cmos_layout_sim/ch11-inverter.pdf etc.
- [14]. Yu. O. Kruglyak, M. V. Strikha. Physics of nanotransistors: mosfet theory in traditional approach, zero level virtual source model, and depletion approximation. *Sens. elektron. mikrosist. tehnol.* **16**, No.1, 24–49 (2019) (in Ukrainian).

Стаття надійшла до редакції 20.10.2024 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/10.18524/1815-7459.2024.4.318865>

ANALYTICAL MODEL FOR THE SWITCHING VOLTAGE AND GAIN COEFFICIENT OF A CMOS INVERTER WITH NANOCHANNEL 2D TRANSISTORS

M. V. Strikha^{1,2}, M. D. Hurieiev¹

¹ Taras Shevchenko National University of Kyiv, Faculty of Radiophysics, Electronics and Computer Systems,

4g Akademika Hlushkova Av, Kyiv, Ukraine, Phone: (044) 526 0532

² V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine,

41 Nauky Avenue, Kyiv, Ukraine, Phone: (044) 525 6033

E-mail: maksym_strikha@hotmail.com

Summary

The CMOS inverter is a basic building block for logic elements of modern nanotechnology due to its reliability and low power consumption. However, the challenges associated with the transition to ultrashort channels (10 nm or less) in silicon are forcing the search for new 2D semiconductor materials, among which transition metal dichalcogenides (TMDs) are currently of great research interest. These structures combine the extreme thinness of graphene with the properties of a semiconductor. The advantage of DPMs is that they can be easily integrated with metal nanoribbons, carbon nanotubes (CNTs), and graphene channels. This integration allows us to overcome the technological limitations imposed by lithography processes and move into the field of ultrashort-channel devices.

In this paper, we propose a simple universal model for a CMOS inverter based on the latest model of transport in short-channel transistors [M. Lundstrom, *Fundamentals of Nanotransistors* (Singapore: World Scientific: 2018); www.nanohub.org/courses/NT], operating in the quasi-ballistic/ballistic conduction mode, which allows us to obtain switching voltage dependencies and gains as a function of system parameters.

In particular, the inverter switching voltage V_M for the quasi-ballistic mode of transistor operation is related to its supply voltage V_{DD} by a ratio:

$$V_M = \frac{V_{DD}}{1+K}; \quad K = \frac{W^{(n)}}{W^{(p)}} \sqrt{\frac{m^{(p)}}{m^{(n)}}},$$

where $W^{(n,p)}$ – are the channel widths of the n - and p -transistors, $m^{(n,p)}$ - are the effective masses of carriers in these channels. Since the optimum value is $V_M = V_{DD}/2$, in the ballistic case, usually the higher effective mass of carriers in the p-FET can be compensated by the larger channel width of this transistor to obtain $K = 1$.

The following expression is obtained for the gain

$$g = -\frac{1+K}{\delta^{(n)}K + \delta^{(p)}}.$$

Since the coefficients $\delta^{(n,p)}$ of the DIBL effect (drain-induced barrier lowering) for efficiently designed transistors are small, on the order of a few units per 10^{-2} , so this expression leads to high values of the gain. Thus, the possibility of creating efficient inverters with a high gain based on transistors with channels made of 2D monolayers of transition metal dichalcogenides and carbon nanotube sets has been confirmed. It was demonstrated that the gain factor is restricted by the DIBL effect, which is undesirable for FETs (when DIBL trends to zero the gain factor becomes infinitely large).

Keywords: CMOS inverter, 2D nanochannel transistor, gain factor, dichalcogenides, carbon nanotubes

PACS numbers: 71.15.Mb, 71.20.-b, 73.22.Pr, 73.23.Ad, 84.32.Ff, 85.35.-p
 DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.4.318865>

АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ НАПРУГИ ПЕРЕМИКАННЯ І КОЕФІЦІЄНТА ПІДСИЛЕННЯ CMOS ІНВЕРТОРА З НАНОКАНАЛЬНИМИ 2D ТРАНЗИСТОРАМИ

М. В. Стріха^{1,2}, М. Д. Гурєєв¹

¹ Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, факультет радіофізики, електроніки і комп'ютерних систем, пр. Академіка Глушкова, 4г, Київ, Україна, тел. (044) 526 0532;

² 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

CMOS інвертор є основою для логічних елементів сучасної нанонелектроніки завдяки надійності та низькому енергоспоживанню. Проте виклики, пов'язані з переходом до ультракоротких каналів (10 нм і менше) у кремнії, змушують шукати нові 2D напівпровідникові матеріали, серед яких сьогодні чільне місце за дослідницьким інтересом посідають дихалькогеніди перехідних металів (ДПМ). Ці структури поєднують граничну тонкість графену з властивостями напівпровідника. Перевагою ДПМ є те, що вони легко інтегруються з металевими нанострічками, вуглецевими нанотрубками (ВНТ) та графеновими каналами. Така інтеграція дозволяє подолати технологічні обмеження, що накладаються процесами літографії, й перейти в область ультракороткоканальних пристроїв.

У цій роботі ми пропонуємо просту універсальну модель для CMOS інвертора, базовану на новітній моделі транспорту в короткоканальних транзисторах [M. Lundstrom, *Fundamentals of Nanotransistors* (Singapore: World Scientific: 2018); www.nanohub.org/courses/NT], що працюють у квазібалістичному/балістичному режимі провідності, що дозволяє отримати залежності напруги перемикавання та коефіцієнти підсилення як функції параметрів системи.

Зокрема, напруга перемикавання інвертора V_M для квазібалістичного режиму роботи транзисторів пов'язана з його напругою живлення V_{DD} співвідношенням:

$$V_M = \frac{V_{DD}}{1+K}; \quad K = \frac{W^{(n)}}{W^{(p)}} \sqrt{\frac{m^{(p)}}{m^{(n)}}}, \quad (1)$$

де $W^{(n,p)}$ - ширини каналів n - та p -транзисторів, $m^{(n,p)}$ - ефективні маси носіїв у цих каналах. Оскільки оптимальним є значення $V_M = V_{DD}/2$, у балістичному випадку зазвичай більшу ефективну масу носіїв у p -FET можна компенсувати більшою шириною каналу цього транзистора з метою одержання $K = 1$.

Для коефіцієнта підсилення одержано вираз

$$g = -\frac{1+K}{\delta^{(n)}K + \delta^{(p)}}.$$

Оскільки коефіцієнти $\delta^{(n,p)}$ ефекту DIBL (індукованого стоком зниження каналного бар'єру) для ефективно сконструйованих транзисторах є малими, порядку кількох одиниць на 10^{-2} , то цей вираз призводить до високих значень коефіцієнту підсилення. Таким чином, під-

тверджено можливість створення ефективних інверторів з великим коефіцієнтом підсилення на основі транзисторів з каналами з 2D моношарів дихалькогенідів перехідних металів та з наборів вуглецевих нанотрубок. Показано, що фактором, який обмежує коефіцієнт підсилення, є небажаний у транзисторах ефект DIBL (за прямування цього ефекту до нуля коефіцієнт підсилення прямує до нескінченності).

Ключові слова: CMOS інвертор, 2D наноканальний транзистор, коефіцієнт підсилення, дихалькогеніди, вуглецеві нанотрубки

UDC: 539.1

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.4.315282>

THE INTERSUBBAND OPTICAL ABSORPTION COEFFICIENT OF THE QD WITH ACCEPTOR IMPURITY UNDER APPLIED ELECTRIC FIELD

R. Ya. Leshko¹, H. Ya. Bandura¹, I. V. Bilynskiy², Ya. Yu. Melnyk², M. V. Kvyk²

¹ Physics Department, Drohobych Ivan Franko State Pedagogical University, 3 Stryiska St, 82100 Drohobych, Ukraine, galinka.bandura@gmail.com

² Physics Department, Kryvyi Rih State Pedagogical University, 54 Gagarina Av, 50086 Kryvyi Rih, Ukraine

THE INTERSUBBAND OPTICAL ABSORPTION COEFFICIENT OF THE QD WITH ACCEPTOR IMPURITY UNDER APPLIED ELECTRIC FIELD

R. Ya. Leshko, H. Ya. Bandura, I. V. Bilynskiy, Ya. Yu. Melnyk, M. V. Kvyk

Abstract. In this work, a spherical quantum dot (QD) under the influence of an external electric field is investigated. A multi-band model of the valence band is applied. The influence of off-center acceptor impurity, electric field and QD size dispersion on the absorption coefficient during intersubband transitions between hole states has been analyzed. The results show that an electric field combined with an off-center impurity induces the appearance of two distinct absorption bands corresponding to different magnetic quantum numbers. The intensity of absorption bands depends on the direction and strength of the electric field, and significant differences are observed between fields of opposite polarity. It is important to note that there is a critical field strength that restores the degeneracy of the energy levels, narrowing the broadband absorption tail for systems with small or large dispersion sizes. This research aims to improve the understanding and optimization of the optical properties of nanomaterials.

Keywords: acceptor impurity, electric field, hole energy spectrum, multiband hole model, level splitting

КОЕФІЦІЄНТ МІЖПІДЗОННОГО ОПТИЧНОГО ПОГЛИНАННЯ КВАНТОВОЇ ТОЧКИ З АКЦЕПТОРНОЮ ДОМІШКОЮ В ПРИКЛАДНОМУ ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ

Р. Я. Лешко, Г. Я. Бандура, І. В. Білинський, Я. Ю. Мельник, М. В. Квик

Анотація. У роботі досліджено сферичну квантову точку (КТ) під впливом зовнішнього електричного поля. Застосовано багатозонну модель валентної зони. Проаналізовано вплив нецентральної акцепторної домішки, електричного поля та дисперсії розміру КТ на коефіцієнт поглинання при міжпідзонних переходах між дірковими станами. Результати показують, що електричне поле в поєднанні з нецентральною домішкою викликає появу двох чітких смуг поглинання, що відповідають різним магнітним квантовим числам. Інтенсивність смуг поглинання залежить від напрямку і напруженості електричного поля, причому значні відмінності

спостерігаються між полями протилежної полярності. Важливо відзначити, що існує критична напруженість поля, яка відновлює виродження енергетичних рівнів, звужуючи широкосмуговий хвіст поглинання для систем з малими або великими розмірами дисперсії. Це дослідження спрямоване на покращення розуміння та оптимізацію оптичних властивостей наноматеріалів.

Ключові слова: акцепторна домішка, електричне поле, енергетичний спектр дірок, багатозонна діркова модель, розщеплення рівнів

Introduction

The modern nanotechnologies make it possible to create various nanostructures with predefined properties. Among them, quantum dots (QDs) attract the most attention. These studies are of interest to both theorists and experimentalists because they have unique optical properties [1–3]. Various factors influence the optical properties of QDs, including the shape of the QDs, the material of the QDs and their surrounding environment, and the presence of impurities, both donor and acceptor types. The application of an electric field causes a shift of the energy levels of the QDs, which can be experimentally observed and used in the development of optoelectronic devices. This requires more detailed theoretical research.

Currently, many theoretical works are devoted to the calculation of linear and nonlinear optical properties of optoelectronic devices. This serves as a theoretical basis for the manufacture of devices with predetermined optical properties [4–6].

Most of the authors in their works investigate donor impurities. They are placed in the centers of QDs [7–9]. This allows to use a singleband model and simplify theoretical calculations. Similar studies were carried out for multilayer quantum dots in an electric field [10, 11]. It is shown that a change in the external field causes a change in the density of the probability of finding electrons in different shells. In the work [12], the energy spectrum, wave functions, and binding energies of an electron with a donor impurity ion located at the center of a multilayer spherical QD consisting of a core and two spherical shells were investigated. It was shown that changing the parameters significantly affects both the energy spectrum and the absorption coefficient. The works [7–16] are shown the

optical properties depend on the position of the donor hydrogen impurity and external fields. It has been demonstrated that shifting the impurity from the center of a spherical quantum dot also causes the splitting of electronic levels (for degenerate states). These impurity shifts cause a shift in the absorption band to the low-energy region [13].

To study hole and acceptor states in spherical quantum dots, more complex multiband models in the effective mass approximation should be used. For example, the Luttinger model [17, 18] in the spherical approximation [19]. The study [20] examined hole and exciton states in an external electric field using the multiband effective mass model. It was demonstrated that the ground hole state in a spherical QD split under the influence of an electric field, a phenomenon not observed in the single-band model where the ground state remains unsplit. In addition, the ground state of the impurity splits when the acceptor impurity is at a distance D from the center of the spherical quantum dot [21]. This splitting significantly influences various properties, particularly the optical characteristics of QDs. Hence, in spherical QDs, both an applied electric field and an off-center acceptor impurity result in the splitting of hole energy levels.

The paper [22] presents a model for calculating the energy levels of holes in a spherical quantum dot with a non-central impurity in an external electric field. A non-central acceptor impurity causes splitting of levels due to the violation of spherical symmetry. However, if the electric field is applied in the direction opposite to the displacement of the impurity from the center, there is such a value of the field at which the splitting of the levels disappears (degenerate, as in the case of a central impurity or its absence). This means that changing the magnitude and direction of the applied electric field can reduce

the level splitting, which will reduce the additional absorption bands and the width of the long-wavelength absorption or luminescence peak.

Measuring the interband absorption coefficient of light allows for a detailed study of the optical properties of quantum dot. The optical characteristics of many devices created based on bulk and nanoscale semiconductors significantly depend on impurities. The aim of our work is to investigate the effect of off-center acceptor impurity, electric field and QD size dispersion on the absorption coefficient in intersubband transitions between hole states. This research is aimed at improving the understanding

and optimization of the optical properties of nanomaterials.

Hole energy spectrum

Let's consider a heterostructure with a spherical semiconductor quantum dot of radius a . We choose structures where the band gap width and spin-orbit interaction are big enough. The heterosystem *GaAs/AlAs* meets these requirements. Therefore, for calculating hole states, we will use a so-called four-zone approximation [17–20], neglecting the corrugation of isoenergetic surfaces in k-space

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{H}} &= \frac{1}{2} \left(\gamma_1 + \frac{5}{2} \gamma \right) \hat{\mathbf{p}}^2 - \gamma \left(\vec{\mathbf{p}} \vec{\mathbf{J}} \right)^2 + U(r) + V_{el}(\vec{r}) + V(\vec{r}, \vec{D}) = \\ &= \hat{\mathbf{H}}^{(0)} + V_{el}(\vec{r}) + V(\vec{r}, \vec{D}),\end{aligned}\quad (1)$$

where $\vec{\mathbf{p}}$ is the momentum operator, $\vec{\mathbf{J}}$ is the spin operator ($j = 3/2$); γ_1, γ are the Luttinger parameters which are connected with the heavy and light hole effective masses

$$m_{hh} = \frac{m_0}{\gamma_1 - 2\gamma}, \quad m_{lh} = \frac{m_0}{\gamma_1 + 2\gamma}. \quad (2)$$

The energy axis in the valence band is directed 'downwards', meaning the valence band maximum transitions to a minimum. The confinement potential for the hole was chosen as a spherical rectangular potential well.

$$U(r) = \begin{cases} 0, & r \leq a, \\ U_0, & r > a. \end{cases} \quad (3)$$

Potential energy of the hole in the external electric field F_{el} has form

$$V_{el}(\vec{r}) = -\vec{d} \cdot \vec{F}_{el} = -e\vec{r} \vec{F}_{el}, \quad (4)$$

where \vec{d} is dipole momentum, e is elementary charge. We consider electric field direction along

z axis. Interaction of a hole with an acceptor impurity ion is expressed by

$$V(\vec{r}, \vec{D}) = -\frac{Ze^2}{\varepsilon |\vec{r} - \vec{D}|} \quad (5)$$

where ε is dielectric permittivity of QD, $Z=1$ or $Z=0$ (if there is no impurity in the QD). We consider cases where the impurity can be located on the z axis and electric field is directed along z axis.

To determine the energy spectrum of a hole, we expressed the hole's wave function ψ as a series expansion in terms of the system of

functions ψ_i^0 that are solutions to the Schrödinger equation with the Hamiltonian $\hat{\mathbf{H}}^{(0)}$ (the Hamiltonian that describes a hole in a QD without impurity and electric field):

$$\psi = \sum_i c_i \psi_i^0. \quad (6)$$

The wave function can be expressed as a product of the eigenfunctions of the total momentum $\vec{\mathbf{F}} = \vec{\mathbf{L}} + \vec{\mathbf{J}}$ and the radial functions [23, 24]:

$$\psi_{f,M}^{(0)}(r, \theta, \varphi) = \sqrt{2f+1} \sum_{l=f-j}^{f+j} (-1)^{l-j+M} R_l^f(r) \sum_{m_l} \sum_{m_j} \begin{pmatrix} l & j & f \\ m_l & m_j & -M \end{pmatrix} Y_l^{m_l}(\theta, \varphi) \chi_{m_j}, \quad (7)$$

where $\hbar^2 f(f+1)$, $\hbar^2 l(l+1)$, $\hbar M$, $\hbar m$, $\hbar m_j$ are the eigenvalues of operators $\hat{\mathbf{F}}^2$, $\hat{\mathbf{L}}^2$, $(\hat{\mathbf{L}}_z + \hat{\mathbf{J}}_z)$, $\hat{\mathbf{L}}_z$, $\hat{\mathbf{J}}_z$ respectively; χ_{m_j} are the spin functions, Y_l^m are the spherical harmonic functions, which are the eigenfunctions of $\hat{\mathbf{L}}^2$, $\begin{pmatrix} l & j & f \\ m_l & m_j & -M \end{pmatrix}$ are the 3-j symbols.

For the convenience of writing formulas, we will further use the atomic sys system of Hartree units ($\hbar = 1$, $m_e = 1$, $e = 1$).

In the case $F_{el} = 0$ and $Z = 0$ we have obtained the radial equation like in [23, 24] for $f \geq 3/2$

$$\frac{1}{2} \gamma_1 \begin{pmatrix} -(1+\mu C_1) \hat{\Delta}_l & \mu C_2 \hat{\mathbf{B}}_{l+1}^- \hat{\mathbf{B}}_{l+2}^- \\ \mu C_2 \hat{\mathbf{B}}_{l+1}^+ \hat{\mathbf{B}}_l^+ & -(1+\mu C_3) \hat{\Delta}_{l+2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_l^f(r) \\ R_{l+2}^f(r) \end{pmatrix} + U(r) \begin{pmatrix} R_l^f(r) \\ R_{l+2}^f(r) \end{pmatrix} = E^{(0)} \begin{pmatrix} R_l^f(r) \\ R_{l+2}^f(r) \end{pmatrix} \quad (8)$$

with coefficients

$$\begin{aligned} C_1 &= C_1(f, l) = \sqrt{5} (-1)^{3/2+l+f} \begin{Bmatrix} l & l & 2 \\ 3/2 & 3/2 & f \end{Bmatrix} \sqrt{\frac{2l(2l+1)(2l+2)}{(2l+3)(2l-1)}} \\ C_2 &= C_2(f, l) = \sqrt{30} (-1)^{3/2+l+f} \begin{Bmatrix} l+2 & l & 2 \\ 3/2 & 3/2 & f \end{Bmatrix} \sqrt{\frac{(l+1)(l+2)}{2l+3}} \\ C_3 &= -C_1, \quad (C_1)^2 + (C_2)^2 = 1, \quad C_2 / \mu > 0, \quad \mu = \frac{2\gamma}{\gamma_1} \end{aligned} \quad (9)$$

and operators

$$\hat{\mathbf{B}}_l^+ = -\frac{\partial}{\partial r} + \frac{l}{r}, \quad \hat{\mathbf{B}}_l^- = \frac{\partial}{\partial r} + \frac{l+1}{r}, \quad \hat{\Delta}_l = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} - \frac{l(l+1)}{r^2}. \quad (10)$$

If $f=1/2$, the radial equation takes the form

$$-\frac{1}{2} \gamma_1 (1+\mu) (\hat{\Delta}_l R_l^{1/2}(r)) + U(r) R_l^{1/2}(r) = E R_l^{1/2}(r). \quad (11)$$

If $r \leq a$, the solution of (8) can be expressed by the sum of the Bessel functions of the first kind

$$\begin{aligned} R_l^{f(I)}(r) &= A_1^{(I)} \frac{(C_1 - 1) J_{l+1/2}(k_{hh}^{(I)} r)}{C_2 \sqrt{r}} + A_2^{(I)} \frac{(C_1 + 1) J_{l+1/2}(k_{lh}^{(I)} r)}{C_2 \sqrt{r}}, \\ R_{l+2}^{f(I)}(r) &= A_1^{(I)} \frac{J_{l+5/2}(k_{hh}^{(I)} r)}{\sqrt{r}} + A_2^{(I)} \frac{J_{l+5/2}(k_{lh}^{(I)} r)}{\sqrt{r}}, \end{aligned} \quad (12)$$

where $k_{hh}^{(I)} = \sqrt{2m_{hh}^{(I)} E}$, $k_{lh}^{(I)} = \sqrt{2m_{lh}^{(I)} E}$.

If $r > a$, the solution can be expressed in terms of the modified Bessel functions of the first and second kind

$$R_l^{f(II)}(r) = A_1^{(II)} \frac{(-C_1 + 1) K_{l+1/2}(k_{hh}^{(II)} r)}{C_2 \sqrt{r}} + A_2^{(II)} \frac{-(C_1 + 1) K_{l+1/2}(k_{lh}^{(II)} r)}{C_2 \sqrt{r}}, \quad (13)$$

$$R_{l+2}^{f(II)}(r) = A_1^{(II)} \frac{K_{l+5/2}(k_{hh}^{(II)} r)}{\sqrt{r}} + A_2^{(II)} \frac{K_{l+5/2}(k_{lh}^{(II)} r)}{\sqrt{r}},$$

where $k_{hh}^{(II)} = \sqrt{2m_{hh}^{(II)}(U_0 - E)}$, $k_{lh}^{(II)} = \sqrt{2m_{lh}^{(II)}(U_0 - E)}$.

Using the boundary conditions and normalized condition, the dispersion equation has been received and energy spectrum of hole has been defined in the case of $F_{el} = 0$ and $Z = 0$. Quantum numbers l and f are connected by the rule of adding angular moments $\vec{F} = \vec{L} + \vec{J}$. For fixed l and f solution of the dispersion equation are numbered by n . Therefore the wave function depend on one mere quantum number n :

$$\psi_{f,M}^{(0)}(r, \theta, \varphi) \equiv \psi_{f,M;n}^{(0)}(r, \theta, \varphi).$$

In this way, the energy of the holes was determined. The calculation shows than hole energy levels split by total magnetic quantum number $|M| = 1/2, 3/2$ when there is the off-central impurity or/and the electric field is applied (for example, see Fig.1). Their combined influence

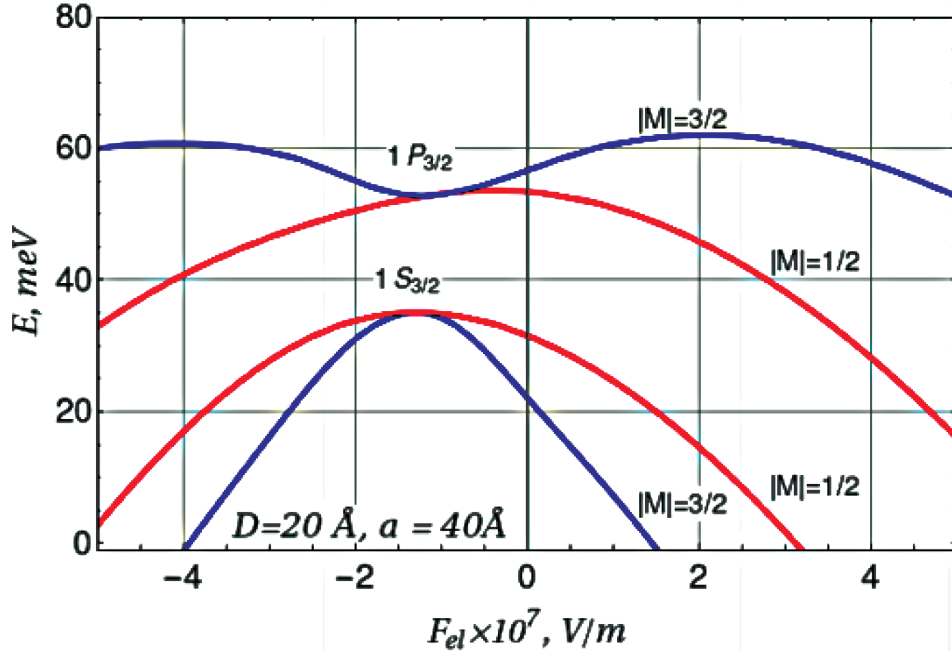


Figure 1. Hole energies of $1S_{3/2}$ and $1P_{3/2}$ states as the function of the electric field in QD heterostructure *GaAs/AlAs*. QD radius is 40 \AA , the acceptor ion of is located at the distance $D=20 \text{ \AA}$ form the QD center.

can lead to both an increase in the splitting of energy levels and a decrease in the splitting [22].

All of this will be reflected in the optical absorption coefficient.

Optical absorption

The coefficient of linear optical absorption due to the interlevel optical transition caused by a linear polarized wave is written in the form [25, 26]:

$$\alpha_{1,2}(\omega) = \omega \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0 \varepsilon}} \frac{N |d_{1,2}|^2 \hbar \Gamma}{(E_2 - E_1 - \hbar \Gamma)^2 + (\hbar \Gamma)^2}, \quad (14)$$

where ω is the frequency of electromagnetic wave, μ_0 is the magnetic constant. The electron density in the QD N is the QD concentration. E_1 and E_2 are energies of the initial and final states. $d_{1,2}$ is the matrix element of the dipole transition. $\hbar \Gamma$ is the relaxation rate caused by the electron-phonon interaction and some other scattering factors. If $\hbar \Gamma \rightarrow 0$ we got

$$\alpha_{1,2;system}(\omega) = \omega \pi \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0 \varepsilon}} N \int g(\tilde{s}, \bar{a}, a) |d_{mn}|^2 \delta(E_2(a) - E_1(a) - \hbar \omega) da.$$

After integrating and considering the properties of the delta-function, the following result is obtained:

$$\alpha_{1,2;system}(\omega) = \omega \pi \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0 \varepsilon}} N \sum_i \frac{|d_{12}(a_{0i})|^2 g(\tilde{s}, \bar{a}, a_{0i})}{\frac{d}{da} (E_2(a) - E_1(a) - \hbar \omega) \Big|_{a=a_{0i}}}. \quad (17)$$

In the spherical symmetry case (when $F_{el} = 0$ and $Z = 0$) the energies of both the ground state $1S_{3/2}$ and first excited state $1P_{3/2}$ is quadruple degenerate. But when $Z \neq 0$ or $F_{el} \neq 0$ the energy

$$d_{(1S_{3/2}, |M|=3/2); (1P_{3/2}, |M|=3/2)} \neq 0, \quad d_{(1S_{3/2}, |M|=1/2); (1P_{3/2}, |M|=1/2)} \neq 0$$

Therefore due to splitting, there are two absorption bands (between states with $|M| 3/2 \rightarrow 3/2$ and $1/2 \rightarrow 1/2$) instead of one in the absence of an electric field and a central impurity.

We have calculated the optical absorption coefficients for various values and directions of the electric field, specifically for $-3 \cdot 10^7$, $-1 \cdot 10^7$ and $1 \cdot 10^7$ V/m, in the presence of an acceptor at a distance of $D=20$ Å. The results show that the

$$\alpha_{1,2}(\omega) = \omega \pi \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0 \varepsilon}} \sigma |d_{1,2}|^2 \delta(E_2 - E_1 - \hbar \omega). \quad (15)$$

In practice, sets of QDs arranged in a matrix are obtained. Regardless of the growth method used, any set of QDs can always be characterized by a size dispersion. Let the distribution of QDs be described by a Gaussian function:

$$g(\tilde{s}, \bar{a}, a) = \frac{1}{\tilde{s} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(a - \bar{a})^2}{2\tilde{s}^2}\right), \quad (16)$$

where a is the radius of the quantum dot (variable), \tilde{s} is the half-width of the distribution (16), which can be expressed through the average radius \bar{a} and the value of σ , representing the size variation of the quantum dots in percentage: $s = \bar{a} \sigma / 100$. Considering the size dispersion of the quantum dots (17), the absorption coefficient of the quantum dot system is written as:

levels are split by $|M| = 1/2, 3/2$. Therefore, there are two possible transitions between those levels. According to the selection rules transition is allowed when

presence of an electric field, combined with the impurity, leads to the existence of two absorption bands corresponding to $|M| = 1/2$ and $3/2$. As in the case without an electric field and with a non-central acceptor impurity, the absorption bands corresponding to transitions between states with $|M| = 3/2$ are larger than those corresponding to transitions between states with $|M| = 1/2$. The distances between the bands for the cases

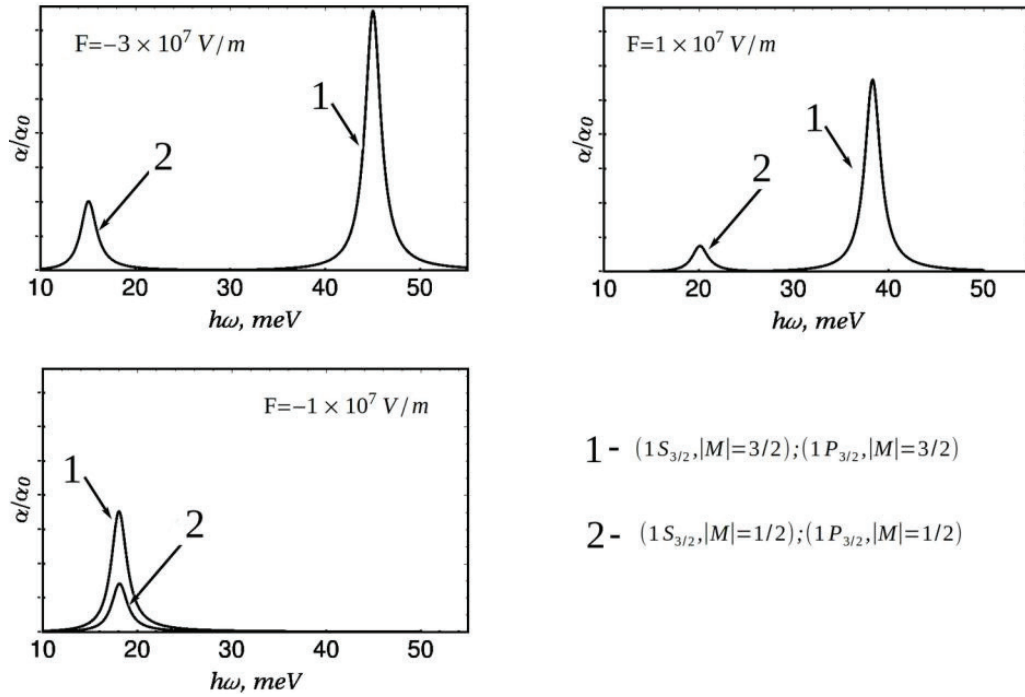


Figure 2. Optical absorption coefficient caused by the interlevel hole transition between allowed states for different electric fields. QD radius is 40 Å, the acceptor ion of is located at the distance $D=20$ Å form the QD center, QD dispersion 5%.

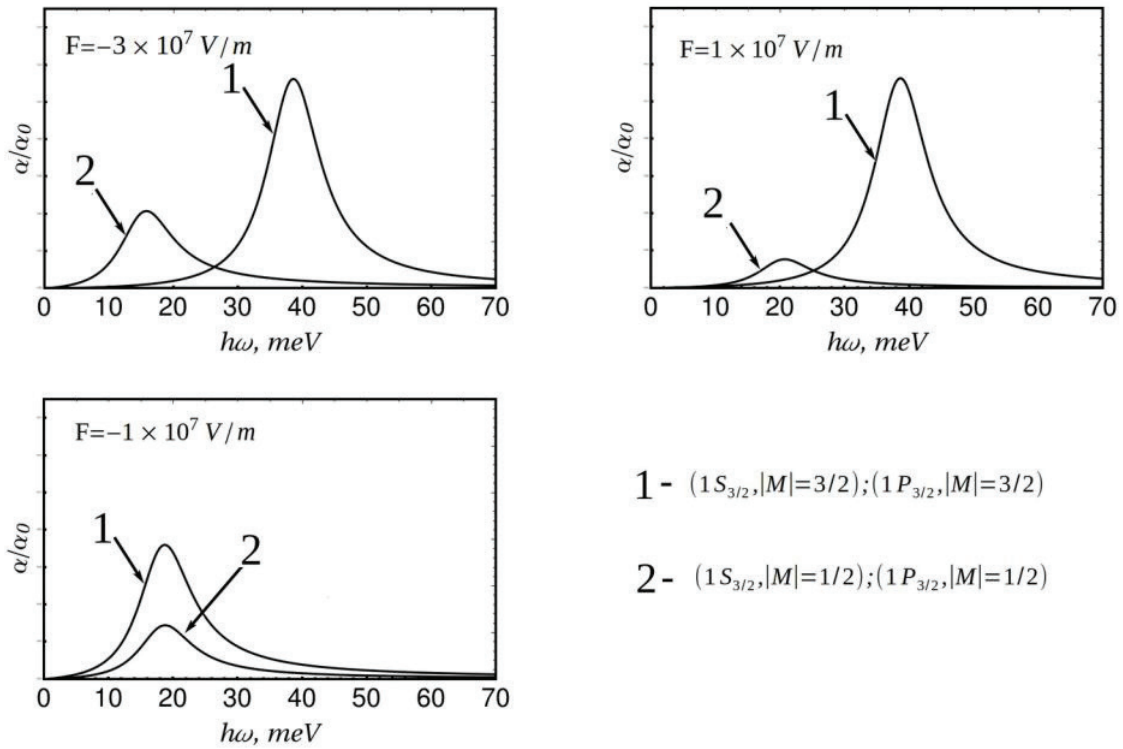


Figure 3. Optical absorption coefficient caused by the interlevel hole transition between allowed states for different electric fields. QD radius is 40 Å, the acceptor ion of is located at the distance $D=20$ Å form the QD center, QD dispersion 20%.

$F = -3 \times 10^7$ and $F = 1 \times 10^7$ V/m, are significant. If the size dispersion of the quantum dot is small, around 5% (see Fig. 2), these bands are clearly distinguishable. However, with larger dispersion of 20% (see Fig. 3), these absorption bands “overlap”, making it practically difficult (and often impossible) to identify them experimentally (especially when considering temperature). Nevertheless, even without an applied electric field, a non-central impurity splits the states, and two bands exist, even if they are poorly identifiable. This blurring, however, broadens the broadband “tail” of absorption, which is often undesirable. For any arbitrary impurity position, there is always a specific electric field value that restores the degeneracy of the energy levels. For instance, at $D=20$ Å and $a=40$ Å, such a field value is approximately -1×10^7 . In this case, the absorption bands coincide, and overall, the broadband “tail” of absorption becomes narrower, even with small or large size dispersion.

Conclusion

The results of our calculations demonstrate that the presence of an electric field, combined with a non-central impurity, leads to the emergence of two distinct absorption bands corresponding to different magnetic quantum numbers. The magnitude of the absorption bands depends on the direction and strength of the electric field, with significant differences observed between fields of opposite polarity. Notably, there exists a critical field strength that restores the degeneracy of energy levels, narrowing the broadband absorption tail for systems with small or large size dispersions. The proposed models can also be extended to the case of arbitrary electric field orientation relative to the impurity displacement, which will be addressed in future studies. This extension will provide further insights into the control of optical properties in quantum dots under electric fields.

References

- [1]. Peter Y. Yu., Manuel Cardona. Fundamentals of Semiconductors. Physics and Materials Properties (Fourth Edition) 2010. Springer Heidelberg Dordrecht London New York, link: <https://www.springer.com/gp/book/9783642007095>.
- [2]. Carlo Lamberti. Characterization of Semiconductor Heterostructures and Nanostructures (2 edition). 2013. Elsevier, link: <https://www.sciencedirect.com/book/9780444595515/characterization-of-semiconductor-heterostructures-and-nanostructures>.
- [3]. Michael Shur, Elena Borovytska, Quantum Dots, World Scientific, 2002.
- [4]. S. Schmitt-Rink, D. A. B. Miller, and D. S. Chemla, Theory of the linear and nonlinear optical properties of semiconductor microcrystallites, Phys. Rev. B35, 8113, 1987, DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.35.8113>.
- [5]. ABDULLAH, Amira R., et al. The doping effect on the linear and nonlinear optical behaviors of nickel oxide films for multiple optoelectronic applications. *Micro and Nanostructures*, 2024, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micna.2024.207785>.
- [6]. Jian-Hui Yuan, Ni Chen, Zhi-Hai Zhang, Jing Su, Su-Fang Zhou, Xiao-ling Lu, Yong-Xiang Zhao. Energy spectra and the third-order nonlinear optical properties in GaAs/AlGaAs core/shell quantum dots with a hydrogenic impurity // *Superlattices and Microstructures*.– 2016. – V. 100 – P. 957–967 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2016.10.068>.
- [7]. E. B. Al, E. Kasapoglu, H. Sari, I. Sökmen, Optical properties of spherical quantum dot in the presence of donor impurity under the magnetic field // *Physica B: Condensed Matter*, Vol. 613, 15 July 2021, 412874. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physb.2021.412874>
- [8]. Jia-Lin Zhu. Exact solutions for hydrogenic donor states in a spherically rectangular quantum well // *Phys. Rev. B*39.– 1989. – Vol. 39, No 12 – P. 8780–8783 DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.39.8780>.
- [9]. Chun-Ching Yang, Li-Chi Liu, and Shih-Hsin Chang. Eigenstates and fine structure of a hydrogenic impurity in a spherical quantum dot // *Phys. Rev. B* – 1998. – Vol. 58, No 4. – P. 1954–1961 DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.58.1954>.

- [10]. V. A. Holovatsky, O. M. Voitsekhivska, M. Ya Yakhnevych The effect of magnetic field and donor impurity on electron spectrum in spherical core-shell quantum dot // *Superlattices and Microstructures*.– 2018. – V. 116 – P. 9–16 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2018.02.006>.
- [11]. V. A. Holovatsky, M. Ya. Yakhnevych, O. M. Voitsekhivska. Optical properties of GaAs/Al_xGa_{1-x}As/GaAs quantum dot with off-central impurity driven by electric field // *Condensed Matter Physics*.– 2018. – Vol. 21, No 1. – P 13703: 1–9 DOI: <https://10.5488/CMP.21.13703>.
- [12]. Holovatsky, V., Chubrei, M., & Yurchenko, O. (2021). Impurity photoionization cross-section and intersubband optical absorption coefficient in multilayer spherical quantum dots. *Physics and Chemistry of Solid State*, 22(4), 630–637. DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.22.4.630-637>.
- [13]. V. I. Boichuk, I. V. Bilynskyi, R. Ya. Leshko, L. M. Turyanska. The effect of the polarization charges on the optical properties of a spherical quantum dot with an off-central hydrogenic impurity // *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*.– 2011. – Vol. 44, No 2. – P. 476–482 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physe.2011.09.025>.
- [14]. M. El Haouari, E. Feddi, F. Dujardin, R. L. Restrepo, M. E. Mora-Ramos, C. A. Duque. Polaronic effects on the off-center donor impurity in AlAs/GaAs/SiO₂ spherical core/shell quantum dots // *Superlattices and Microstructures*.– 2017. – Vol. 111. – P. 457–465 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2017.06.059>.
- [15]. V. I. Boichuk, R. Ya. Leshko, D. S. Karpyn. Analysis of the effect of polarization traps and shallow impurities on the interlevel light absorption of quantum dots // *Condensed Matter Physics*.– 2017. – Vol. 20, No 4. – P. 43704: 1–8 DOI: <https://doi.org/10.5488/CMP.20.43704>.
- [16]. Asmaa Ibral, Asmae Zouitine, El Mahdi Assaid, El Mustapha Feddi, Francis Dujardin, Ground state energy and wave function of an off-centre donor in spherical core/shell nanostructures: Dielectric mismatch and impurity position effects // *Physica B: Condensed Matter*, Vol. 449, 15 September 2014, Pages 261–268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physb.2014.05.045>
- [17]. J. M. Luttinger and W. Kohn. Motion of Electrons and Holes in Perturbed Periodic Fields // *Phys. Rev.*– 1955. – Vol. 97, No 4, pp. 869–883 DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.97.869>.
- [18]. J. M. Luttinger. Quantum Theory of Cyclotron Resonance in Semiconductors: General Theory // *Phys. Rev.* 1956. – Vol. 102, No 4., pp 1030–1041 DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.102.1030>.
- [19]. A. Baldereshi and N. O. Lipari. Spherical Model of Shallow Acceptor States in Semiconductors // *Phys. Rev. B.*– 1973. – Vol. 8, No 6. pp 2697–2709 DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.8.2697>.
- [20]. E. Menéndez-Proupin and C. Trallero-Giner. Electric-field and exciton structure in CdSe nanocrystals // *Phys. Rev. B.*– 2003. – Vol. 69, pp 125336–125345 DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.69.125336>.
- [21]. V. I. Boichuk, R. Ya. Leshko, I. V. Bilynskyi, L. M. Turyanska. Off-central acceptor impurity in a spherical quantum dot // *Condensed Matter Physics*.– 2012. – Vol. 15, No 3, pp. 33702: 1–10 DOI: <http://dx.doi.org/10.5488/CMP.15.33702>.
- [22]. I. V. Bilynskyi, R. Ya Leshko, H. O. Metsan, M. A. Slusarenko, Effect of electric field and acceptor position on the energy spectrum of GaAs/AlAs quantum dot, *Physica B: Condensed Matter*, Vol. 642, 2022 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physb.2022.414106>.
- [23]. A. Baldereshi and N. O. Lipari. Spherical Model of Shallow Acceptor States in Semiconductors // *Phys. Rev. B.*– 1973. – Vol. 8, No 6. pp 2697–2709 DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.8.2697>.
- [24]. R. Ya. Leshko, I. V. Bilynskyi. The hole energy spectrum of an open spherical quantum dot within the multiband model // *Physica E* – 2019. – Vol. 110, pp. 10–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physe.2019.01.024>
- [25]. Vahdani M. R. K., Rezaei G., *Phys. Lett. A*, 2009, 373, 3079; DOI:10.1016/j.physleta.2009.06.042.
- [26]. Rezaei G., Vahdani M. R. K., Vaseghi B., *Curr. Appl. Phys.*, 2011, 11, 176; DOI:10.1016/j.cap.2010.07.002.

Стаття надійшла до редакції 16.11.2024 р.

UDC: 539.1

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.4.315282>

THE INTERSUBBAND OPTICAL ABSORPTION COEFFICIENT OF THE QD WITH ACCEPTOR IMPURITY UNDER APPLIED ELECTRIC FIELD

R. Ya. Leshko¹, H. Ya. Bandura¹, I. V. Bilynskyi², Ya. Yu. Melnyk², M. V. Kvyk²

¹ Physics Department, Drohobych Ivan Franko State Pedagogical University, 3 Stryiska St, 82100 Drohobych, Ukraine, galinka.bandura@gmail.com

² Physics Department, Kryvyi Rih State Pedagogical University, 54 Gagarina Av, 50086 Kryvyi Rih, Ukraine

Summary

Quantum dots (QDs) are nanostructures with unique optical properties. They are of interest to both theorists and experimentalists. The optical characteristics of quantum dots are influenced by various factors, including the shape of the QDs, the QD material, their environment, and impurities of donor or acceptor type. In this work, a spherical quantum dot under the influence of an external electric field is investigated. A multi-band model of the valence band is applied. The influence of off-center acceptor impurity, electric field and QD size dispersion on the absorption coefficient during intersubband transitions between hole states has been analyzed. The results show that an electric field combined with an off-center impurity induces the appearance of two distinct absorption bands corresponding to different magnetic quantum numbers. The intensity of absorption bands depends on the direction and strength of the electric field, and significant differences are observed between fields of opposite polarity. It is important to note that there is a critical field strength that restores the degeneracy of the energy levels, narrowing the broadband absorption tail for systems with small or large dispersion sizes. This research aims to improve the understanding and optimization of the optical properties of nanomaterials.

Keywords: acceptor impurity, electric field, hole energy spectrum, multiband hole model, level splitting

УДК: 539.1

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.4.315282>

КОЕФІЦІЄНТ МІЖПІДЗОННОГО ОПТИЧНОГО ПОГЛИНАННЯ КВАНТОВОЇ ТОЧКИ З АКЦЕПТОРНОЮ ДОМІШКОЮ В ПРИКЛАДНОМУ ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ

Р. Я. Лешко¹, Г. Я. Бандура¹, І. В. Білинський², Я. Ю. Мельник², М. В. Квик²

¹Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франки, кафедра фізики, вул. Стрийська, 3, 82100, Дрогобич, Львівська область, Україна, galinka.bandura@gmail.com

²Криворізький державний педагогічний університет, кафедра фізики, проспект Гагаріна, 54, 50000, Кривий Ріг, Дніпропетровська область, Україна

Реферат

Квантові точки (КТ) – це наноструктури з унікальними оптичними властивостями. Вони цікавлять як теоретиків, так і експериментаторів. На оптичні характеристики квантових точок впливають різні фактори, зокрема форма КТ, матеріал КТ, їхнє оточення та домішки донорного чи акцепторного типу. У роботі досліджено сферичну квантову точку під впливом зовнішнього електричного поля. Застосовано багатозонну модель валентної зони. Проаналізовано вплив нецентральної акцепторної домішки, електричного поля та дисперсії розміру КТ на коефіцієнт поглинання при міжпідзонних переходах між дірковими станами. Результати показують, що електричне поле в поєднанні з нецентральною домішкою викликає появу двох чітких смуг поглинання, що відповідають різним магнітним квантовим числам. Інтенсивність смуг поглинання залежить від напрямку і напруженості електричного поля, причому значні відмінності спостерігаються між полями протилежної полярності. Важливо відзначити, що існує критична напруженість поля, яка відновлює виродження енергетичних рівнів, звужуючи широкосмуговий хвіст поглинання для систем з малими або великими розмірами дисперсії. Це дослідження спрямоване на покращення розуміння та оптимізацію оптичних властивостей наноматеріалів.

Ключові слова: акцепторна домішка, електричне поле, енергетичний спектр дірок, багатозонна діркова модель, розщеплення рівнів

ХІМІЧНІ СЕНСОРИ

CHEMICAL SENSORS

PACS07.07.Df, 87.19.lt, 73.40.-c, 02.30.Ik

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.4.315567>

ХІМІЧНІ СЕНСОРИ ІЗ МЕМРИСТИВНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ (ОГЛЯД)

О. М. Костюкевич¹, В. А. Скришевський²

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, факультет радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем, просп. Академіка Глушкова, 4г, м. Київ, Україна, mirror@ukr.net;

²Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Навчально-науковий інститут високих технологій, просп. Академіка Глушкова, 4г, м. Київ, Україна.

ХІМІЧНІ СЕНСОРИ ІЗ МЕМРИСТИВНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ (ОГЛЯД)

О. М. Костюкевич, В. А. Скришевський

Анотація. У статті наведено стислий огляд літературних даних, що стосуються принципів функціонування і параметрів наразі створених напівпровідникових гетероструктур із мемристивними властивостями, у яких перемикання електричного опору здійснюється за рахунок різних фізико-хімічних принципів. Розглянуті гетероструктури є перспективними з точки зору їхнього застосування у ролі як дискретних газочутливих та біосенсорних комірок із покращеними експлуатаційними характеристиками, так і елементів багатосенсорних нейроморфних матриць систем типу «електронний ніс».

Ключові слова: газовий сенсор, біосенсор, гетероструктура, наноматеріали, мемристор, газистор, гістерезис

CHEMICAL SENSORS WITH MEMRISTIVE PROPERTIES: REVIEW

О. М. Kostiukevych, V. A. Skryshevsky

Abstract. The article provides a brief review of literature data related to the principles of operation and parameters of currently created semiconductor heterostructures with memristive properties, in which the electrical resistance switching is caused by different physicochemical principles. The considered structures are promising from the point of view of their application in the role of discrete gas-sensitive and biosensor cells with improved operational characteristics, as well as elements of multisensory neuromorphic arrays of the «electronic nose»-like systems.

Keywords: gas sensor, biosensor, heterostructure, nanomaterials, memristor, gasistor, hysteresis

ВСТУП

Оцінка сучасного стану ринку напівпровідникових хімічних сенсорів показує, що основними галузями, де такі пристрої найбільш затребувані, є: промисловість (крім нафтохімічної) (20%), нафтопереробка (17%), автотранспорт (14%), побут, системи «розумний будинок» (14%), екологічний моніторинг (13%), медицина (11%), сільське господарство (5%) та інше (6%) [1]. Серед них медицина, зокрема, заслуговує на особливу увагу, оскільки є усі підстави вважати, що потреба у біосенсорному та газоаналітичному обладнанні у цій галузі дедалі зростатиме у зв'язку із необхідністю створення новітніх медичних приладів для неінвазивного скринінгу деяких захворювань не лише за присутністю тих або інших антигенів у рідинних пробах, а і за наявністю ендогенних біомаркерів у продуктах видиху пацієнта.

У повітрі, яке видихає людина, станом на сьогодні ідентифіковано більше 3000 найрізноманітніших летких органічних та неорганічних речовин [2], таких, як монооксид вуглецю (CO), оксиди азоту (NO_x), ацетон (CH₃COCH₃), аміак (NH₃), оцтовий альдегід (CH₃CHO), пропіоновий альдегід (CH₃CH₂CHO), гептиловий альдегід (CH₃(CH₂)₅CHO), капріловий альдегід (CH₃(CH₂)₆CHO), 2-бутанон (C₂H₅COCH₃), метанол (CH₃OH), ізопрен (CH₂=CHC(CH₃)=CH₂), пропанол (CH₃CH₂CH₂OH). Поява, збільшення або зменшення концентрації деяких з них може бути зумовлена, наприклад, порушеннями процесів метаболізму, вираженими у зміні газообміну між організмом та оточуючим середовищем або присутністю продуктів життєдіяльності хвороботворних бактерій в тому чи іншому органі.

У більшості випадків, як виявилось, для здійснення медичного скринінгу зовсім не обов'язково проводити складну процедуру диференціації газового середовища на складові з наступною ідентифікацією хімічних сполук та кількісною оцінкою їхнього співвідношення за допомогою дорогих, складних та громіздких газових хроматографів та мас-спектрометрів, достатньо зосередитись на інтегральному аналізі особливостей запахів (*нюхових образів*) ви-

диху, що супроводжують перебіг тієї чи іншої хвороби.

Із задачею аналізу нюхових образів наразі непогано справляються багатосенсорні прилади типу «електронний ніс», доповнені різноманітними системами математичної обробки вихідного сигналу із використанням алгоритмів штучного інтелекту. Вони вже з успіхом застосовуються у медицині для безболісного експрес-діагностування та контролю протікання таких захворювань, як цукровий діабет, рак легенів [3] або гостра респіраторна вірусна хвороба COVID-19 із точністю на рівні 95–96%, що не гірше, ніж у випадку використання інвазивних, дорогих тестів на основі полімеразної ланцюгової реакції (ПЛР), які вважаються золотим стандартом у діагностиці COVID-19 [4]. Проте, суттєвим недоліком цих систем все ще лишається їхня порівняно висока вартість, великі габарити та суттєвий вплив таких зовнішніх факторів, як температура і відносна вологість оточуючого повітря на результати аналізу тощо, через що «електронні носи» підлягають обов'язковим багатоетапним процедурам калібрування та попередньої підготовки [5].

Оскільки такі штучні газоаналітичні системи початково задумувалися як імітація органів нюху ссавців, то, очевидно, найбільш перспективним шляхом до удосконалення їхніх експлуатаційних параметрів є максимальне наближення принципів функціонування сенсорних комірок, на основі яких вони побудовані, до принципів дії системи нюху живих істот. Ряд проблем, які щоразу виникають при намаганнях створити системи штучного нюху, а також суттєво спростити їхню конструкцію, можуть бути вирішені при використанні нейроморфних масивів сенсорних комірок із мемристивною поведінкою, що поєднують у собі властивості як рецепторів нюхових нейронів, так і нервових синапсів.

Однак, спектр проблем сучасних технологій газодетектування, для вирішення яких можуть знадобитись газочутливі гетероструктури із мемристивними властивостями не обмежується лише питаннями підвищення селективності та інтегрованості комплексних газоаналітичних систем. Мемристори можуть

також стати корисними при реалізації інших науково-технологічних прагнень у даній галузі, що наразі розвивається швидкими темпами. Одним із таких прагнень є підвищення точності визначення концентрації того чи іншого аналіту за рахунок нівелювання варіацій експлуатаційних параметрів однотипних сенсорних комірок через особливості технологічного процесу виготовлення та ефекти старіння, а також за рахунок покращення відтворюваності адсорбційних відгуків на одну і ту саму концентрацію хімічної сполуки. Це ж стосується і зниження рівнів енергоспоживання, забезпечення стійкості характеристик сенсорів до паразитних впливів коливальних температури та відносної вологості оточуючого газового середовища тощо. Огляду деяких із цих аспектів і присвячена дана робота.

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ МЕМРИСТОРНОГО ЕФЕКТУ У НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУРАХ

У напівпровідникових приладах, як на основі планарних структур, так і побудованих із використанням багатошарових сендвічевих гетеропереходів, суттєвий вплив на їхню електричну провідність можуть чинити явища, пов'язані із міграцією іонів та дефектів кристалічної ґратки. Такі явища є найбільш яскраво вираженими за певних специфічних умов, наприклад при зменшенні міжелектродної відстані або при застосуванні матеріалів із великою рухливістю дефектів кристалічної структури в ролі складових тощо.

Окремим випадком прояву ефектів, пов'язаних із електростимульованою іонною міграцією у матеріалах із напівпровідниковими властивостями, є так званий *мемристорний ефект*, на якому базується функціонування двополюсних нелінійних елементів особливого роду – *мемристорів*, існування яких було теоретично передбачене у 1971 році американським дослідником, професором Каліфорнійського університету Л. О. Чуа [6].

Бурхливий розвиток нанотехнологічних процесів, задіяних у виготовленні інтегральних мікросхем зробив можливим реалізацію ідеї

Л. О. Чуа на практиці. Перші мемристори були випадково створені лише у 2008 році колективом вчених дослідницької лабораторії фірми Hewlett-Packard на чолі з Р. В. Вільямсом [7] у результаті багаторазових експериментів із новими типами модулів енергонезалежної пам'яті на основі матриць взаємоперпендикулярних платинових контактів із тонкою плівкою оксиду платини. У місцях перетину контактів розміщувалися нанорозмірні сендвічеві структури із шаром титану та моношаром різних речовин, які, за початковим задумом дослідників, мали б сприяти перемиканню цих структур між провідним та непровідним станами.

У своєму кінцевому варіанті прототипи розроблених мемристорів являли собою нанорозмірну двошарову плівку діоксиду титану, один із шарів якої мав високий електричний опір та відповідав стехіометричному складу цієї речовини (TiO_2), а другий був на 2–3% збіднений на кисень (TiO_{2-x} , де $x \approx 0,05$), через що концентрація вільних електронів у ньому була значно вищою, а, отже, більшою була і його електрична провідність. Плівка розміщувалася між двома металевими контактами.

Виявилось, що в такій структурі при прикладанні позитивного потенціалу до контакту, який межує із збідненим на кисень шаром, відбувається міграція позитивно заряджених кисневих вакансій у бік стехіометричного шару, через що зростає товщина збідненого на кисень шару, і загальний опір мемристора знижується, а при прикладанні негативного потенціалу до контакту, який межує із збідненим на кисень шаром, відбувається процес міграції у протилежному напрямку: товщина збідненого шару зменшується, а стехіометричного – зростає, внаслідок чого загальний електричний опір мемристора збільшується.

Таким чином, електрична провідність подібної наноструктури напряму залежить від того, якої величини та у якому напрямку заряд пройшов крізь неї. Важливо також зауважити, що стан мемристора зберігається навіть після вимикання напруги на його контактах, тобто він, на відміну від звичайних нелінійних резисторів (варисторів), ще й до того ж володіє властивістю запам'ятовувати свій попередній опір [8].

Математично мемристори, керовані струмом, можуть бути описані у диференціальній формі як [9]:

$$U = R(w)I,$$

$$\frac{dw}{dt} = I,$$

де U – зовнішня прикладена напруга, I – електричний струм, R – узагальнений опір, який залежить від змінної стану приладу (w).

Для випадку омичної електронної провідності та лінійного іонного дрейфу у однорідному електричному полі [9]:

$$U(t) = (R_{on} \frac{w(t)}{D} + R_{off}(1 - \frac{w(t)}{D}))I(t), \quad (1)$$

де D – загальна товщина оксиду, R_{on} та R_{off} – значення узагальненого опору структури при $\frac{w(t)}{D} = 1$ та $\frac{w(t)}{D} = 0$ відповідно.

Згідно із теорією дифузії, швидкість дифузії кисневих вакансій у збідненому шарі може бути представлена як [9]:

$$\frac{dw(t)}{dt} = \mu_V \frac{R_{on}}{D} I(t), \quad (2)$$

де μ_V – середня рухливість іонів. Вираз для $w(t)$ може бути отриманий з рівняння (2), яке описує нелінійну модель дифузії носіїв заряду [9]:

$$w(t) = \mu_V \frac{R_{on}}{D} q(t), \quad (3)$$

де $q(t)$ – заряд, що пройшов крізь оксидну плівку. Отже, з (1) та (3) шляхом підстановки можна отримати формулу для мемристансу, найбільш важливого параметра мемристорних систем. Для випадку, коли $R_{on} \ll R_{off}$ вона може бути спрощена і записана як [9]:

$$M(q) = R_{off}(1 - \frac{\mu_V R_{on}}{D^2} q(t)).$$

З числового розв'язку рівнянь (1), (2) отримуються теоретичні вольт-амперні характеристики у формі стиснутої петлі гістерезису.

Л. О. Чуа запропонував три критерії, згідно з якими той чи інший напівпровідниковий прилад можна вважати мемристором [10]:

- 1) Обов'язково є наявність гістерезису вольт-амперних характеристик у вигляді стиснених петель при прикладанні до структури періодичної біполярної напруги зміщення, в незалежності від початкових умов;
- 2) При збільшенні частоти прикладеної напруги площа кожної гістерезисної петлі має зменшуватись;
- 3) При прямуванні частоти прикладеної змінної напруги до нескінченності, гістерезисні петлі на ВАХ структури мають вироджуватись у пряму лінію, яка проходить крізь початок координат, і нахил якої залежить від амплітуди та форми зовнішнього сигналу.

Але пізніше поняття «мемристор» було дещо розширене ним самим з метою охоплення більш широкого класу елементів із властивостями енергонезалежної пам'яті [11].

На практиці, у елементів із неоднозначною поведінкою вольт-амперної характеристики можуть спостерігатись гістерезисні петлі двох типів (рис. 1), які відрізняються між собою характером проходження ВАХ через точку початку координат при прямому та зворотному вимірюванні.

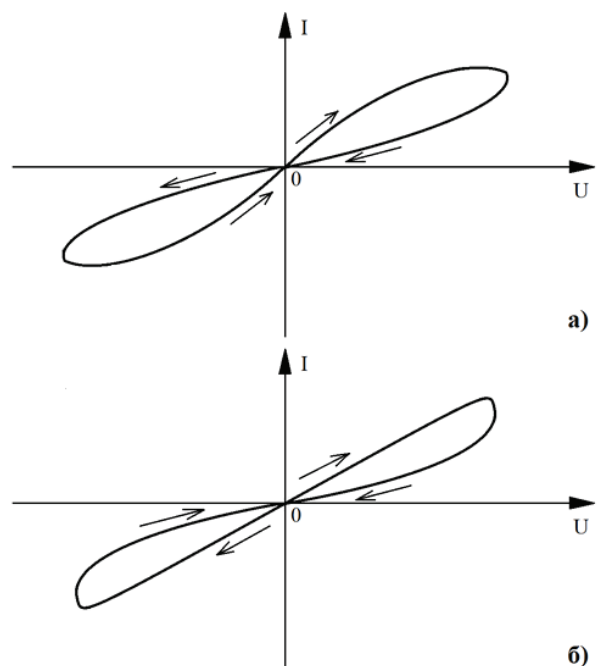


Рис. 1. Петлі гістерезису типу I (а) та типу II (б) на вольт-амперних характеристиках напівпровідникових структур.

Як видно з цього рисунку, петлі типу I са-моперетинаються в області нульової напруги та струму, в той час, як для петель типу II типовим є дотичність у цій області. На думку деяких авторів [12], лише ті елементи, які демонструють вольт-амперні характеристики типу I, можуть сміливо вважатись справді мемристивними. Проте, таке твердження є дещо суперечливим, оскільки навіть гетероструктури із ВАХ типу II часто повністю відповідають усім трьом вище наведеним критеріям мемристивності Л. О. Чуа. Схоже, що, питання про те, чи можна відносити елементи із ВАХ другого типу до мемристорів, чи ні є суто термінологічним.

ПРАКТИЧНІ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕМРИСТИВНИХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

З моменту створення першого мемристора проводиться інтенсивний пошук нових напівпровідникових матеріалів та фізичних принципів, які можна було б застосувати для виготовлення або удосконалення подібних систем з унікальними властивостями.

Врешті, виявилось, що не лише явища, пов'язані із рухом іонів та дефектів кристалічної ґратки, здатні зумовлювати вище описані властивості. За фізичним принципом перемикування опору сучасні мемристивні пристрої можна розділити на такі групи та підгрупи [13]:

- 1) Наноіонні:
 - а) що працюють на ефекті зміни валентності;
 - б) що працюють на ефекті електрохімічної металізації;
 - в) що працюють на термохімічних ефектах.
- 2) Електронні:
 - а) фероелектричні (в тому числі спінтронні);
 - б) на основі ефектів перезаряджання пасткових рівнів.
- 3) На основі фазових змін.
- 4) Наномеханічні.

Оскільки вище описані ефекти перемикування електричної провідності у TiO_2 , за своєю

суттю, є наслідком локальних стехіометричних змін, спричинених міграцією кисневих вакансій, то увесь процес перемикування може бути описаний у термінах локальної зміни валентності в шарах оксиду титану, тому класичні мемристорні комірки, створені Р. В. Вільямсом, відносяться до групи *наноіонних приладів, що працюють на ефекті зміни валентності*, аналогічні явища спостерігаються у оксиді вольфраму (WO_3), оксиді цинку (ZnO) тощо.

До категорії *наноіонних мемристорів, що працюють на ефекті електрохімічної металізації*, відносяться такі прилади, у яких визначну роль у перемикуванні відіграють процеси перерозподілу катіонів (іонів металу) під впливом електричного поля. Як приклад можна навести структури, що містять сульфід срібла (Ag_2S) [14] або переходи срібло-аморфний кремній [15]. В таких системах перемикування опору здійснюється за рахунок електрохімічного формування металічного «містка» між контактами двополюсника та переходу між тунельним та контактним режимами протікання струму. У CBRAM-ОЗП на основі тонких шарів оксиду кремнію (SiO_2) мемристивність забезпечується міграцією та розчиненням матеріалу контактів (Cu) у плівці SiO_2 [16]. Схожі властивості також притаманні структурам, що містять оксид гафнію (HfO_2) [17] та оксид танталу (Ta_2O_5) [18].

У мемристорах на основі фазових змін перехід між провідним та непровідним станами забезпечується пропусканням крізь структуру електричного струму, достатньо великого, щоб джоулеве тепло, яке при цьому виділяється, спричиняло у активному шарі локальні фазові переходи між двома стабільними станами: аморфним із високим опором та кристалічним із малим значенням опору. Одним із найкращих кандидатів на роль активного шару у таких структурах виявився телурид германію-стибію, GST ($\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_3$) [19].

На особливу увагу заслуговують *електронні мемристори на основі ефектів перезаряджання пасткових рівнів* через те, що, завдяки конструкції, параметри їхніх характеристик часто є досить чутливими до хімічного складу оточення, що дозволяє використовувати їх у ролі хімічних сенсорів. Такі мемристори,

як правило, побудовані на різного роду напівпровідникових переходах. Як приклад, можна навести інтерфейсні структури, що містять матеріали із кристалічною будовою типу перовскіту, такі, як титанати барію та стронцію [20]. В цих структурах особливо яскраво виражені процеси захоплення та вивільнення носіїв заряду на пасткових рівнях у межах інтерфейсу, зміна зарядового стану цих рівнів спричиняє модуляцію висоти бар'єра Шоттки, яка, в свою чергу впливає на загальну електричну провідність комірки. Вважається, що роль пасткових рівнів у титанатах барію та стронцію виконують кисневі вакансії, які утворилися під час осадження відповідних шарів [21].

Результати досліджень вольт-амперних, вольт-фарадних характеристик та фотовідгуку гетероструктур метал-діелектрик-напівпровідник на основі титанату стронцію (SrTiO_3), легованого ніобієм, за різних температур підтвердили визначальну роль процесів перезарядження пасткових рівнів у зміні механізмів транспорту носіїв струму в таких структурах при варіюванні прикладеної напруги. Ці процеси здатні змінювати профіль бар'єра Шоттки, тим самим впливаючи на перерозподіл внеску надбар'єрної та тунельної компонент у загальний струм крізь комірку [22].

Нітрид цирконію (ZrN) є ще одним досить цікавим матеріалом для створення модулів флеш-пам'яті, що працюють на ефектах перезарядження пасток (СТФ). Гетероструктури складу $\text{Me}/\text{мемристивний шар}/\text{нітрид/оксид}/\text{Si}$ із ZrN у ролі мемристивного шару продемонстрували досить непогані характеристики [23].

Ведеться розробка нових типів електронних мемристивних структур на основі ефектів перезарядження пасткових рівнів також і з використанням органічних хімічних сполук [24].

Слід зауважити, що стан мемристивних комірок може змінюватись не лише шляхом прикладання напруги або пропусканням електричного струму, а й дією випромінювання оптичного та ультрафіолетового діапазонів. Вже запропоновані прототипи оптичних мемристивних перемикачів, які працюють на фазових переходах, ефектах зміни валентності та електрохімічної металізації. Основою даних

фотокерованих перемикачів із пам'яттю є такі перспективні напівпровідникові матеріали, як оксид індію-олова (ITO), оксид ванадію (VO_2) та оксид цинку (ZnO) [25].

Інші фізичні принципи перемикачів або ще недостатньо вивчені, або їхній детальний опис виходить за рамки цієї статті.

БІОСЕНСОРИ, ГАЗОВІ СЕНСОРИ ТА СИСТЕМИ “ЕЛЕКТРОННИЙ НІС” НА ОСНОВІ МЕМРИСТОРІВ

Унікальність властивостей мемристивних структур спонукає науковців у всьому світі знаходити для них все нові і нові області застосування у цифровій та аналоговій електроніці, такі, як енергонезалежні модулі комп'ютерної пам'яті, генерування та підсилення ВЧ-сигналів, системи із прихованими атракторами [26], штучні аналоги синапсів головного мозку, нейроморфні обчислювальні системи та нейронні мережі, динамічні структури із самоорганізацією, хаотичні системи із граничними умовами, елементи арифметичних та логічних операцій, автоколивальні системи, клітинні автомати тощо [27]. Не лишається у стороні і галузь сенсорної електроніки, оскільки виявилось, що навіть класичні мемристори, побудовані за принципом Р. В. Вільямса та не оптимізовані для потреб цієї галузі часто демонструють чутливість до хімічної взаємодії [28].

Один із найперших мемристивних біосенсорів [29, 30], побудований за принципом польових транзисторів із газочутливим каналом, роль якого виконує кремнієвий нанодріт, виготовлений із використанням нанолітографічних технологій і функціоналізований поліклональними антитілами кролика, показав чутливість на рівні 37 ± 1 мВ/фмоль і межу детектування $3,4 \pm 1,8$ фмоль по відношенню до антигену (антикролячих антитіл).

Цей біосенсор є яскравим прикладом напівпровідникової структури, у якій мемристивний ефект безпосередньо використовується для кількісної оцінки концентрації цільового аналіту: мірою цієї концентрації є різниця між мінімумами струму при вимірюванні залежності струму виток-стік від напруги виток-стік за пря-

мого та зворотного напрямків розгортки (рис. 2). Взаємодія молекул антигену із функціоналізованою поверхнею кремнієвого нанодрота веде до того, що мінімуми струму на гістерезисній характеристиці сенсора починають віддалятися один від одного, причому відстань між ними, виражена у одиницях напруги, залежить від концентрації антигену. Таким чином, концентрація аналіту може бути визначена з виразу [29]:

$$S = \frac{D_{IC2} - D_{IC1}}{C_2 - C_1},$$

де D_{IC1} та D_{IC2} – параметри детектування, визначені за концентрацій, відповідно, C_1 та C_2 . А межа детектування [29]:

$$LOD = \frac{k\Delta D}{S},$$

де ΔD – відстань між струмовими мінімумами на вольт-амперній характеристиці, а k – статистична значущість.

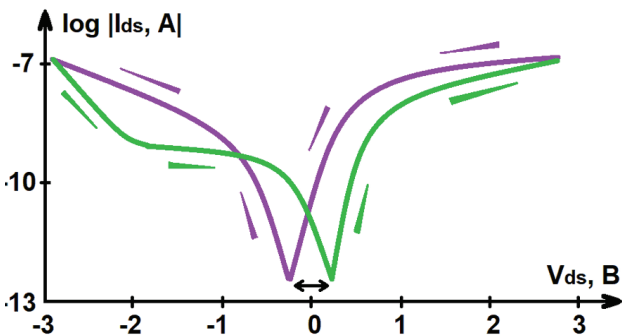


Рис. 2. Схематичне зображення гістерезисної ВАХ мемристивних біосенсорів, побудованих за принципом польового транзистора із газочутливим каналом.

Таким же чином здійснюється детектування і у біосенсорах, головною складовою яких є кремнієві нанодроти, сформовані на “підпорках” з силіциду нікелю (NiSi) та функціоналізовані шляхом нанесення на їхню поверхню молекул моноклональних антитіл фактору росту ендотелію судин (anti-VEGF) [31].

На думку авторів [31], гістерезисний характер ВАХ створених ними біосенсорів обу-

мовлений процесами захоплення носіїв заряду на інтерфейсах NiSi/Si та Si/NiSi, тобто є типовим проявом мемристивності електронного типу із залученням пасткових рівнів.

В роботі також детально досліджується вплив адсорбції молекул H_2O на величину різниці мінімумів струму при прямій та зворотній розгортці: цей вплив значно сильніший у випадку функціоналізованих нанодротів, аніж нефункціоналізованих, що пояснюється вищими рівнями енергії зв’язку продуктів дисоціації води із групами $-S$, $-N$, які належать білку, у порівнянні із енергією зв’язку гідроксильних груп із атомами кремнію. Проте, проблема суттєвої залежності величини відгуку від відносної вологості повітря вирішується відповідними процедурами попереднього калібрування.

Сам механізм чутливості біосенсорів [29, 31] пов’язується із двома ефектами: адсорбційно-стимульованим зниженням висоти бар’єрів Шоттки на переходах кремній-силіцид та здатністю адсорбованих молекул впливати своїм електричним полем на провідність нанодрота, виконуючи роль своєрідного концентраційно-керованого затвору.

Ідея газисторів, газочутливих напівпровідникових структур Pt/TiO₂/Pt із мемристивними властивостями [32] полягає у використанні особливостей їхньої гістерезисної вольт-амперної характеристики, що складається із двох ділянок: ділянки стану високого опору та ділянки стану низького опору. Перемикання структури зі стану високого опору у стан низького опору відбувається при прикладанні напруги, що перевищує певне значення (*напругу встановлення*), а перемикання зі стану низького опору у стан високого опору – при прикладанні зворотної напруги, що є вищою за *напругу скидання*. При цьому опір такого сенсора змінюється більше ніж на три порядки величини.

Адсорбція молекул окислюючого або відновлюючого агента веде до зміщення усієї гістерезисної вольт-амперної характеристики зразка, а разом із вольт-амперною характеристикою зміщуються і значення напруги встановлення та скидання. Причому величина цього зміщення

залежить від концентрації адсорбату на поверхні сенсорної структури.

Таким чином, якщо, наприклад, заживити такий газистор за відсутності дії аналіту джерелом постійного струму і виставити його робочу точку трохи нижче за напругу встановлення, а потім здійснити напуск газу-аналіту, що викликає поступове зменшення провідності усієї сенсорної структури, то адсорбційно-стимульована варіація гістерезисної ВАХ призведе до того, що, за даного постійного значення струму, напруга на зразку досягне нового значення напруги встановлення і гетероструктура стрибкоподібно перемкнеться зі стану високого опору у стан низького опору і залишатиметься у цьому стані навіть після видалення аналіту та провітрювання зразка (рис. 3). Тобто, подібна сенсорна комірка здатна не лише реагувати на зміни концентрації цільового аналіту, а й “запам’ятовувати” сам факт цих змін, якщо їхня величина перевищує порогове значення.

Що ж стосується принципу перемикання опору в [32], то він, як вважають автори, обумовлений локальною перебудовою кисневих вакансій у сильному електричному полі між контактними ділянками: при перемиканні у режим низького опору між електродами утворюється тонка нитка нестехіометричного TiO_{2-x} із високою електричною провідністю діаметром приблизно 10 нм (рис. 4а), що характеризується концентрацією кисневих вакансій на рівні не менше 10^{21} см^{-3} , а при перемиканні у режим високого опору ця нитка руйнується (рис. 4б). Отже, у стані низького опору провідність структури головним чином обумовлена провідністю нитки нестехіометричного TiO_{2-x} , утвореної внаслідок мікропробою, і майже не залежить від концентрації аналіту, а у стані високого опору провідність структури визначається провідністю газочутливого шару TiO_2 і є значно більш чутливою до адсорбції з газового середовища.

Такий концентраційно-керований тиристорний принцип дозволяє використовувати запропоновані газистори конденсаторного типу у ролі перемикачів у системах сигналізації витоку газів, або як основу газових сенсорів із пам’яттю, що можуть бути корисні, наприклад,

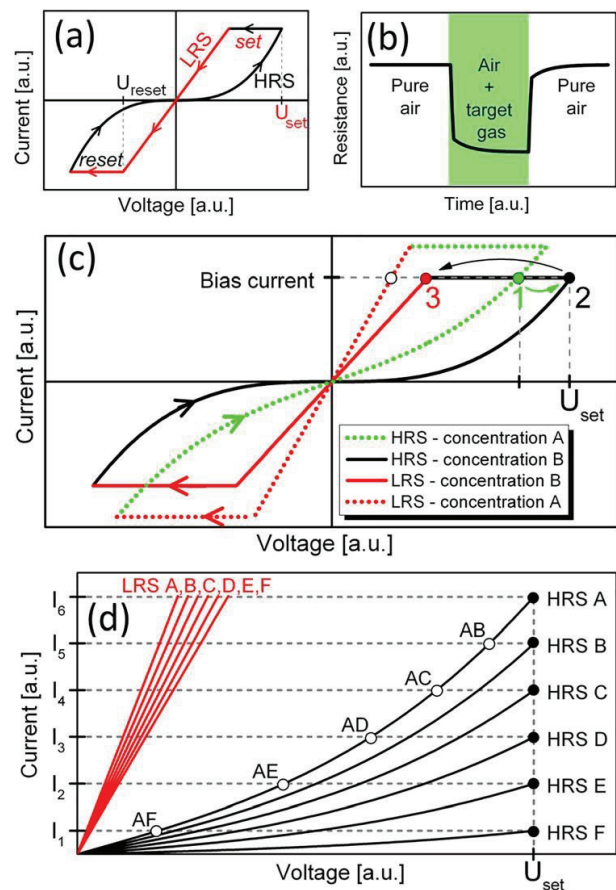


Рис. 3. (а) Типова ВАХ комірки із біполярним перемиканням опору в режимі зміщення струмом, із позитивною напругою встановлення. (б) Типовий відгук газистора на зміну концентрації детектованого газу. (с) Схематичне зображення ВАХ за різних концентрацій детектованого газу, що ілюструють принцип дії запропонованого газистора. (д) Схематичне зображення першого квадранту ВАХ у режимі зміщення струмом для шести різних величин концентрації детектованого газу. Відтворено з М. Vidiš, T. Plecenik, M. Moško, S. Tomašec, T. Roch, L. Satrapinsky, B. Grančič, A. Plecenik. Gasistor: A memristor based gas-triggered switch and gas sensor with memory // Appl. Phys. Lett. 115. 093504 (2019). DOI: 10.1063/1.5099685 з дозволу видавництва AIP Publishing.

для довготривалого моніторингу змін складу навколишнього газового середовища.

У сенсорно-мемристивних структурах складу $Pt/SnO_2/Ti$, $Pt/Ta_2O_5/Ti$, $Pt/HfO_2/Ti$ на кремнієвій основі [33] автори спостерігали подібний фізичний механізм перемикання зі стану високої електричної провідності у стан низької провідності та навпаки: формування та руйну-

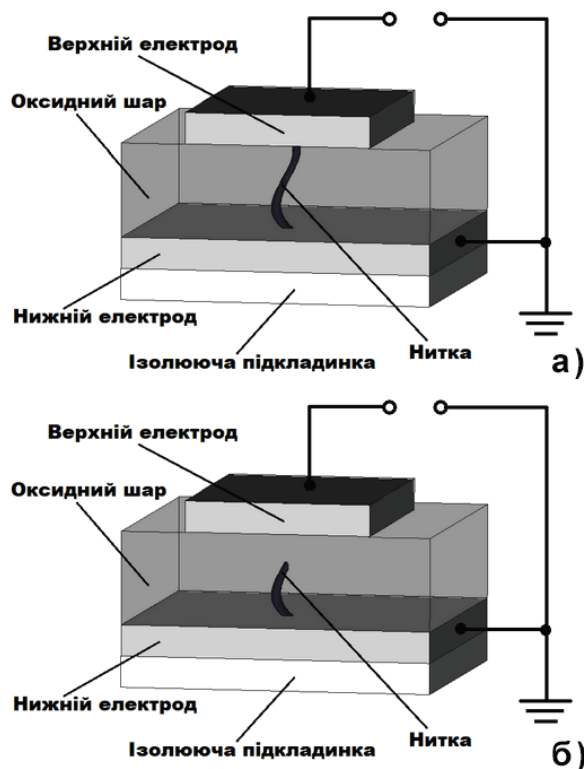


Рис. 4. Спрощене схематичне зображення будови газистора у станах високої (а) та низької (б) електричної провідності. Масштаби не дотримано.

вання нанорозмірних утворень із вишикуваних у тонкі нитки кисневих вакансій, що мають опір, значно нижчий, ніж решта оточуючого оксидного матеріалу. Було досліджено умови реорганізації структури чутливих шарів таких зразків під впливом адсорбції кисню (O_2), етану (C_2H_6) та монооксиду азоту (NO) і виявлено, що різні аналіти не лише зумовлюють різну кінетику змін величини адсорбційного відгуку і характеризуються різною величиною цього відгуку при однакових концентраціях газів, але і по-різному взаємодіють із високопровідними нитками у газочутливому шарі: так, наприклад, фізико-хімічний механізм газової чутливості при взаємодії молекул NO із оксидом танталу (V) у структурі $Pt/Ta_2O_5/Ti$ зумовлений головним чином зміною висоти бар'єра Шоттки у даних зразках і практично не супроводжується руйнуванням високопровідних ниток нестехіометричного Ta_2O_{5-x} , в той час, як у структурі $Pt/SnO_2/Ti$ до виникнення адсорбційного відгуку на NO призводять обидва ефекти: і зміна висоти

бар'єра Шоттки, і руйнування високопровідних ниток у SnO_2 . Таку різницю у особливостях впливу одного і того самого аналіту на структури із різним хімічним складом чутливого шару автори роботи пояснюють тим, що енергія активації кисневих вакансій у Ta_2O_5 є вищою за енергію активації у SnO_2 .

Досліджені сенсорно-мемристивні комірки, продемонстрували непогану чутливість до монооксиду азоту і малі часи відгуку (< 1 с) й відновлення (< 90 нс) навіть за кімнатної температури. Як сподіваються автори, поєднання значної кількості таких комірок усіх трьох типів у масив із перехресними контактами дозволило б отримати високоселективний сенсор NO , здатний виявляти присутність цього реагенту навіть у багатокомпонентних газових середовищах.

Заміна верхнього титанового контакту у гафній-оксидних сенсорах NO на поруватий шар вуглецевих нанотрубок дає змогу підвищити їхню чутливість до 50 ppm монооксиду азоту приблизно у 5 разів, а додаткове оздоблення цього шару молекулами N -[3-(триметоксисиліл)пропіл]етилендіаміном ($C_8H_{22}N_2O_3Si$, en-ATPAS), що має досить добру спорідненість до NO , підвищує чутливість ще удвічі (рис. 5) [34].

Аналогічний принцип детектування розглядається і у [35], де наведено результати дослідження напівпровідникових структур $Pt/IGZO/Ti$, основу газочутливого шару яких складає оксид індію-галію-цинку ($IGZO$), в якому також можливий процес формування високопровідних ниток із кисневих вакансій, вишикуваних між верхнім та нижнім контактами під дією прикладеного електричного поля, а також руйнування цих ниток внаслідок впливу джоулевого тепла або аналіту (рис. 6). Такі зразки продемонстрували високу чутливість до слідових концентрацій молекулярного кисню у різних газових сумішах при концентрації O_2 на рівні 500 ppb і межю виявлення 150 ppb за кімнатних температур, що є вкрай важливим у деяких технологічних процесах.

В [36] повідомляється про створення діючого макета системи детектування пари ізопропілового спирту у повітрі, що здатна у реальному часі із певним часовим кроком

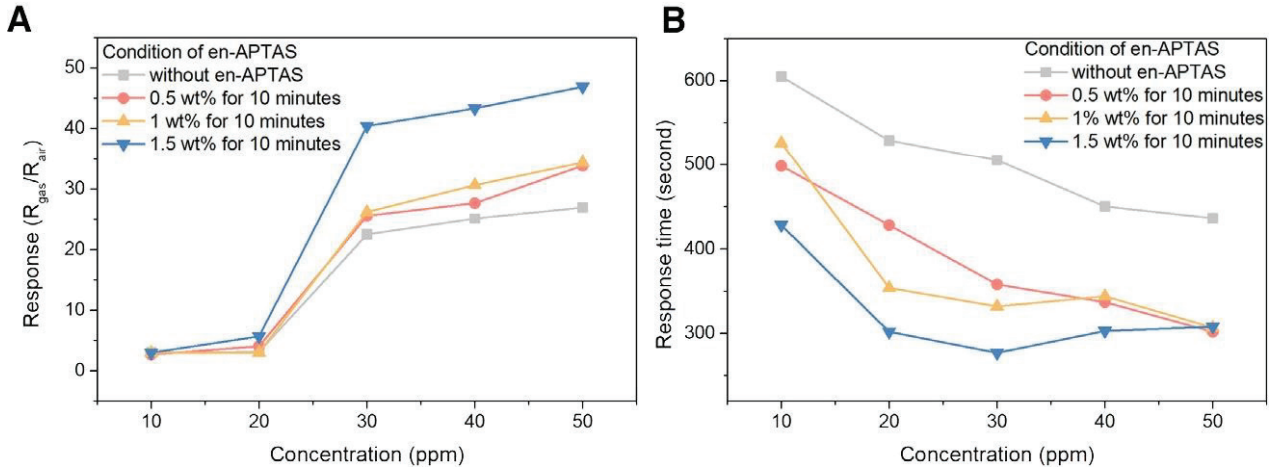
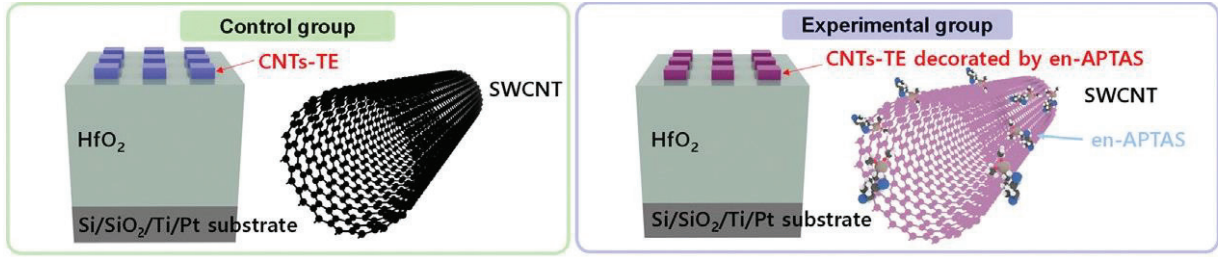


Рис. 5. Будова гафній-оксидного сенсора NO газисторного типу із верхнім контактом, виготовленим із поруватого шару вуглецевих нанотрубок, функціоналізованого молекулами ен-АТРАС, а також залежності величини (А) та часу (В) їхнього адсорбційного відгуку від вагової концентрації ен-АТРАС. Відтворено з M. Chae, D. Lee, J. Jung, H.-D. Kim. Enhanced memristor-based gas sensor for fast detection using a porous carbon nanotube top electrode with membrane // Cell Rep. Phys. Sci. 4. 101659 (2023) з дозволу видавництва Elsevier.

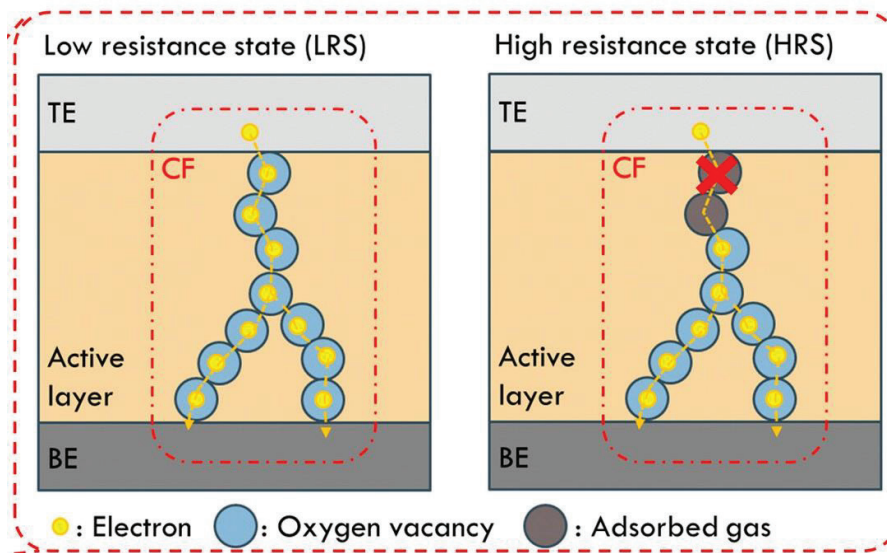


Рис. 6. Механізм перемикання електричного опору сенсорів газисторного типу на основі ІГЗО. Відтворено з M. Chae, D. Lee, H.-D. Kim. Low-power consumption IGZO memristor-based gas sensor embedded in an Internet of Things monitoring system for isopropanol alcohol gas // Micromachines. 15(1). pp. 77–88 (2024). DOI: 10.3390/mi15010077 з дозволу видавництва MDPI.

реєструвати та передавати за допомогою модуля бездротового зв'язку фактичні значення концентрації $\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$ на мобільний пристрій (телефон, планшет тощо) користувача, де він має змогу моніторити відповідні зміни за допомогою спеціального додатку. Для цього у ролі датчика якраз і використовується гетероструктура із шаром IGZO, що працює за кімнатної температури. Типова крива кінетики струмового відгуку такого газистора на адсорбцію молекул ізопропанолу та залежність величини його відгуку від концентрації ізопропанолу показані на рис. 7.

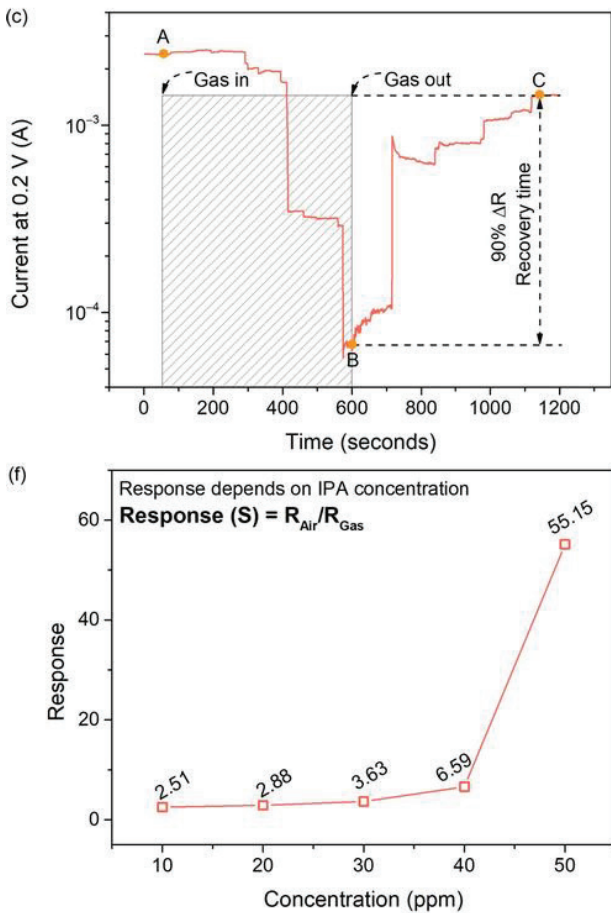


Рис. 7. (с) Типова крива кінетики струмового відгуку газистора на основі шару IGZO на адсорбцію молекул ізопропанолу. (f) Залежність величини адсорбційного відгуку газистора від концентрації ізопропанолу. Відтворено з M. Chae, D. Lee, H.-D. Kim. Low-power consumption IGZO memristor-based gas sensor embedded in an Internet of Things monitoring system for isopropanol alcohol gas // *Micromachines*. 15(1). pp. 77–88 (2024). DOI: 10.3390/mi15010077 з дозволу видавництва MDPI.

Завдяки мемристивним властивостям IGZO, потужність, яка споживається даною системою, не перевищує 0,34 мВт, що значно менше, ніж у більшості звичайних газових датчиків, і це робить її досить перспективною з точки зору інтеграції у портативні пристрої із акумуляторним живленням. Іншою перевагою є те, що сам процес створення газочутливого шару IGZO є значно простішим і дешевшим у порівнянні із формуванням наноструктурних утворень високочутливих метал-оксидних сенсорів. При цьому величина відгуку сягає 55,15, а час відгуку – 105 с за концентрації пари спирту 50 ppm.

Але унікальним є те, що процес відновлення подібних датчиків після дії аналіту може бути миттєвим і здійснюватись навіть у присутності аналіту! Це пояснюється тим, що саме поняття відновлення у випадку таких мемристивних сенсорів, по-суті, означає не поступове повернення до початкового вигляду ВАХ, як у традиційних гетероструктурах, а миттєве стрибкоподібне перемикання приладу у початковий стан низької або високої електричної провідності. Для цього у [36] застосовується прикладання до зразка імпульсу напруги відповідної полярності тривалістю 50 мкс і амплітудою 1 В, що перевищує напругу зчитування. Таким чином, розробникам вдалося скоротити час відновлення їхнього сенсора до блискавичних 50 мкс.

Подальша оптимізація IGZO-сенсорів можлива шляхом заміни матеріалу для їхнього нижнього контакту на ІТО, що дає змогу керувати шорсткістю поверхні цього контакту під час виготовлення структури з метою створення більш сприятливих умов для формування високопровідних ниток у об'ємі оксиду індію-галію-цинку. Нанорозмірні вістря на поверхні нижнього контакту сприяють такому розподілу електричного поля усередині гетероструктури, за якого полегшується процес утворення високопровідних ниток із кисневих вакансій, а самі ці нитки виявляються значно міцнішими та стійкішими у порівнянні із нитками у структурах із гладкою поверхнею нижніх платинових контактів [37]. Як результат, вдається додатково покращити відтворюваність, витривалість та

стабільність IGZO-сенсорів, зокрема зменшити флуктуації напруги їхнього вмикання/вимикання, збільшити величину співвідношення перемикавання до приблизно 125. До того ж, такі гетероструктури є прозорими для видимого світла.

Сенсори D-глюкози ($C_6H_{12}O_6$) [38, 39, 40], створені із залученням фізичного осадження з парової фази (PVD) та золь-гель методу, є прототипами рідинних датчиків (основами для систем “електронний язик”). Чутливим елементом тут є структурований шар TiO_2 , осаджений на плівку ІТО, нанесену на скляну основу. Взаємодія молекул D-глюкози, що знаходяться у водному розчині, із оксидом титану (IV) спричиняє зміну площі і положення гістерезисних петель на вольт-амперних характеристиках. Як міра концентрації D-глюкози використовується відношення значень електричного опору стану низької провідності (R_{off}) до опору стану високої провідності (R_{on}) за однієї і тієї ж самої напруги зчитування:

$$S = \frac{R_{off}}{R_{on}}.$$

Причому, в структурах із шаром TiO_2 , сформованим за допомогою PVD-методу, залежність S від концентрації $C_6H_{12}O_6$ виявилася лінійною, в той час, як у структурах із шаром TiO_2 , для створення якого застосували золь-гель осадження, ця залежність є експоненціальною [39].

В цілому, використання зміни відношення опорів станів низької та високої провідності при фіксованому значенні прикладеної напруги для оцінки величини відгуку сенсора на зміну концентрації аналіту має перевагу перед традиційною реєстрацією зміни струму при постійній прикладеній напрузі у звичайних сенсорах за рахунок кращої точності та відтворюваності результатів вимірювання. Тут, якраз, і стають у пригоді подібні газочутливі комірки із мемристивними властивостями.

У сенсорах водню [41], в яких застосовуються мемристори $Pt/TiO_2/Pt$ на підкладці з оксиду алюмінію (Al_2O_3), виготовлені методами магнетронного розпилення платини з металічної мішені та реактивного магнетронного

розпилення титану в аргоново-кисневій суміші та відпалені за різних температур, у процес детектування малих концентрацій H_2 залучені не самі ефекти перемикавання електричної провідності під дією електричного поля, а явища всередині оксидного шару, які передують цим перемиканням.

На думку авторів [41], відгук таких структур на адсорбцію водню обумовлений відразу трьома електрофізичними механізмами: 1) варіаціями міжзеренного поверхневого потенціалу у об'ємі TiO_2 ; 2) зміною висоти бар'єра Шоттки, передусім на інтерфейсі TiO_2 /верхній платиновий контакт; 3) утворенням та зростанням області нестехіометричного TiO_{2-x} , збагаченого на кисневі вакансії із подальшим його розвитком у бік нижнього платинового контакту, де вже існує аналогічний шар TiO_{2-x} , який виник за рахунок дифузійних процесів при магнетронному напильні та відпалі гетероструктури. Усі три механізми відіграють певну роль у керуванні струмом крізь зразок у залежності від концентрації аналіту, а також від величини та полярності прикладеної напруги.

Цікавим є те, що одночасна залученість трьох вище згаданих фізичних факторів у зразках $Pt/TiO_2/Pt$ із мемристивними властивостями дозволила отримати несподівані результати, особливо у порівнянні із звичайними метал-оксидними сенсорами: по-перше, зразки продемонстрували досить високу чутливість на рівні 5×10^{-4} по відношенню до H_2 , при його концентрації 10000 ppb та малі часи реакції (35 с) і відгуку (180 с) навіть за кімнатної температури. По-друге, виявилось, що присутність водяної пари (дослідження проводилися у сухому повітрі та за відносної вологості 50%) не пригнічує адсорбційну чутливість, а, навпаки, підсилює її до 6×10^{-5} , а часи реакції та відновлення скорочує, відповідно, до 5 та 11 секунд. По-третє, зразки показали досить високу селективність щодо водню: відгуки на близькі концентрації монооксиду вуглецю та діоксиду азоту виявилися більше ніж у десять разів слабшими. По-четверте, ще однією позитивною і корисною якістю стала незалежність величини їхнього відгуку від температури оточуючого середовища, у межах від кімнатної до 100 °С.

Не дивлячись на складний характер фізико-хімічних та електрофізичних процесів, якими супроводжується адсорбція, дисоціація та подальша дифузія водню у чутливий оксидний шар структур Pt/TiO₂/Pt, автори виділяють взаємодію водню із діоксидом титану, формування області, збагаченої на кисневі вакансії та електростимульований рух іонів кисню в напрямку до позитивного електрода, як основні передумови виникнення і приєднання іонної компоненти до електронного струму крізь сенсор, а сам комплекс цих явищ, як головний принцип, закладений у процесі керування електричною провідністю.

Іншим способом підвищення селективності сенсорних систем із залученням напівпровідникових структур із мемристивним характером вольт-амперної характеристики може бути метод вилучення інформаційно важливих параметрів з кінетики адсорбційного відгуку за допомогою гармонічного аналізу сорбційно-стимульованих змін форми струму крізь сенсор при прикладанні до нього синусоїдальної напруги постійної амплітуди [42].

В [43] було показано, що гармонічний аналіз струму крізь газочутливу гетероструктуру ІТО/наноструктурований TiO₂ на скляному субстраті в присутності насиченої пари етанолу, ізопропанолу, води, а також у атмосфері аміаку шляхом застосування швидкого перетворення Фур'є дає змогу отримати характерні для кожної з цих сполук спектри гармонік (рис. 8), за якими можна розрізнити ці сполуки, якщо використати нормовані амплітуди декількох молодших гармонік як вхідні дані для методу головних компонент (МГК).

Гістерезисний характер ВАХ гетероструктури ІТО/наноструктурований TiO₂, як вважають автори, зумовлений ефектами перезаряджання пасткових рівнів інтерфейсу ІТО/ TiO₂ та/або самого оксиду титану (IV), які відіграють важливу роль при формуванні не лише струмового, а й ємнісного відгуку на адсорбцію у подібних структурах [44].

Дана методика продемонструвала добре розділення етанолу, ізопропанолу, води та аміаку при послідовному уведенні аналітів і задовільне розділення аналітів, що належать до

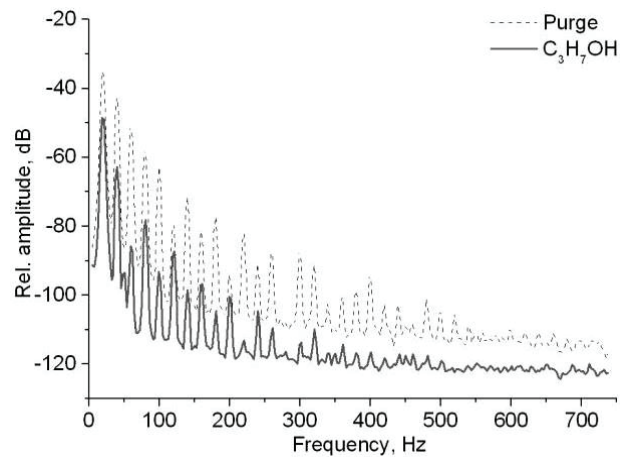


Рис. 8. Гармонічні спектри струму крізь гетероструктуру ІТО/наноструктурований TiO₂ у присутності пари ізопропілового спирту та у лабораторній атмосфері [43].

однієї групи хімічних сполук – групи одноатомних спиртів: метанолу, етанолу, ізопропанолу навіть при їх чергуванні у довільному порядку. Найкращі результати по селективності вдалося отримати за частоти прикладеної напруги 2 Гц і при використанні нормованих амплітуд 6–12 гармонік (рис. 9) [43].

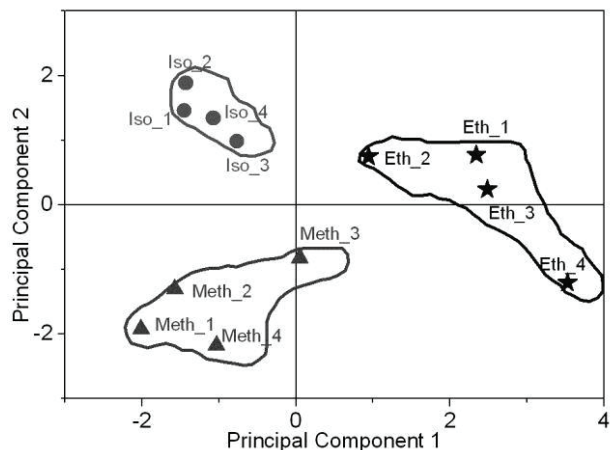


Рис. 9. Графіки рахунків, побудовані за значеннями нормованих амплітуд гармонік (з 6-ї по 12-у включно) спектра струму крізь гетероструктуру ІТО/наноструктурований TiO₂ для насиченої пари метанолу (Meth), етанолу (Eth) та ізопропанолу (Iso) при довільному чергуванні аналітів та частоти зондового сигналу 2 Гц [43].

Гармонічний аналіз у поєднанні із методом головних компонент, по-суті, є однією

з можливих практичних реалізацій способу дослідження ангармонізму вольт-амперних характеристик гетероструктур та впливу на цей ангармонізм адсорбції молекул аналітів з газового середовища, тому коло сенсорних структур, до яких ця методика може бути застосована, не обмежується лише зразками із чітко вираженим мемристорним ефектом.

НОВІТНІ ПІДХОДИ ДО УДОСКОНАЛЕННЯ АРХІТЕКТУРИ СЕНСОРНИХ МАСИВІВ

Початково запропонована архітектура перших модулів енергонезалежної пам'яті із матрицею перехресних контактів та мемристивних структур між ними є дуже зручною з точки зору її застосування для створення багатосенсорних пристроїв типу «електронний ніс». Так, у роботі [45] було проаналізовано надійність, точність та селективність сенсорів із саме такою схемою з'єднання за допомогою комп'ютерного моделювання.

Однією із найважливіших проблем, які виникають при створенні подібних напівпровідникових приладів є так звана проблема *прихованого струмового шляху*, суть якої полягає у тому, що при здійсненні доступу до певної окремої комірки сенсорної матриці для зчитування значення її опору решта комірок неодмінно впливатимуть на результати цих вимірів, а отже і на величину сенсорного відгуку цільової комірки. Авторами [45] розглянуто три різні типи сенсорних масивів:

1) Матрицю з $m \times n$ сенсорних елементів, в якій проблема прихованого струмового шляху вирішується тим, що адсорбційний відгук формується не за значенням опору окремих елементів матриці, а за значенням опору усієї матриці, як єдиного цілого. При цьому автоматично здійснюється усереднення відгуку за рахунок великої кількості комірок із певним розкидом електрофізичних характеристик.

2) Матрицю типу $m(1 \times n)$, що складається із m рядків сенсорних елементів, чутливих до m різних газів, в якій зчитування значення опору здійснюється не по елементах, а по рядках,

і, відповідно, значення адсорбційного відгуку усереднюється за кількістю елементів у окремому рядку, за рахунок чого також можна було б подолати проблему прихованого струмового шляху і реалізувати певну селективність по відношенню до сорту газу.

3) Матрицю типу 1Т1М («один транзистор-один мемристор»), в якій у кожному перехресті контактів знаходиться комбінація із мемристора та польового транзистора, за допомогою якого можливий доступ до будь-якого окремого елемента масиву і зчитування значення його електричного опору без впливу решти елементів.

Результати моделювання за допомогою Verilog-A продемонстрували, що матриці $m \times n$ характеризуються високою надійністю, найнижчим розкидом опору при формуванні відгуку, а отже і високою точністю, але і неможливістю застосування для детектування багатьох різних газів. Матриці типу $m(1 \times n)$ виявилися придатними для детектування досить широкого спектра аналітів із середніми значеннями надійності та точності, а структури «один транзистор-один мемристор» хоча теж продемонстрували свою гнучкість стосовно сорту газу, проте їхня надійність виявилася найнижчою, а розкид значень опору – найвищим.

Показано, що в усіх трьох запропонованих варіантах архітектури проблему прихованого струмового шляху можна успішно вирішити.

У реалізованій на практиці багатосенсорній системі розпізнавання чотирьох хімічних сполук: етанолу, метану, етилену, монооксиду вуглецю [46] роль газочутливих елементів виконують стандартні комерційні метал-оксидні сенсори типів TGS2602, TGS2610, TGS2611 та TGS2612, однак, структури із мемристивними властивостями застосовуються у цій системі для формування остаточного відгуку, на основі якого і здійснюється ідентифікація аналіту.

Така система складається із чотирьох вище згаданих дискретних сенсорів, виходи яких під'єднано до входів *системи резервуарного обчислення (CPO)*, головними елементами якої є мемристори із короткою пам'яттю на основі напівпровідникових структур $W/WO_3/PEDOT$: PSS/Pt, що дає змогу як суттєво спростити кон-

струкцію СРО і підвищити її надійність, так і зменшити рівні її енергоспоживання. Основним призначенням системи резервуарного обчислення є виділення з кривої адсорбційного відгуку кожного із сенсорів певних особливостей, насамперед пов'язаних із кінетикою встановлення та величиною відгуку, зменшення розмірності первинного набору даних про ці особливості, їх кодування у послідовності імпульсів напруги та встановлення певних значень електричної провідності вихідних мемристивних елементів, що відображають набір характерних особливостей для того чи іншого аналізу. Виходи СРО під'єднано до *класифікатора*, роль якого виконує штучна тришарова нейронна мережа, яка складається із штучних нейронів та штучних синапсів на основі мемристивних комірок енергонезалежної пам'яті складу: Pd/W/WO₃/Pd. Сигнал на виході класифікатора і є “вердиктом” стосовно складу аналізованого середовища.

Прототип дозволяє ідентифікувати вище перелічені гази у реальному часі із точністю на рівні 95%, а застосування різних підходів до спрощення процедури виділення адсорбційних особливостей, зокрема, часової, просторової та часово-просторової стратегій, дає можливість також додатково спростити конструкцію системи резервуарного обчислення та класифікатора і, як наслідок, підвищити швидкодію та зменшити рівні енергоспоживання без помітного зниження точності детектування різних компонентів газового середовища.

Крім того, автори роботи [46] запевняють, що запропонована ними концепція газоаналізу дозволяє також знівелювати негативний вплив таких шкідливих явищ, як довгострокова варіація та часовий дрейф параметрів сенсорів на селективність системи у цілому.

Підвищити точність визначення концентрації цільового аналіту за допомогою масивів мемристивних сенсорів, а також зменшити вплив опору з'єднувальних провідників можна, зокрема, шляхом підбору оптимальної кількості сенсорних комірок у матриці [47]. З цією ж метою, як альтернативу матрицям із перехресними контактами, що вже стали традиційними у різного роду “електронних носачах”, у [48] запропоновано три нові архітектури сенсорних масивів, що мають ряд серйозних переваг: *рекурсивну, паралельну та гібридну*. В кожній з цих архітектур елементарною коміркою масиву є чотири класичні мемристори на основі газочувливих шарів TiO₂, з'єднані у мостову схему. Рекурсивна архітектура передбачає фрактальне відтворення структури елементарної комірки на більш високих рівнях масиву: як мемристори з'єднані у мостову схему всередині окремої елементарної комірки, так само і самі комірки з'єднані у мостові розгалуження і так далі (рис. 10а). У паралельній архітектурі елементарні комірки, відповідно, з'єднані паралельно (рис. 10б), а у гібридній – паралельно з'єднаними є фрагменти схеми із рекурсивним сполученням елементарних комірок.

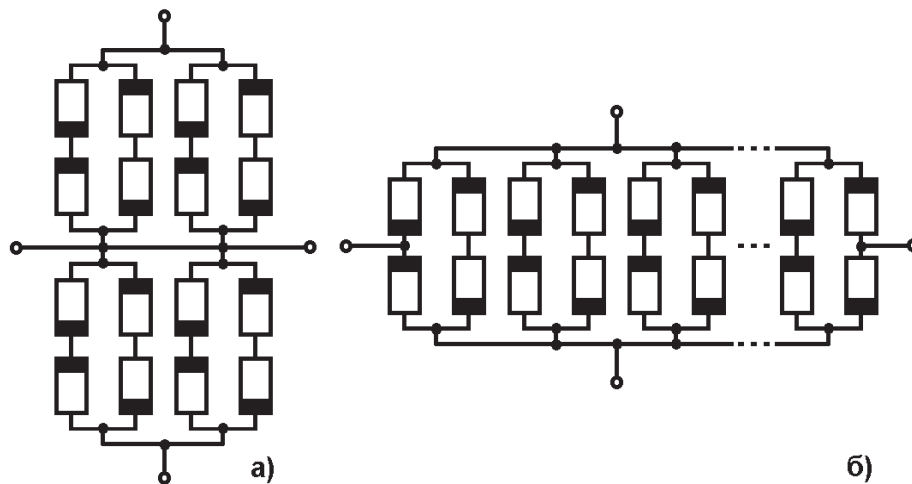


Рис. 10. Рекурсивна (а) та паралельна (б) архітектури масивів мемристивних сенсорів.

Фізична суть одного з удосконалень сформульована авторами у формі запропонованої ними концепції *мемристивного збільшення*, відповідно до якої, застосування мемристорів у ролі газочутливих елементів сенсорної матриці дозволяє збільшити невеликий «вхідний» опір сенсора з метою зниження рівня енергоспоживання при зчитуванні величини його адсорбційного відгуку.

Аналіз результатів комп'ютерного моделювання даних електричних кіл показав, що усі три вище згадані архітектури відрізняються підвищеною стійкістю до варіацій технологічних параметрів окремих мемристорів та їхнього старіння, зниженими рівнями енергоспоживання (як мінімум у чотири рази у порівнянні із матрицями із перехресними контактами) і зменшеною чутливістю до впливу опору з'єднувальних провідників на величину адсорбційного відгуку сенсора. Проте, найкращі параметри продемонструвала саме схема із рекурсивним сполученням елементарних комірок.

ВИСНОВКИ

Прогрес у подоланні проблеми недостатньої селективності сенсорних систем наразі є досить повільним: традиційні прості методики розпізнавання запахів є лише частковим вирішенням. Значно кращих результатів вдалося досягти при використанні багатосенсорних систем типу «електронний ніс», але складність їх виготовлення і калібрування, висока вартість та нестабільність відгуку при зміні параметрів оточуючого середовища є суттєвими недоліками, що гальмують упровадження таких систем у сучасну апаратуру для газоаналізу.

Разом, з цим, перехідні процеси у напівпровідникових структурах, зокрема ті, що зумовлюють мемристивні властивості останніх, традиційно довгий час розглядалися як першопричина шкідливих, паразитних явищ у сенсорних комітках, таких, наприклад, як виникнення гістерезису. Проте, результати досліджень останніх 10–12 років доводять перспективність застосування цих перехідних процесів для вирішення певних специфічних задач газоаналізу, а також придатність газочутливих мемристорів

(газисторів) для застосування у ролі елементів складних нейроморфних систем розпізнавання запахів.

Упровадження мемристивних технологій у галузь аналітичного приладобудування здатне вирішити і ряд проблем, пов'язаних, наприклад, із недостатньою чутливістю біосенсорів, деградацією адсорбційної чутливості газових сенсорів із часом, а також варіаціями їхніх параметрів у процесі виготовлення, що дозволить суттєво підвищити відтворюваність характеристик та точність вимірювання концентрації цільового аналіту у майбутньому. Це можливо завдяки самому принципу формування відгуку у комітках із енергонезалежною пам'яттю, що автоматично нівелює вплив вище згаданих факторів. Крім того, перспективним також є поєднання великої кількості мемристорів у інтегровані схеми різної архітектури з цією ж метою.

Заслугує на увагу також суттєвий прогрес у зниженні рівнів енергоспоживання чутливих комірок, здатних працювати за кімнатних температур, досягнутий завдяки використанню мемристорів, а також можливість скорочення часу їхнього відновлення після впливу аналіту до десятків наносекунд шляхом прикладання імпульсу перемикаючої напруги. Все це робить такі структури значно більш сумісними із мобільними пристроями із акумуляторним живленням у порівнянні із звичайними металоксидними сенсорами із високою споживаною потужністю.

У деяких випадках, навіть, вдається помітно зменшити температурну залежність величини відгуку чутливих структур у досить широких межах, однак паразитні впливи варіацій температури та відносної вологості оточуючого середовища на функціонування таких сенсорів, нажаль, все ще лишаються неподоланою проблемою сучасної сенсорної електроніки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1]. Gas sensor market size, share & trends analysis report by product (oxygen/lambda sensors, carbon dioxide sensors), by type (wired, wireless), by technology, by end-use, by region, and segment

- forecasts, 2023–2030. Grand View Research: website. URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/gas-sensors-market> (accessed on 19.09.2023).
- [2]. M. Phillips, J. Herrera, S. Krishnan, M. Zain, J. Greenberg, R.N. Cataneo. Variation in volatile organic compounds in the breath of normal humans // *J. Chromatogr. B Biomed. Sci. Appl.* 729(1–2). pp. 75–88 (1999). DOI: 10.1016/S0378-4347(99)00127-9.
- [3]. B. Behera, R. Joshi, G.K.A. Vishnu, S. Bhalerao, H.J. Pandya. Electronic nose: a non-invasive technology for breath analysis of diabetes and lung cancer patients // *J. Breath. Res.* 13(2). p. 024001 (2019). DOI: 10.1088/1752-7163/aafc77.
- [4]. D. K. Nurputra, A. Kusumaatmaja, M. S. Hakim, S.N. Hidayat, T. Julian, B. Sumanto, Y. Mahendradhata, A. M. I. Saktiawati, H. S. Wasisto, K. Triyana. Fast and noninvasive electronic nose for sniffing out COVID-19 based on exhaled breath-print recognition // *NPJ Digit. Med.* 5(1). p. 115 (2022). DOI: 10.1038/s41746-022-00661-2.
- [5]. J. Guillot. E-noses: actual limitations and perspectives for environmental odour analysis. *Chem. Eng. Trans.* 54. p. 223–228 (2016). DOI: 10.3303/CET1654038.
- [6]. L. O. Chua. Memristor – the missing circuit element // *IEEE Trans. Circuit Theory.* 18(5). pp. 507–519 (1971). DOI: 10.1109/TCT.1971.1083337.
- [7]. R. S. Williams. How we found the missing memristor // *IEEE Spectr.* 45(12). pp. 28–35 (2008). DOI: 10.1109/MSPEC.2008.4687366.
- [8]. F. Argall. Switching phenomena in titanium oxide thin films // *Solid-State Electron.* 11(5). pp. 535–54 (1968). DOI: 10.1016/0038-1101(68)90092-0.
- [9]. D. B. Strukov, G. S. Snider, D. R. Stewart, R. S. Williams. The missing memristor found // *Nature.* 453(7191). pp. 80–83 (2008). DOI:10.1038/nature06932.
- [10]. L. O. Chua, S.M. Kang. Memristive devices and systems // *Proc. IEEE.* 64(2). pp. 209–223 (1976). DOI: 10.1109/PROC.1976.10092.
- [11]. S. P. Adhikari, M. P. Sah, H. Kim, L. O. Chua. Three fingerprints of memristor // *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers.* 60(11). pp. 3008–3021 (2013). DOI: 10.1109/TCSI.2013.2256171.
- [12]. D. Biolek, Z. Biolek, V. Biolkova. Pinched hysteretic loops of ideal memristors, memcapacitors and meminductors must be ‘self-crossing’ // *Electron. Lett.* 47(25). pp. 1385–1387 (2011). DOI:10.1049/el.2011.2913.
- [13]. Memristors and memristive systems. Edited by R. Tetzlaff. New York, USA: Springer, 2014. 422 p.
- [14]. K. Terabe, T. Hasegawa, T. Nakayama, M. Aono. Quantized conductance atomic switch // *Nature.* 433(7021). pp. 47–50 (2005). DOI:10.1038/nature03190.
- [15]. S.H. Jo, T. Chang, I. Ebong, B.B. Bhadviya, P. Mazumder, W. Lu. Nanoscale memristor device as synapse in neuromorphic systems // *Nano Lett.* 10(4). pp. 1297–1301 (2010). DOI: 10.1021/nl904092h.
- [16]. W. Chen, S. Tappertzhofen, H.J. Barnaby, M.N. Kozicki. SiO₂ based conductive bridging random access memory // *J. Electroceram.* 39(1–4). pp. 109–131 (2017). DOI: 10.1007/s10832-017-0070-5.
- [17]. M. Thammasack, G. De Micheli, P.-E. Gaillardon. Effect of O²⁻ migration in Pt/HfO₂/Ti/Pt structure // *J. Electroceram.* 39(1–4). pp. 137–142 (2017). DOI: 10.1007/s10832-017-0077-y.
- [18]. T. Tsuruoka, T. Hasegawa, K. Terabe, M. Aono. Operating mechanism and resistive switching characteristics of two- and three-terminal atomic switches using a thin metal oxide layer // *J. Electroceram.* 39(1–4). pp. 143–156 (2017). DOI: 10.1007/s10832-016-0063-9.
- [19]. D. Kuzum, R.G.D. Jeyasingh, B. Lee, H.-S.P. Wong. Nanoelectronic programmable synapses based on phase change materials for brain-inspired computing // *Nano Lett.* 12(5). pp. 2179–2186 (2012). DOI: 10.1021/nl201040y.
- [20]. S. Bagdzevicius, K. Maas, M. Boudard, M. Burriel. Interface-type resistive switching in perovskite materials // *J. Electroceram.* 39(1–4). pp. 157–184 (2017). DOI: 10.1007/s10832-017-0087-9.
- [21]. X. Zou, H.G. Ong, L. You, W. Chen, H. Ding, H. Funakubo, L. Chen, J. Wang. Charge trapping-detrapping induced resistive switching

in $\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{TiO}_3$ // *AIP Adv.* 2. p. 032166 (2012). DOI: 10.1063/1.4754150.

[22]. Z. Fan, H. Fan, L. Yang, P. Li, Z. Lu, G. Tian, Z. Huang, Z. Li, J. Yao, Q. Luo, C. Chen, D. Chen, Z. Yan, M. Zeng, X. Lu, X. Gao, J.-M. Liu. Resistive switching induced by charge trapping/detrapping: a unified mechanism for colossal electroresistance in certain Nb: SrTiO_3 -based heterojunctions // *J. Mater. Chem. C* 5. pp. 7317–7327 (2017). DOI: 10.1039/C7TC02197F.

[23]. H.-D. Kim, K. H. Kim, H.-M. An, T. G. Kim. Charge-trap flash memory using zirconium-nitride-based memristor switches // *J. Phys. D Appl. Phys.* 48. p. 445102 (2014). DOI: 10.1088/0022-3727/48/44/445102.

[24]. V. Nguyen, P. Lee. Coexistence of write once read many memory and memristor in blend of poly(3,4-ethylenedioxythiophene): polystyrene sulfonate and polyvinyl alcohol // *Sci. Rep.* 6. p. 38816 (2016). DOI: 10.1038/srep38816.

[25]. U. Koch, C. Hoessbacher, A. Emboras, J. Leuthold. Optical memristive switches // *J. Electroceram.* 39(1–4). 2017. Vol. 39 (1–4). pp. 239–250 (2017). DOI: 10.1007/s10832-017-0072-3.

[26]. *Advances in memristors, memristive devices and systems.* Edited by S. Vaidyanathan and C. Volos. New York, USA: Springer, 2017. 524 p.

[27]. *Memristor networks.* Edited by A. Adamatzky and L. Chua, New York, USA: Springer, 2014. 737 p.

[28]. A. Adeyemo, A. Jabir, J. Mathew, E. Martinelli, C. Di Natale, M. Ottavi. Reliable gas sensing with memristive array // *Proc. 2017 IEEE23rd International Symposium on On-Line Testing and Robust System Design (IOLTS)* (July 3–5, Thessaloniki, Greece). pp. 244–246 (2017). DOI: 10.1109/IOLTS.2017.8046228.

[29]. S. Carrara, D. Sacchetto, M.-A. Doucey, C. Baj-Rossi, G. De Micheli, Y. Leblebici. Memristive-biosensors: A new detection method by using nanofabricated memristors // *Sens. Actuators B Chem.* 171–172. pp. 449–457 (2012). DOI: 10.1016/j.snb.2012.04.089.

[30]. S. Carrara. The birth of a new field: memristive sensors. A review // *IEEE Sensors J.* 21(11). pp. 12370–12378 (2021). DOI: 10.1109/JSEN.2020.3043305.

[31]. F. Puppo, A. Dave, M.-A. Doucey, D. Sacchetto, C. Baj-Rossi, Y. Leblebici, G. De Micheli, S. Carrara. Memristive Biosensors Under Varying Humidity Conditions // *IEEE Trans. Nanobiosci.* 13(1). pp. 19–30 (2014). DOI: 10.1109/TNB.2013.2295517.

[32]. M. Vidiš, T. Plecenik, M. Moško, S. Tomašec, T. Roch, L. Satrapinsky, B. Grančič, A. Plecenik. Gasistor: A memristor based gas-triggered switch and gas sensor with memory // *Appl. Phys. Lett.* 115. 093504 (2019). DOI: 10.1063/1.5099685.

[33]. D. Lee, M. J. Yun, K. H. Kim, S. Kim, H.-D. Kim. Advanced recovery and high-sensitive properties of memristor-based gas sensor devices operated at room temperature // *ACS Sens.* 6(11). pp. 4217–4224 (2021). DOI: 10.1021/acssensors.1c01840.

[34]. M. Chae, D. Lee, J. Jung, H.-D. Kim. Enhanced memristor-based gas sensor for fast detection using a porous carbon nanotube top electrode with membrane // *Cell Rep. Phys. Sci.* 4. 101659 (2023). DOI: 10.1016/j.xcrp.2023.101659.

[35]. D. Lee, J. Jung, K. H. Kim, D. Bae, M. Chae, S. Kim, H.-D. Kim. Highly sensitive oxygen sensing characteristics observed in IGZO based gasistor in a mixed gas ambient at room temperature // *ACS Sens.* 7(9). pp. 2567–2576 (2022). DOI: 10.1021/acssensors.2c00484.

[36]. M. Chae, D. Lee, H.-D. Kim. Low-power consumption IGZO memristor-based gas sensor embedded in an Internet of Things monitoring system for isopropanol alcohol gas // *Micromachines.* 15(1). pp. 77–88 (2024). DOI: 10.3390/mi15010077.

[37]. T. Kim, D. Lee, M. Chae, K.-H. Kim, H.-D. Kim. Enhancing the resistive switching properties of transparent HfO_2 -based memristor devices for reliable gasistor applications // *Sensors.* 24. pp. 6382–6393 (2024). DOI: 10.3390/s24196382.

[38]. N. S. M. Hadis, A. A. Manaf, S. H. Herman, S. H. Ngalim. High $R_{\text{off}}/R_{\text{on}}$ ratio liquid based memristor sensor using sol gel spin coating technique // *Proc. 2015 IEEE SENSORS* (November 1–4, 2015, Busan, Korea). pp. 1–4 (2015). DOI: 10.1109/ICSENS.2015.7370379.

- [39]. N. S. M. Hadis, A. A. Manaf, S. H. Herman. Comparison on TiO_2 thin film deposition method for fluidic based glucose memristor sensor // Proc. 2015 IEEE International Circuits and Systems Symposium (ICSS) (September 2–4, 2015, Langkawi, Malaysia). pp. 36–39 (2015). DOI: 10.1109/CircuitsAndSystems.2015.7394060.
- [40]. N. S. M. Hadis, A. A. Manaf, S. H. Ngali, S. H. Herman. Fabrication and characterisation of fluidic based memristor sensor for liquid with hydroxyl group // Sens. Bio-Sens. Res. 14, pp. 21–29 (2017). DOI: 10.1016/j.sbsr.2017.04.002.
- [41]. A. A. Haidry, A. Ebach-Stahl, B. Saruhan. Effect of Pt/TiO_2 interface on room temperature hydrogen sensing performance of Memristor type $\text{Pt/TiO}_2/\text{Pt}$ structure // Sens. Actuators B Chem. 253. pp. 1043–1054 (2017). DOI: 10.1016/j.snb.2017.06.159.
- [42]. Kostiukevych O. M. Vplyv perekhidnykh protsesiv na formuvannia adsorbtsiinoho vidhuku sensorykh struktur na osnovi nanomaterialiv: avtoref. ... dys. kand. fiz.-mat. nauk: 11.06.24. Kyiv, 2024. 20 s. (In Ukrainian).
- [43]. V. A. Skryshevsky, O. M. Kostiukevych, I. I. Ivanov. Application of harmonic analysis and principal component analysis for discrimination of adsorbates in gas-sensitive ITO/nanostructured TiO_2 heterojunction // J. Nano- Electron. Phys. 14(1). 01005–1–01005–5 (2022). DOI: 10.21272/jnep.14(1).01005.
- [44]. V. Skryshevsky, O. Kostiukevych, I. Ivanov. ITO-nano-titania gas sensors at adsorption of ethanol, acetone and water molecules // Proc. 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2018) (April, 24–26, 2018, Kyiv, Ukraine). P. 41–45 (2018).
- [45]. A. Adeyemo, J. Mathew, A. Jabir, C. Di Natale, E. Martinelli, M. Ottavi. Efficient sensing approaches for high-density memristor sensor array // J. Comput. Electron. 17. pp. 1285–1296 (2018). DOI: 10.1007/s10825–018–1176-y.
- [46]. T. Wang, H.-M. Huang, X.-X. Wang, X. Guo. An artificial olfactory inference system based on memristive devices // InfoMat. 3. pp. 804–813 (2021). DOI: 10.1002/inf2.1219610.1002/inf2.12196.
- [47]. M. Ottavi, V. Gupta, S. Khandelwal, S. Kvatinsky, J. Mathew, E. Martinelli, A. Jabir. The missing applications found: Robust design techniques and novel uses of memristors // Proc. 25th International Symposium on On-Line Testing and Robust System Design (IOLTS2019) (July 1–3, 2019, Rhodes, Greece). pp. 159–164 (2019). DOI: 10.1109/IOLTS46816.2019.
- [48]. S. Khandelwal, M. Ottavi, E. Martinelli, A. Jabir. Low power memristive gas sensor architectures with improved sensing accuracy // J. Comput. Electron. 21. pp. 1005–1016 (2022). DOI: 10.1007/s10825–022–01890–0.

Стаття надійшла до редакції 19.11.2024 р.

PACS 07.07.Df, 87.19.lt, 73.40.-c, 02.30.Ik
DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.4.315567>

CHEMICAL SENSORS WITH MEMRISTIVE PROPERTIES: REVIEW

O. M. Kostiukevych¹, V. A. Skryshevsky²

¹ Taras Shevchenko National University of Kyiv, Faculty of Radiophysics, Electronics and Computer Systems, 4g Akademika Hlushkova Av, Kyiv, Ukraine, mirror@ukr.net;

² Taras Shevchenko National University of Kyiv, Educational Scientific Institute of High Technologies, 4g Akademika Hlushkova Av, Kyiv, Ukraine.

Summary

Since 53 years after the first theoretical description of the memristor phenomenon and 16 years after the creation of the first memristor prototype, at least about a dozen different physical mechanisms for electrical resistance switching in semiconductor structures created using a wide variety of chemical compounds and nano-objects were proposed and implemented in practice: from simple double-layer oxide films to complex nanomechanical systems. However, the idea of using structures with non-volatile memory to detect and identify the antibodies or components of the gaseous environment began to arouse interest among scientists only in the last 10–12 years.

The occurrence of this new physical and technological direction, associated with the introduction of non-volatile memory technologies into the field of analytical instrumentation, is certainly caused by the modern surge of interest in the possibility of applying the principles of artificial intelligence and machine learning for the implementation of electronic devices that would be able to simulate the functioning not only the sense organs of living beings, but also those areas of their brains that are directly responsible for processing information received from sensitive receptors and forming analytical images of the environment with which these beings come into contact based on it.

This article provides a brief overview of the results of not numerous yet, but interesting studies, the goal of which is the combination of two key properties of the semiconductor structures considered by the authors: 1) sensitivity to the biomolecules or to the adsorption of molecules from the gaseous medium, which makes them similar to the receptors of olfactory neurons; 2) the ability to «remember» their previous electrophysical state after exposure to the analyte, which makes them similar to the synapses of the nervous system.

The analysis of literature data shows that the most suitable and promising types of memristors that could be used to solve the problem of creating neuromorphic chemo-sensitive systems, in particular, are nanoionic memristors based on the effects of valence changes and electronic memristors based on the effects of charge trapping/detrapping.

The use of memristive properties in gas sensors can also solve a number of other less complex problems that are not directly related to the creation of multisensory analogs of the olfactory organs of mammals, namely: to reduce the levels of degradation of the adsorption sensitivity of gas sensors over time by leveling the influence of the variation of their parameters due to aging, to increase the accuracy of concentration measurements and performance as well as to reduce energy consumption levels in devices that perform certain detection and signaling functions. All these topics are also discussed in the article.

Keywords: gas sensor, biosensor, heterostructure, nanomaterials, memristor, gasistor, hysteresis

PACS 07.07.Df, 87.19.lt, 73.40.-c, 02.30.Ik

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.4.315567>

ХІМІЧНІ СЕНСОРИ ІЗ МЕМРИСТИВНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ (ОГЛЯД)

О. М. Костюкевич¹, В. А. Скришевський²

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, факультет радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем, просп. Академіка Глушкова 4г, м. Київ, Україна, mirror@ukr.net;

²Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Навчально-науковий інститут високих технологій, просп. Академіка Глушкова 4г, м. Київ, Україна.

Реферат

Через 53 роки після першого теоретичного опису мемристорного ефекту та через 16 років після створення першого прототипу мемристора було запропоновано і реалізовано на практиці щонайменше десятка різних фізичних механізмів перемикавання електричного опору у напівпровідникових структурах, створених із використанням найрізноманітніших хімічних сполук та наноб'єктів: від простих двошарових оксидних плівок до складних наномеханічних систем, однак ідея застосування структур із енергонезалежною пам'яттю для детектування та ідентифікації антигенів або компонентів газового середовища почала викликати інтерес у науковців лише в останні 10–12 років.

Виникнення цього нового фізико-технологічного напрямку, пов'язаного із упровадженням технологій енергонезалежної пам'яті у сферу аналітичного приладобудування, безумовно, є спричиненим сучасним сплеском інтересу до можливості застосування принципів штучного інтелекту та машинного навчання для реалізації електронних приладів, які були б здатні імітувати функціонування не лише органів чуття живих істот, а і тих ділянок їхнього мозку, які безпосередньо відповідальні за обробку отриманої від чутливих рецепторів інформації та формування на її основі аналітичних образів середовища, з яким ці істоти контактують.

В даній статті наводиться стислий огляд результатів тих, поки що не чисельних, але цікавих досліджень, за мету яких автори поставили поєднання двох ключових властивостей розглянутих ними напівпровідникових структур: 1) чутливості до біомолекул або до адсорбції з газового середовища, що споріднює їх із рецепторами нюхових нейронів; 2) здатності “запам'ятовувати” свій попередній електрофізичний стан після впливу аналіту, що робить їх подібними до синапсів нервової системи.

Аналіз літературних даних показує, що найбільш придатними і перспективними типами мемристорів, які можна було б використати для вирішення задачі створення нейроморфних хемосенсорних систем, зокрема, є наноіонні мемристори на ефекті зміни валентності та електронні мемристори на основі ефектів перезарядження пасткових рівнів.

Використання мемристорного ефекту у сенсорній електроніці здатне вирішити і ряд інших не таких комплексних проблем, що безпосередньо не пов'язані із створенням багатосенсорних аналогів нюхових органів ссавців, а саме: знизити рівні деградації адсорбційної чутливості газових сенсорів з часом шляхом нівелювання впливу варіації їхніх параметрів за рахунок старіння, підвищити точність вимірів концентрації і швидкодію, знизити рівні енергоспоживання у приладах, які виконують певні детектуючо-сигналізуючі функції. Про все це також йдеться у даній статті.

Ключові слова: газовий сенсор, біосенсор, гетероструктура, наноматеріали, мемристор, газистор, гістерезис

ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА СЕНСОРІВ

SENSORS PRODUCTION TECHNOLOGIES

PACS 81.07.Lk, 73.40.Cg

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.4.318866>

ФОРМУВАННЯ ОМІЧНОГО КОНТАКТУ В МІКРОЕЛЕКТРОННИХ ПРИБОРАХ З ПІДКЛАДКАМИ ЗІ ШПАРИСТОЮ ПОВЕРХНЕЮ

Я. І. Лепіх, І. К. Дойчо, А. П. Балабан

Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр МОН і НАН України
при Одеському національному університеті імені І. І. Мечникова
e-mail: ndl_lepikh@onu.edu.ua

ФОРМУВАННЯ ОМІЧНОГО КОНТАКТУ В МІКРОЕЛЕКТРОННИХ ПРИБОРАХ З ПІДКЛАДКАМИ ЗІ ШПАРИСТОЮ ПОВЕРХНЕЮ

Я. І. Лепіх, І. К. Дойчо, А. П. Балабан

Анотація. В технології приладобудування, зокрема технології елементної бази електроніки, (гібридні інтегральні схеми (ГІС), сенсори різного призначення тощо), що використовує ансамблі наночастинок напівпровідникових та інших матеріалів у шпаристій матриці, нерідко мають місце проблеми формування омичних контактів до зазначених систем особливо коли використовуються в якості підкладок матеріали зі шпаристою поверхнею. А, як відомо, якість контактів головним чином визначає надійність пристроїв, систем і радіоелектронної апаратури в цілому. Нами запропоновано і досліджено новий ефективний спосіб формування омичного контакту на підкладах зі шпаристою поверхнею, зокрема, скла.

Ключові слова: омичний контакт, шпариста поверхня підкладки, силікатне скло

FORMATION OF OHMIC CONTACT IN MICROELECTRONIC DEVICES WITH POROUS SURFACE SUBSTRATES

Ya. I. Lepikh, I. K. Doycho, A. P. Balaban

Abstract. In the technology of instrument-making, in particular the technology of the element base of electronics (hybrid integrated circuits, sensors for various purposes, etc.), which uses ensembles of nanoparticles of semiconductor and other materials in a porous matrix, there are often problems with the formation of ohmic contacts to the specified systems. Especially when materials with a porous surface are used as substrates. And, as is known, the quality of contacts mainly determines the reliability of devices, systems and radio-electronic equipment in general. We have proposed and investigated a new effective method of forming an ohmic contact on substrates with a porous surface, in particular, glass.

Keywords: ohmic contact, porous surface of the substrate, silicate glass

© Я. І. Лепіх, І. К. Дойчо, А. П. Балабан, 2024

Вступ

В [1] виготовлення омичних контактів до планарної поверхні структури із локальними ділянками низьколегованих напівпровідників групи A^3B^5 здійснюється шляхом нанесення на напівпровідникову структуру діелектричної плівки діоксиду кремнію із подальшим нанесенням на неї допоміжної плівки оксиду Європію. Наявність допоміжної плівки полегшує процес впалювання контактів на базі золота із легуючими домішками і надалі вона усувається хімічною обробкою. Проте зазначений спосіб не є придатним для формування контактів на підкладках з шпаристою поверхнею із досить високим власним електричним опором.

Є також спосіб виготовлення омичною контакту «метал-напівпровідник» шляхом регулювання імпедансу границі розділу бар'єру Шоткі при виготовленні польових транзисторів, у якому після очищення контактних поверхонь бомбардуванням йонами Ar , на них наноситься комбінація провідної і непровідної плівок [2]. При цьому всередині ізолюючої плівки утворюється збагачений шар заряду, який являє собою тунельний бар'єр із опором, зневажливим у порівнянні із опором бар'єра Шоткі, що виникає при безпосередній металізації. Зазначений спосіб не є придатним для шпаристих підкладок через суттєву ніздрюватість поверхні і досить великий власний опір.

В [3] виготовлення омичного контакту на GaN n -типу здійснюється із застосуванням попередньої плазмової обробки поверхні зразка газоподібним хлором. При цьому металічні контакти являють собою шари титану та алюмінію, що чергуються. Метод є застосовним переважно для пластин GaN n -типу зі структурою вюртциту, які леговано кремнієм.

На першому етапі виготовлення за цим методом поверхня зразка, на якій має бути сформовано контакт, обробляється травленням у індуктивно-зв'язаній плазмі хлору із метою очищення від оксиду і формування поруватої поверхні для кращої адгезії.

На другому етапі пластина GaN підготовленими поверхнями зануряється у розчин HCl із метою збагачення виниклих на першому етапі

вакансій азоту носіями струму для створення у зразку прошарку із підвищеною провідністю.

На третьому етапі цього методу на оброблені на перших двох етапах поверхні наносяться послідовно титанові та алюмінієві шари. Титан має кращу адгезію до GaN , а алюміній має менший електричний опір. При такому способі виникає омичний контакт до пластин GaN .

Вище вказані методи мають очевидні недоліки як за якістю так і за складністю технології.

Спосіб і результати його реалізації

Для виготовлення надійного омичного контакту до шпаристої підкладки використовували запропонований цілком інший підхід, що базується на використанні міжшпаринних порожнин для формування ансамблю наночастинок з провідної речовини [4]. Для дослідження обрані підкладки зі шпаристого скла.

Провідною речовиною обрано вуглець у формі графіту, і формування графітового шару з зовнішнього боку поверхні шпаристого скла забезпечує досить надійний омичний контакт. Зазначений шар погано утримується на поруватій поверхні шпаристого зразка. Проте, саме завдяки шпаристості, зразки скла насичуються розчином речовини, що містить вуглець у своєму складі, із подальшим його поновленням безпосередньо у шпаринах. Запропонований спосіб складається, з двох простих операцій.

При цьому перший етап – своєрідний електронний «терпуг» [3] є цілком зайвим у запропонованому нами способі для шпаристого скла, бо його поверхня одразу є доволі поруватою. До того ж, хімічно воно являє собою майже чистий оксид кремнію у формі кварцу, тобто операції очищення від оксиду не потребує.

Застосування обробки в HCl також виключається у нашому випадку для шпаристого скла, бо воно аж ніяк не реагує із HCl і його взаємодія із цією речовиною здатна лише тимчасово змінити розподіл заряду всередині шпарин, що зовсім не призводить до виникнення провідного прошарку.

Не є необхідним пошарове нанесення Ti і Al для шпаристого скла, бо напилення металу

на порувату поверхню шпаристого скла із метою створення будь-якого контакту немає сенсу: метал просто відшаровуватиметься від неї.

Першою операцією здійснюється часткове занурення зразка шпаристого скла торцем у розчин глюкози. Занурюючи торець пластини у зазначений розчин завглибшки на $0.5 \div 1$ мм, отримують умови, що забезпечують дифузію зі сталого джерела. При цьому за певний час на певній відстані від межі розділу між розчином глюкози та пластиною виникає розподіл концентрації глюкози, що підпорядковується другому закону Фіка.

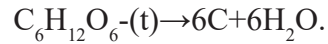
Аналог коефіцієнта дифузії в цьому випадку називають коефіцієнтом просочування. На відміну від коефіцієнту дифузії він описує проникнення не окремих атомів домішки у міжатомний простір зразка, а просочування досить великих молекул глюкози у нанощпарини шпаристого скла, які у порівнянні із міжатомними відстанями теж досить великі (від 20 до понад 100 нм). Коефіцієнт просочування залежить від типу скла, точніше таких його параметрів, як шпаристість, розподілення шпарин за розмірами, наявності залишкового силікагелю у шпаринах та його кількості, а також від температури, при якій здійснюється просочування.

Розподілення глюкози всередині пластини шпаристого скла після насичення нею зразка з обох торців схематично зображено на рис. 1. Пунктирною лінією позначено глибину занурення пластини у розчин. Обидві криві відображають зменшення концентрації просоченої глюкози при віддаленні від джерела просочування.



Рис. 1. Розподіл глюкози в пластині шпаристого скла.

Друга операція, на відміну від вільної від термообробки в [3] полягає саме у низькотемпературному відпалі зразка з метою термічного розкладання просоченої глюкози безпосередньо всередині шпарин до вуглецю у формі графіту згідно відомого рівняння:



Під час відпалу одночасно із терморозкладанням глюкози відбувається розганяння графіту, що утворюється. Цей процес є певним аналогом задачі щодо дифузії з обмеженого джерела і розподілення наночастинок графіту у сформованому зазначеною вище термообробкою ансамблі зображено на рис. 2. Тут зображені криві відповідають зменшенню кількості графіту у шпаристому склі при віддаленні від торця пластини.

Порівняння зображень на рис. 1 та рис. 2 демонструє, що частинки графіту у сформованому ансамблі, на відміну від наночастинок глюкози, сконцентровано переважно біля торців і при віддаленні від них зазначена концентрація досить швидко сходиться нанівель. Таким чином з локацією на торцях пластини утворюються ділянки із підвищеною провідністю, наявність яких не впливає на властивості решти зразка пластини.

За допомогою обробки місця, де сконцентровано наночастинок графіту, силіконовою або іншою провідною пастою на торцях зразка виникає омичний контакт до пластини шпаристого скла, що характеризується високою адгезією і низьким електричним опором.



Рис. 2. Розподіл глюкози в пластині шпаристого скла.

На практиці операція занурення пластини силікатного шпаристого скла будь-якого типу здійснюється впродовж 20 годин на глибину 1 мм у 40-відсотковий розчин глюкози у воді при кімнатній температурі із наступним відпалом при 180 °С протягом 2 годин. При цьому забезпечується отримання надійного омичного контакту не гірше 4 Ом/см² при використанні індій-галієвої пасти на ділянці, що містить графіт, з адгезією не гірше 100 кг/см².

Запропонованим способом, в якому вилучено низку технологічних операцій у порівнянні із [1–3], виготовлено серію зразків мікроелектронних виробів, зокрема сенсорів із суттєво кращими за адгезією і провідністю контактами.

Отримані результати досліджень можуть бути корисними при розробці мікроелектронних пристроїв різного функціонального призначення.

Висновки

1. Запропонований і описаний спосіб формування омичного контакту на пористих

поверхнях підкладок характеризується високою технологічністю внаслідок вилучення з технологічного процесу низку трудомістських і різномановних операцій.

2. Спосіб дозволяє отримати омичні контакти високої провідності і високої адгезії.

Список використаної літератури

[1]. Mineeva M.A., Mooreakaeva G.A. Patent RF № 2084988. 20.07.1997, МПК H01L21/28 (in Russian).

[2]. W.X. Schroen, F.A. Padovani, and H.P.K. Hentschel. US patent 3983264A, Feb. 2, 2011, МПК H01L29/452.

[3]. Jong Lam 25 Lee, Ho Won Jang, Jong Kyu Kim, and Changmin Jeon. US patent 7214325B2. May 08, 2007, МПК H01L21/28575.

[4]. Doycho I. K., Lepikh Ya. I. Sposib vyhotovlennia omichnoho kontaktu do shparystoho skla Vynakhid PU228932. Data, z yakoi ye chynnymy prava: 28.11.2024. Zayavka a202202804 vid 05.08.2022 (in Ukrainian).

Стаття надійшла до редакції 01.12.2024 р.

PACS 81.07.Lk, 73.40.Cg

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.4.318866>

FORMATION OF OHMIC CONTACT IN MICROELECTRONIC DEVICES WITH POROUS SURFACE SUBSTRATES

Ya. I. Lepikh, I. K. Doycho, A. P. Balaban

Interdepartmental Scientific-Educational Physics and Technical Center of MES and NAS of Ukraine at Odesa I. I. Mechnikov National University,
e-mail: ndl_lepikh@onu.edu.ua

Summary

In the technology of instrument-making, in particular the technology of the element base of electronics (hybrid integrated circuits, sensors for various purposes, etc.), which uses ensembles of nanoparticles of semiconductor and other materials in a porous matrix, there are often problems with the formation of ohmic contacts to the specified systems. Especially when materials with a porous surface are used as substrates. And, as is known, the quality of contacts mainly determines the reliability of devices, systems and radio-electronic equipment in general.

The work proposes and investigates a new method of forming ohmic contacts in microelectronic devices for various purposes, in which substrates with porous surfaces are used. Porous glass was chosen as a model material.

The technological operations are described and specific research results are obtained.

Keywords: ohmic contact, porous surface of the substrate, silicate glass

PACS 81.07.Lk, 73.40.Cg

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.4.318866>

ФОРМУВАННЯ ОМІЧНОГО КОНТАКТУ В МІКРОЕЛЕКТРОННИХ ПРИБОРАХ З ПІДКЛАДКАМИ ЗІ ШПАРИСТОЮ ПОВЕРХНЕЮ

Я. І. Лепіх, І. К. Дойчо, А. П. Балабан

Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр МОН і НАН України
при Одеському національному університеті імені І. І. Мечникова
e-mail: ndl_lepikh@onu.edu.ua

Реферат

В технології приладобудування, зокрема технології елементної бази електроніки, (гібридні інтегральні схеми (ГІС), сенсори різного призначення тощо), що використовує ансамблі наночастинок напівпровідникових та інших матеріалів у шпаристій матриці, нерідко мають місце проблеми формування омичних контактів до зазначених систем особливо коли використовуються в якості підкладок матеріали зі шпаристою поверхнею. А, як відомо, якість контактів головним чином визначає надійність пристроїв, систем і радіоелектронної апаратури в цілому.

В роботі запропоновано і досліджено новий спосіб формування омичних контактів у мікроелектронних пристроях різного призначення, в яких використовуються підкладки зі шпаристими поверхнями. В якості модельного матеріалу обрано шпаристе скло.

Описано технологічні операції і отримані конкретні результати досліджень.

Ключові слова: омичний контакт, шпариста поверхня підкладки, силікатне скло

ПАМ'ЯТІ ІВАНА ВАСИЛЬОВИЧА БЛОНСЬКОГО

(1950-2024)



10 грудня 2024 року пішов у вічність доктор фізико-математичних наук, професор, член-кореспондент НАН України, завідувач відділу фотонних процесів Інституту фізики НАН України, керівник ЦККП «Лазерний фемтосекундний комплекс» НАН України при Інституті фізики НАН України БЛОНСЬКИЙ Іван Васильович.

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.), з 2005р завідувача відділу фотонних процесів, керівника Центру колективного користування приладами НАН України при Інституті фізики НАН України “Лазерний фемтосекундний комплекс”.

В 1978 р. захистив кандидатську, а в 1990р. докторську дисертації. Предмет дисертаційних робіт – фізика екситонних явищ в квазідвовірних напівпровідниках. У 1993 році йому 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 матеріалів, 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 багаточастотних 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 монолітним кремнієм в режимі товщинного профілювання. Вперше спостережено ефект та пояснено природу фотогенерації звуку гігантської інтенсивності при імпульсному фотозбудженні наночасток CdS, інкорпорованих у власних порожнинах цеолітних матриць. Ці та ряд інших результатів дозволили розвинути новий напрямок – фотоакустика гетероструктур (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 походження. 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 пере захоплення.

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 супроводжуваних 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.

Напряму базується на взаємодії ультракоротких 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 плазово-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 ÷ $n \times 10^{-9}$ 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 ($\sim 10^{12}$ 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 двопророменезаломленням.

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

– Створення масивів мікролінз і мікродзеркал в халькогалідному склі $65\text{GeS}_2-25\text{Ga}_2\text{S}_3-10\text{CsCl}$ 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. був членом експертної ради ВАК України (2005–2010 рр – заступником голови, з 2015 р. – головою); входив 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”, редколегій журналів “Український фізичний журнал”, “Semiconductor Physics. Quantum Electronics. Optoelectronics” і нашого журналу «Сенсорна електроніка і мікросистемні технології».

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

Результати наукових досліджень Блонського І. В. отримали заслужену велику оцінку наукової спільноти в Україні і за кордоном.

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

народних грантів. Безумовно він був видатним ученим фізиком, яскравою особистістю і палко любив Україну.

Плідною була і наша багатолітня співпраця з Іваном Васильовичем Блонським, людиною творчою, активною і оптимістичною, у наукових дослідженнях і в редколегії нашого журналу. Іван Васильович продовж багатьох років брав участь у роботі Програмних і Організаційних комітетів Міжнародних наукових форумів, що проводилися на базі нашого університету.

Світла пам'ять про Івана Васильовича Блонського – видатного ученого, прекрасну людину і палкого патріота України назавжди збережеться у серцях його колег, друзів і численних учнів.

Редколегія.

Загородній А. Г., акад. НАН України

Локтев В. М., акад. НАН України

Беляєв О. Є., акад. НАН України

Наумовець А. Г., акад. НАН України

Валах М. Я., чл.-кор. НАН України

Кочелап В. О., чл.-кор. НАН України

Негрійко А. М., чл.-кор. НАН України

Рябченко С. М., чл.-кор. НАН України

Анісімов І. О., д.ф.-м.н., проф., акад. АН ВШ України

Коваленко О. В. д.ф.-м.н., проф., акад. АН ВШ України

Лепіх Я. І., д.ф.-м.н., проф., акад. АН ВШ України

Наконечний О. Г., д.ф.-м.н., проф., акад. АН ВШ України

Стріха М. В. д.ф.-м.н., проф., акад. АН ВШ України

Габович О. М., д.ф.-м.н., проф.

Дмитрук І. М., д.ф.-м.н., проф.

Кияк Б. Р., д.ф.-м.н., проф.

Корбутяк Д. В., д.ф.-м.н., проф.

Мельник В. П., д.ф.-м.н., проф.

Монастирський Л. С., д.ф.-м.н., проф.

Павлик Б. В., д.ф.-м.н., проф.

Пелешак Р. М., д.ф.-м.н., проф.

Порошин В. Н., д.ф.-м.н., проф.

Романюк Б. М., д.ф.-м.н., проф.

Сеті Ю. О., д.ф.-м.н., проф.

Столярчук І. Д., д.ф.-м.н., проф.

Шендеровський В. А., д.ф.-м.н., проф.

ІНФОРМАЦІЯ ДЛЯ АВТОРІВ. ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ У ЖУРНАЛ

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

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

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

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

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

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

Рукописи надсилати за адресою:

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

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

Здійснюється анонімне рецензування рукописів статей.

Правила підготовки рукопису:

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

Авторське право переходить Видавцю.

Титульний аркуш:

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

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

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

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

5. Анотація: до 1000 символів.

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

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

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

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

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

Після тексту реферату з абзацу розміщуються ключові слова.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Відхилені статті не повертаються.

ДО УВАГИ АВТОРІВ

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

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

INFORMATION FOR AUTHORS. PAPER PREPARATION REQUIREMENTS

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

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

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

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

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

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

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

Manuscripts should be sent to:

Lepikh Yaroslav Illich,
The Vice Editor, Odesa National
I. I. 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 and English languages.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Not accepted manuscripts will not be returned.

TO AUTHOR ATTENTION

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

Комп'ютерна верстка – В. Вітвицька

Підписано до друку 27.12.2024 р. Формат 60×84/8.
Ум.-друк. арк. 7,09. Тираж 50 прим.
Зам. № 2892.

Видавець:

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова
вул. Університетська, 12, м. Одеса, 65082, Україна
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 4215 від 22.11.2011 р.
Тел.: (048) 723 28 39, E-mail: druk@onu.edu.ua

Виготовлювач:

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

Надруковано з готового оригінал-макета