

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

**СЕНСОРНА
ЕЛЕКТРОНІКА
І МІКРОСИСТЕМНІ
ТЕХНОЛОГІЇ
2018 — Т. 15, №3**

Науково-технічний журнал

Заснований 13.11.2003 року.
Виходить 4 рази на рік

УДК 681.586

Засновник Одеський національний
університет імені І. І. Мечникова

За підтримки Українського фізичного
товариства

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ
№ 8131

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

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

Видається за рішенням Вченої ради
Одеського національного університету
імені І. І. Мечникова
Протокол № 1 від 11.09.2018 р.

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

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

**SENSOR
ELECTRONICS
AND MICROSYSTEM
TECHNOLOGIES
2018 — VOL. 15, № 3**

Scientific and Technical Journal

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

UDC 681.586

Founded by Odessa I. I. Mechnikov
National University

At support of the Ukrainian Physical Society

Certificate of State Registration КВ № 8131

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

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

Publishes on the resolution of Odessa
I. I. Mechnikov National University
Scientific Council. *Transaction № 1,
September, 11, 2018*

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

Редакційна колегія

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

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

Editorial Board

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

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

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

ЗМІСТ**CONTENTS**

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

V. M. Loktev

PHYSICS IN UKRAINE –
 ACHIEVEMENTS, PROBLEMS,
 PERSPECTIVES 5

B. M. Локтєв

ФІЗИКА В УКРАЇНІ – ДОСЯГНЕННЯ,
 ПРОБЛЕМИ, ПЕРСПЕКТИВИ

Хімічні сенсори
Chemical sensors

A. V. Garopov

HUMIDITY SENSORS BASED ON SnO₂-
 Co₃O₄-Nb₂O₅-Cr₂O₃ SEMICONDUCTOR
 VARISTOR CERAMICS..... 19

O. B. Гапонов

СЕНСОРИ ВОЛОГОСТІ НА ОСНОВІ
 НАПІВПРОВІДНИКОВОЇ ВАРИСТОРНОЇ
 КЕРАМІКИ SnO₂-Co₃O₄-Nb₂O₅-Cr₂O₃

Біосенсори
Biosensors

*I. S. Kucherenko, Ya. V. Topolnikova,
 D. V. Knyzhnykova, O. O. Soldatkin*

OPTIMIZATION OF THE PROCEDURE
 OF LACTATE AND PYRUVATE
 DETERMINATION IN BLOOD SERUM
 USING A BIOSENSOR SYSTEM..... 31

*I. С. Кучеренко, Я. В. Топольнікова,
 Д. В. Книжникова, О. О. Солдаткін*

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕДУРИ
 ВИЗНАЧЕННЯ ЛАКТАТУ ТА ПІРУВАТУ
 У СИРОВАТЦІ КРОВІ ЗА ДОПОМОГОЮ
 БІОСЕНСОРНОЇ СИСТЕМИ

Матеріали для сенсорів
Sensor materials

N. Dyakonenko, O. Ovcharenko

INTERFERENCE SYSTEMS
 AS PHOTONIC CRYSTALS 43

Н. Л. Дьяконенко, О. П. Овчаренко

ІНТЕРЕНФЕРЕНЦІЙНІ СИСТЕМИ ЯК
 ФОТОННІ КРИСТАЛИ

*A. Druzhinin, I. Maryamova, A. Kutrakov,
 N. Liakh-Kaguy*

THE INFLUENCE OF UNIAXIAL
 STRAIN AND HYDROSTATIC
 PRESSURE ON PROPERTIES
 OF InSb THIN LAYERS 50

*A. O. Дружинін, І. Й. Мар'ямова,
 О. П. Кутраков, Н. С. Лях-Кагуй*

ВПЛИВ ОДНОВІСНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ
 ТА ГІДРОСТАТИЧНОГО ТИСКУ НА
 ВЛАСТИВОСТІ ТОНКИХ ШАРІВ InSb

R. Balabai, O. Konoval, A. Solomenko

PHOTONIC AND ELECTRONIC
 PROPERTIES OF LATERAL
 HETEROSTRUCTURES BASED ON
 FUNCTIONALIZED GRAPHENE UNDER
 ACTION OF STATIC PRESSURE 58

*Р. М. Балабай, О. А. Коновал,
 А. Г. Соломенко*

ФОТОННІ ТА ЕЛЕКТРОННІ
 ВЛАСТИВОСТІ ЛАТЕРАЛЬНИХ
 ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВІ
 ФУНКЦІОНАЛІЗОВАНОГО
 ГРАФЕНА ПІД ДІЄЮ СТАТИЧНОГО
 ТИСКУ

Сенсори та інформаційні системи
Sensors and information systems

*L. Monastyrskii, Ya. Boyko, O. Petryshyn,
V. Lozynskii*

DATA PROCESSING SYSTEM OF
DIGITAL TEMPERATURE SENSORS
IN ORDER TO OPTIMIZE ENERGY
COSTS OF SMART HOME..... 74

*Л. С. Монастирський, Я. В. Бойко,
О. І. Петришин, В. М. Лозинський*

ОБРОБКА ДАНИХ СИСТЕМИ
ЦИФРОВИХ СЕНСОРІВ
ТЕМПЕРАТУРИ З МЕТОЮ
ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОВИТРАТ
«РОЗУМНОГО» БУДИНКУ

V. Zhukovskiy, A. Gokhman, and L. Vilinska

EXPANDING THE BANDWIDTH
OF A SEISMIC SENSOR..... 82

*В. К. Жуковський, О. Р. Гохман,
Л. М. Вілінська*

РОЗШИРЕННЯ СМУГИ ПРОПУСКАННЯ
СЕЙСМІЧНОГО СЕНСОРА

**Валентину Андрійовичу
Сминтині – 70!** 89

**Інформація для авторів.
Вимоги до оформлення
статей у журнал** 92

**Information for contributors. The
requirements on papers preparation**..... 95

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

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

УДК 53, 52

DOI 10.18524/1815-7459.2018.3.142040

ФІЗИКА В УКРАЇНІ – ДОСЯГНЕННЯ, ПРОБЛЕМИ, ПЕРСПЕКТИВИ

В. М. Локтєв

Відділення фізики і астрономії Національної академії наук України

e-mail: vfa@nas.gov.ua

Від редакції

24 квітня 2018 р. відбулися загальні збори Відділення фізики і астрономії НАН України. Зі звітною доповіддю за період із квітня 2017 р. виступив академік-секретар ВФА академік НАН України Локтєв В. М.

У доповіді міститься, на нашу думку, важливий і цікавий аналітичний матеріал, що стосується стану справ в галузі вітчизняної фізики і науки в цілому за останній період часу.

Розглянуто стан справ, місце і роль науки в Україні, у розвитку економіки держави, її суспільне значення у взаємозв'язку з освітою для майбутнього України, ставлення до науки держави.

Критично обговорюються питання реформування самої академії наук, пропонуються шляхи і засоби необхідних змін.

На нашу думку, доповідь Локтєва В. М. буде цікавою для читачів нашого журналу. Вадим Михайлович люб'язно погодився на публікацію статті за матеріалами доповіді в нашому журналі.

From edition

At April, 24, 2018 general meeting of Department of Physics and Astronomy (DPhA) of NAS of Ukraine was held. The report for the period since April, 2017 was made by DPhA Head, full member of NAS of Ukraine Loktev V.M.

In our opinion, the report contains the important and interesting analytical material, which concerns the state of affairs in the area of domestic physics and a science integrally for the last period.

© В. М. Локтєв, 2018

The state of affairs, a place and a role of science in Ukraine, in the development of a national economy, its public value in interrelation with education for the future of Ukraine, the State attitude to a science are considered.

The questions of the National Academy of Sciences reforming are critically discussed, the ways and manners of necessary changes are offered.

In our opinion, the academician Loktev V. M. report will be interesting to the readers of our Journal. Vadim Mikhajlovich has kindly agreed to the publication of the article on the report materials in our Journal.

ФІЗИКА В УКРАЇНІ – ДОСЯГНЕННЯ, ПРОБЛЕМИ, ПЕРСПЕКТИВИ

В. М. Локтєв

Анотація. У статті міститься аналітичний матеріал, що стосується стану справ в галузі вітчизняної фізики і науки в цілому за останній період часу.

Розглянуто стан справ, місце і роль науки в Україні, у розвитку економіки держави, її суспільне значення у взаємозв'язку з освітою для майбутнього України, ставлення до науки держави.

Критично обговорюються питання реформування самої академії наук, пропонуються шляхи і засоби необхідних змін.

Ключові слова: наука, фізика, академія, мікро- і нано -електроніка, теорія, експеримент

PHYSICS IN UKRAINE – ACHIEVEMENTS, PROBLEMS, PERSPECTIVES

V. M. Loktev

Abstract. The article contains analytical material concerning the state of affairs in the field of domestic physics and science in general over the last period of time.

The state of affairs, the place and role of science in Ukraine in the development of the state economy, its social significance in relation to education for the future of Ukraine, the attitude to the science of the state are considered.

The issues of the academy of sciences reforming are critically discussed, the way and means of necessary changes are proposed.

Keywords: science, physics, academy, micro and nano-electronics, theory, experiment

Представляю наилучшие результаты, полученные в учреждениях подразделения физики и астрономии НАН Украины за минувший год за теми материалами, які надали інститути.

В Інституті фізики, у відділі, що очолює **І. В. Блонський**, вивчалися процеси лазерної абляції на матеріалах, які, як сподіваються автори, мають перспективи застосування в оптоелектронних або телекомунікаційних мережах. Зокрема, досліджувалися ефекти, які супроводжують дію потужних фемтосекунд-

них імпульсів при обробці ними поверхонь.

Саме це і показано на рис. 1: зліва ви можете простежити у часі, як змінюється місце поверхні, яке опромінене таким імпульсом. Видно, що розмір і форма пошкодженого місця змінюється, а через приблизно 8 наносекунд по поверхні від місця опромінення починають поширюватися хвилі, які можна назвати ударними. Проаналізовані усі стадії процесу збудження, народження і термалізації вільних носіїв, утворення центрів поглинан-

ня, викиду вихідного матеріалу, утворення надзвучової хвилі.

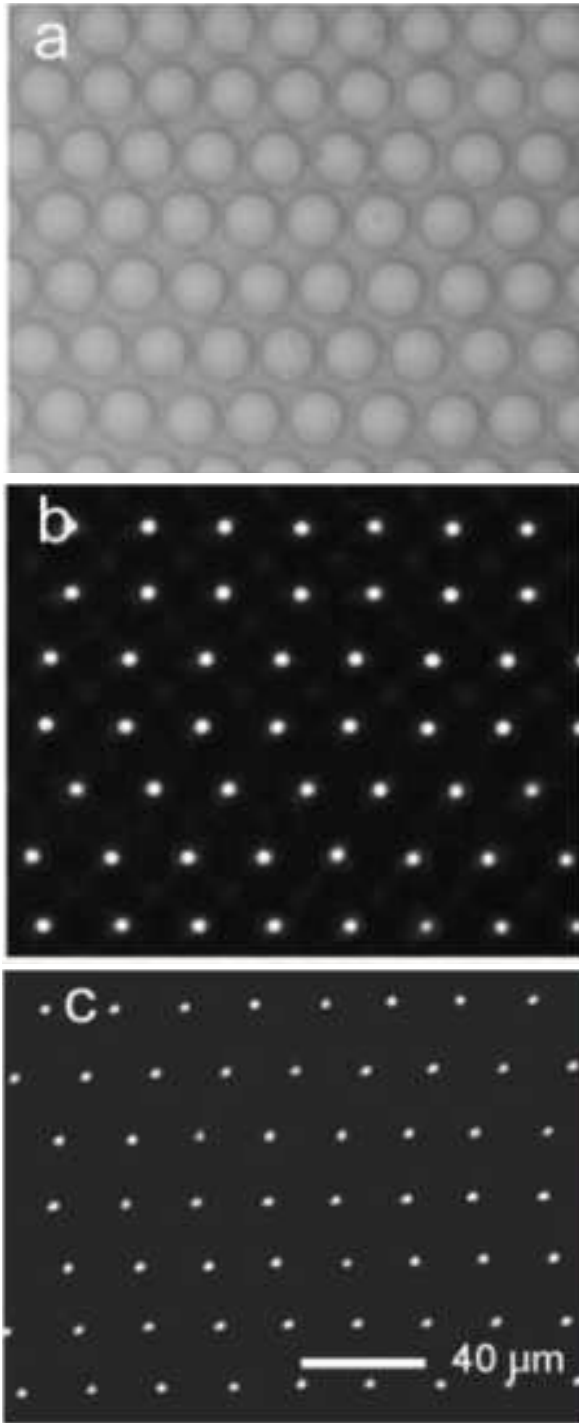


Рис. 1

Крім того, науковці згаданого відділу навчилися робити досить великі масиви таких утворень і за розробленими ними технологіями одноімпульсної лазерної абляції можуть перетворювати їх у дзеркала або мікролінзи.

Все це показано у правій частині рис. 1, (зокрема показані плями мікрображень, сформовані цими мікрооптичними елементами).

Найважливішим результатом, отриманим минулого року в Інституті фізики напівпровідників, визнано створення **В. С. Лисенком, О. М. Назаровим** разом з співробітниками цілої низки люмінофорів на основі нанопорошків кремнію з вуглецем. Йдеться про наночастинки SiO_2 розміром від 10 до 30 нм, які після їхньої обробки у спеціальних органічних розчинах покриваються вуглецевим шаром, але з розривами. Якщо точніше, то було встановлено, що за деяких термічних умов на поверхні наночастинок внаслідок піролізу формуються графенові пелюстки, розмір яких варіюється між 2-ма і 6-ю нм. (рис. 2).

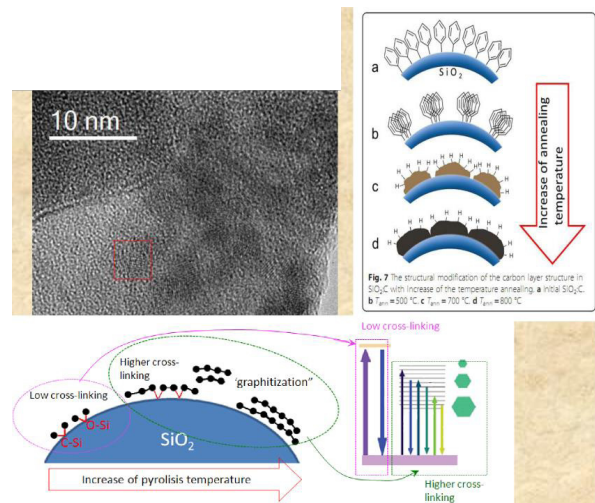


Рис. 2

Після опромінення в ультрафіолетовому діапазоні такі порошки самі починають світити, але в іншому і дуже широкому діапазоні частот, причому світіння є білим. Температура піролізу визначає розмір графенових шматочків, які автори називають нанокластерами, що пов'язані з частинкою, на поверхні якої вони утворилися, різними хімічними зв'язками Si-C або Si-O-C .

В Інституті металофізики **Ю. М. Коваль, Т. О. Косорукова і Г. С. Фірстов** зробили важливий крок у дослідженні високоентропійних сплавів, а саме: встановили, що 6-компонентна система $(\text{CoMnSi})_{67}(\text{Al}_{10}\text{In})_{33}$ впорядковується за типом B2.

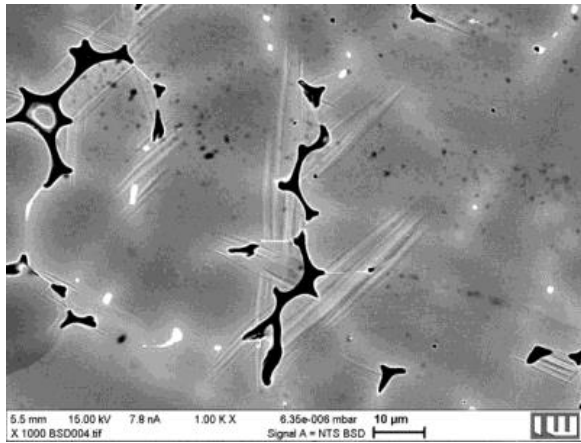


Рис. 3

По-перше, нагадаю, що за сучасним означенням до високоентропійних сполук відносять такі суміші металів, в якій кількість компонент не менша 5, а вміст кожної перебуває у діапазоні (5-35)%. По-друге, ентропія змішування у таких системах доволі висока, тому відповідні сплави отримали таку назву. Зокрема, сплав, про який йдеться, має дуже високу міцність, яку спричиняють триklinні спотворення ґратки B2.

В Інституті теоретичної фізики найцікавішим у 2017 році визнано дослідження, проведене Ю. Б. Гайдієєм і його групою у співавторстві з співробітниками радіофізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, яке стосується обчислення магнітних станів у сферичних оболонках. Нагадаю, що рівно 6 років тому я доповідав про результати цієї групи з вивчення властивостей і перебудови магнітних вихорів у магнітних нанодисках. Тепер йдеться про те ж саме, але в інших об'єктах – субмікрометрових оболонках різних радіусів і товщин.

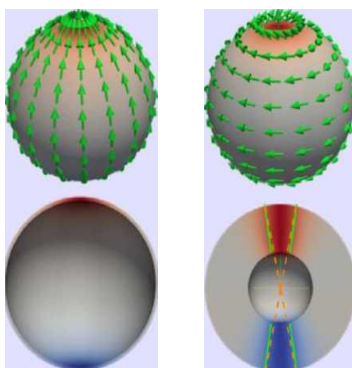


Рис. 4

Показано, що залежно від геометричних та матеріальних параметрів основний стан такої оболонки може бути або меридіальним (рис. ліворуч), або вихровим (праворуч), причому обидва ці стани містять вихрову складову на полюсах. Результатом розрахунку енергії цих станів з урахуванням короткосяжної обмінної та далекосяжної магніто-дипольної взаємодій між наведеними упорядкуваннями виникає фазовий перехід при зміні відношення радіусу оболонки до її товщини. Він плавний, за рахунок розвороту локальних намагніченостей, тому належить до другого роду.

У Головній астрономічній обсерваторії Н. Г. Гусєва та Ю. І. Ізотов провели вимірювання на унікальному Космічному телескопі Хаббла і відкрили галактику 1154+2443, якій відбуваються активні процеси зореутворення, і показано, що вона є потужним джерелом іонізуючого випромінювання, яке має майже неперервний спектр (рис. 5).

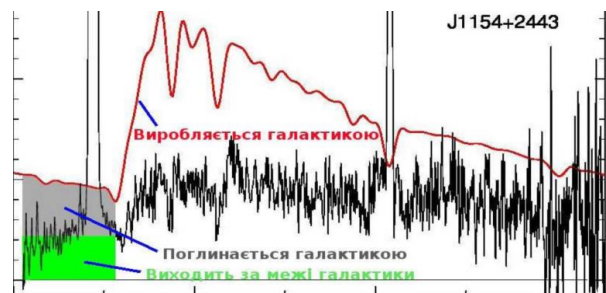


Рис. 5

При цьому випромінювання поширюється в галактиці, де поглинається, але приблизно 46% виходить поза її межі.

На думку авторів, саме такі галактики відповідають за вторинну іонізацію Всесвіту у так звані Темні віки, яка мала місце у часи, коли вік самого Всесвіту не перевищував 1 млрд. років.

В Інституті магнетизму О. І. Товстолиткіним разом з Д. Поліщуком у співпраці з С. М. Рябченком з Інституту фізики, В. М. Калитою з НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» та А. Г. Білоусом з Інституту загальної та неорганічної хімії ім. В. І. Вернадського розроблено методику моделювання поведінки ансамблю магнітних на-

ночастинок, занурених у рідину, на яку діють змінні поля різної частоти та амплітуди, що дає змогу знайти внески у магнітну сприйнятливості цієї рідкої системи залежно від розміру наночастинок, а також визначити способи оптимізації їхніх параметрів для досягнення необхідної поведінки таких суспензій.

Ефективність цієї методики продемонстровано на прикладі наночастинок легованих двовалентними металами манганітів (Ba, Sr) MnO_3 , які вважаються перспективними індукторами магнітної наногіпертермії. Здатність таких розчинів наночастинок автоматично контролювати необхідну температуру нагріву пов'язана з тим, що температура Кюрі наночастинок залежить від їх розміру, і шляхом підбору останнього можна досягти припинення процесу їх нагрівання внаслідок переходу у немагнітний стан (рис. 6).

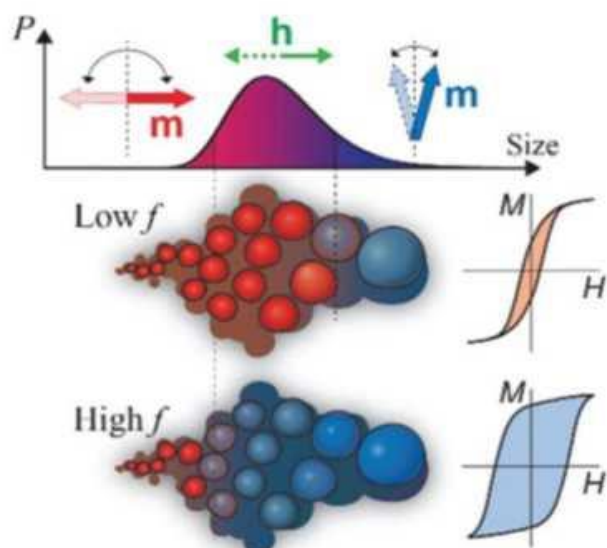


Рис. 6

В Інституті прикладних проблем фізики і біофізики **А. Г. Місюрою** з співробітниками проведені дослідження поверхневих властивостей створених ними плівкових структур з іммобілізованими, тобто, наскільки я зрозумів, нерухомими, молекулами кумарину-4 (це 4 бензольних кільця), які дозволяють за спектрами флуоресценції визначати наявність у повітрі ацетону, відрізняючи його від хімічно схожого на нього етилового спирту. Це дозволило створити сенсори з чутливістю до ацетону на рівні 10^{-6} у повітрі (рис. 7).

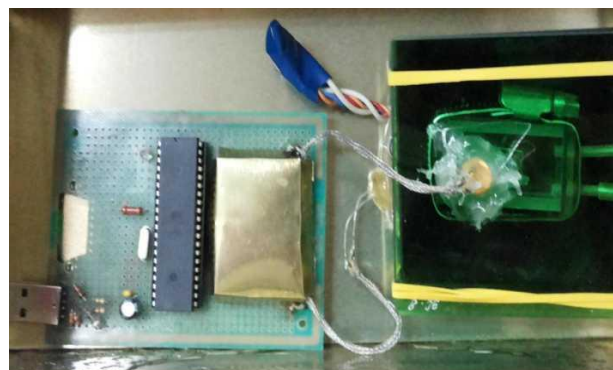


Рис. 7

Щоправда, автори не повідомили, якими є відповідні параметри у сучасних сенсорів і чи кращий за них створений ними сенсор.

Цьогорічний результат МЦ “Інститут прикладної оптики” отриманий досить великим колективом самого цього центру спільно з Інститутом монокристалів, стосується розробки під керівництвом **В. Б. Тараненка** так званого імпульсного мікролазера з активним середовищем на



Рис. 8

основі ітрій-алюмінієвого гранату (УАО) з домішками Eg (європій) або Yb (ітербій), який світить, що важливо, у безпечній для ока довжині хвилі 1.6 μm (рис. 8). Останнє спирається на той факт, що фокусуюча система ока (рогівка і кришталік) у цій спектральній ділянці має досить високий коефіцієнт поглинання, який, власне, і забезпечує відносно малу частку енергії, яка доходить до сітківки.

Нагадаю, що серед джерел випромінювання у вказаній області є багато таких, що вироблені зі скла з тими ж домішками, проте воно має низьку теплопровідність. Розроблена кераміка, навпаки, разом з чудовими оптичними характеристиками - висока прозорість на генерованій довжині хвилі і, водночас, значне

поглинання для діодних накачок в області 940 нм - характеризується рекордними коефіцієнтами теплопровідності.

У Фізико-технічному інституті низьких температур **О. В. Долбіним** з співробітниками під час охолодження до гелієвих температур кремній-оксидного аерогелю, який широко використовується для теплоізоляції, зокрема, космічних апаратів, вперше спостережена немонотонна температурна поведінка його теплового розширення. І цей, до певної міри, несподіваний результат визнаний у цьому інституті найкращим у 2017 році (рис. 9).

Якщо трохи детальніше, то прямими експериментами на унікальній ділатометричній установці, яка є Національним надбанням, встановлено, що зі зниженням температури і досягнення кріогенної області коефіцієнт теплового розширення аерогелю зростає майже на порядок, проходячи через максимум, через що виникає загроза руйнування теплоізоляції деяких конструктивних елементів ракет, зокрема їхніх паливних баків



Рис. 9

Інститут радіофізики і електроніки представив цього року як основний результат створення групою співробітників ІРЕ під керівництвом **П. М. Мележика**, до складу якої входили також вчені Казахстану і Франції антени нового класу, а саме: антени дифракційного випромінювання, яка має низку переваг. Її вигляд схематично показано на рис. 10.

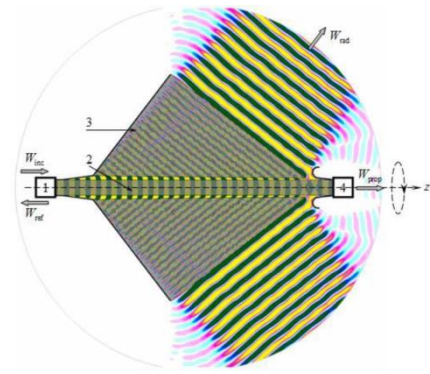


Рис. 10

Фактично спочатку антена була, якщо так можна сказати у даному випадку, передбачена, тобто розрахована, а потім - сконструйована. Як зазначають автори, антени цього класу є технологічними, простими аксіально-симетричними антенами з воронкоподібною діаграмою спрямованості, які за своїми електродинамічними характеристиками дозволяють використовувати їх у сучасних 5G комунікаційних системах.

Цікавою фізичною особливістю створених антен є те, що в них використаний хвильовий аналог ефекту Вавилова-Черенкова, тобто ефект перетворення поверхневих електромагнітних хвиль у хвилі об'ємні, коли поверхневі хвилі спеціально складеної гребінчастої відкритої структури генерують поле, багато у чому схоже на власне поле потоку заряджених частинок. При цьому останнє своєю експоненціально спадаючою частиною проникає у досить оптично щільне середовище і породжує у ньому об'ємні хвилі, які, навпаки, згасають дуже слабо, поширюючись на достатньо великі відстані.

У Радіоастрономічному інституті **О. О. Коноваленку**, **В. В. Захаренку** і **С. М. Єрїну** зі співробітниками інституту (робота виконувалася у минулому році, а результати тільки готуються до друку) із застосуванням системи цифрового фазування, тобто точній частотній і часовій прив'язці та запису оцифрованого масиву даних) вдалося по суті об'єднати в один інструмент два унікальних радіотелескопи – УТР-2 і ГУРТ, – перший з яких має надвисоку чутливість, а другий – дуже широку смугу робочих частот (рис. 11).



Рис. 11

Це, з одного боку, дозволило у кілька разів розширити діапазон радіочастотного випромінювання пульсарів, а з іншого, - більше ніж на порядок покращити точність визначення такого важливого параметру, як міра дисперсії запізнювання імпульсів при їх поширенні у космічному середовищі від пульсарів до розташованого на Землі радіотелескопу. Висока точність дає принципово новий спосіб вимірювання інтегральної кількості електронів на промені зору, яка змінюється на часах від годин до місяців і навіть більше. І на слайді показано два ряди спектрів - верхній від ГУРТу, а нижній - від УТР-2.

В Інституті іоносфери **І. Ф. Домніним**, **Л. Я. Ємельяновим** і **М. В. Ляшенком** на виконання договору між Інститутом іоносфери та Харківським національним університетом повітряних сил України в рамках Угоди між НАН України та Генштабом ЗС України проведені дослідження іоносфери з метою визначення її реакції на геомагнітні збурення різної інтенсивності (рис. 12).

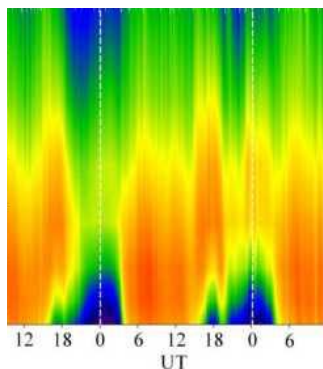


Рис. 12

Зокрема, отримано і проаналізовано дані вимірювання динамічних процесів в іоносферній плазмі над центральноєвропейським регіоном в одному з циклів сонячної активності в умовах незбуреної атмосфери та збурень природного походження. Черговий раз підтверджено багатофакторність впливу геомагнітних бур на зміни параметрів іоносфери та її еволюцію.

У Донецькому фізико-технічному інституті **А. С. Савченком** у співавторстві з колегами з кількох країн досліджено ґратку таких досить ще екзотичних нелінійних магнітних збуджень, як скирміони у магнітному металі FeGe, у структурі якого відсутня просторова інверсія.

Хоча такі збудження відомі давно, можливість утворювати ними ґратку, подібну до ґратки вихорів Абрикосова, встановлена кілька років тому. Скирміон – це один з типів магнітних солітонів, які виникають у кристалах без центру інверсії за наявності взаємодії Дзялошинського, яка у даному випадку більша за звичайний ізотропний обмін.

В Інституті фізики конденсованих систем **Я. М. Ільницьким** разом з колегами з інших установ проведено дослідження кінетики фотоізомеризації і часової еволюції впорядкування молекул в азобензиновмісних полімерних матеріалах. Слід наголосити, що ці фотокеровані матеріали все ширше застосовуються у різних сферах, зокрема медицині, у вигляді сенсорів, наношаблонів, штучних м'язів. В основі роботи цих матеріалів лежать такі фізичні процеси, як поглинання енергії окремими групами, що входять до складу полімерів, її переніс до інших груп, де вона перетворюється у механічну дію (рис. 13). Найчастіше таке перетворення забезпечується вже за відносно малого опромінення і температурах, значно нижчих за температуру переходу у скляну фазу.

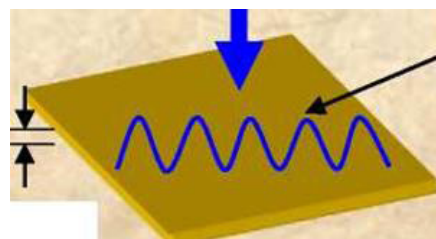


Рис. 13

В Інституті електронної фізики **Є. Ю. Ремета**, **В. А. Келемен** разом з аспірантом **Шандором Демешем**, що зараз працює в Угорщині, вперше виміряли розсіювання електронів на молекулі флуорометану CF_4 (рис. 14).

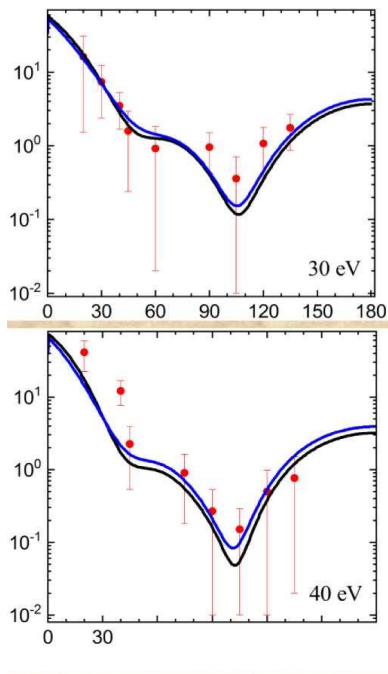


Рис. 14

Ця молекула та її радикали CF_n дуже часто присутні у плазмі газового розряду, газових лазерах, напівпровідникових процесах, атмосфері тощо, тому вивчення як вони живуть в умовах електронного або іонного бомбардування і на що розпадаються, є важливим для якісного і кількісного моделювання плазмових процесів, потреб деяких високих технологій та екології.

На цьому фактично основна наукова частина звіту, що стосується наших результатів, можна сказати, вичерпана. Як їх оцінювати? Ми їх подаємо як такі, що у більшій чи меншій степені відповідають світовому рівню. А що таке світовий рівень і чим він визначається, ми не уточнюємо. Що при цьому має матися на увазі? Хоча б те, що чи можна їх зіставити з тими, які входять до чільної десятки світових у кожному поточному році, що оприлюднюється найбільш визнаними у світі журналами.

І хоча над яскравих подій у світовій фізиці було достатньо дозвольте для порівняння за вже нашою традицією назвати кілька результатів, які за рейтингами «*Science*» або «*Nature*», визнані за найважливіші у світі.

Якщо говорити про найсуттєвіші світові досягнення природничого за минулий рік, то такими більш-менш однотайно визнано наступні, проте порядок навряд чи можна визнати рейтинговим:

1. Насамперед, і це вже так чи інакше багато звучало, – гравітаційні хвилі. З одного боку, Нобелівський комітет нагородив Нобелівською премією Лайнера Вейса, Баррі Беріша і Кіпа Торна, які на детекторі ЛІГО у 2015 році вперше спостерігали злиття двох чорних дір та породжені ним гравітаційні хвилі. Хоча їхня фіксація зразу була високо оцінена, існував певний скепсис, а на Нобелівську відзнаку автори чекали рік. Тепер же гравітаційний хвильовий сигнал, сприйнятий не тільки системою ЛІГО, а й іншими детекторами, був викликаний іншою неймовірною подією – злиттям нейтронних зір у Галактиці, що віддалена від нас на 130 млн світлових років. Він довів, що гравітаційні хвилі дійсно доступні для наземних вимірювань. Зірки, що злилися, дуже яскраві, надзвичайно щільні, а їхній діаметр оцінений всього у 10 км при вазі, більшій, ніж Сонячна. При цьому прийнятий 17 серпня гравітаційний сплеск виявився найсильнішим за усі попередні і був настільки потужним, що його почули і побачили близько 70 різних телескопів, включаючи ЛІГО, чим було експериментально встановлено, що швидкість електромагнітних і гравітаційних хвиль однакова!

2. Ще один по суті фізичний результат, що отримав Нобелівську премію, правда, з хімії, – кріоелектронний мікроскоп. Завдяки йому тепер з'явилася можливість досліджувати рух, взаємодію і форму певних біомолекул, що недоступно іншими методами. Більше того, деякі клітинні процеси вдалося настільки візуалізувати, що вони були записані на плівку, як у кіно.

3. Четвертою стала нова технологія виправлення генів. Нагадаю, що два роки тому були винайдені генетичні ножиці, які

можуть ген відокремити від молекули та ізолювати. Тепер же у Гарварді створили хімічну технологію, яка дозволяє змінювати букви генетичного коду. Це тонка, але високоточна методика є небезпечною, бо ніхто не знає, після скількох змін букв ген стане некерованим або взагалі небезпечним. Водночас з 60 000 відомих генетичних відхилень, що спричиняють різні хвороби, 35 000 пов'язані лише з однією буквою, отже можна лише уявити, як може змінитися медицина, коли відповідна методика стане загальнодоступною хоча б у великих медцентрах.

4. У травні у США запатентовані ліки від раку, які вже продаються під назвою «Кейтруда». Цей препарат лише один з багатьох, які застосовуються для боротьби з цією наразі невиліковною хворобою. Його принципова відмінність від УСІХ інших – можливість використання при багатьох формах раку – як зазначається, при всіх. Так, з контрольної групи 86 важких онкохворих понад 50 було переведено у групу ризику, тобто групу не хворих.

5. Встановлення через буріння дуже старого льоду в Антарктиці, який зберігає пузирі з повітрям Землі, молодшою на 2,5 млн років, що частка вуглекислоти у ньому є набагато меншою.

6. Знаходження на території нинішнього Марокко черепів людини, які оцінені у 300 000 років, тоді як раніше вважалося, що її вік 200 000 років.

7. Інженерно-технічний результат Маска, який створив і запустив ракету багаторазового використання. Вважається, що це настільки здешевить запуски, що їх зможуть здійснювати не тільки найзаможніші країни.

8. Створення нового детектора нейтрино, який є мобільним і важить усього 14 кг. Принцип не повідомляється, але якщо згадати, що сучасні детектори – це величезні наземні або підземні споруди, то прогрес більше, ніж очевидний.

9. Нарешті, одночасно двом командам вчених вдалося створити структури, передбачені у 2012 році – так звані темпоральні кристали. Звичайні кристали – це системи, періодичні у просторі, а темпоральні – у часі. Тепер деяка їх

подоба реалізована експериментально. За допомогою лазерних імпульсів певне місце спеціально приготовленої кристалічної системи структурно виводилося з рівноваги, і потім спостерігався періодичний процес між вихідною і створеною структурами, які переходили одна в іншу. Він існував достатнього довго, що і дало підстави назвати систему темпоральним кристалом. Справа у тому, що зазвичай подібні процеси зводяться до релаксації у рівноважний стан, тому реалізація таких систем вважалася неможливою, що обговорювалося кілька років. Насправді, давно відомо квантове плавлення поверхні твердого гелію, яке теж носить періодичний характер, проте відповідне порівняння не робилося...

На цьому завершу десятку. Хотів би сподіватись, її результати свідчать, на яких головних напрямках фундаментальних пошуків концентруються основні зусилля дослідників. Як на мене, в останнє десятиліття такими є науки про життя, що всім нам очевидно. Коли ж згадувати фізику, у ній найбільш актуальними з точки зору фундаментальних знань залишаються фізика високих енергій, астрофізика, нанофізика, особливо вуглецева, фізика наднизьких температур і дослідження явищ, які наближають або прояснюють створення квантового комп'ютеру. Важливим також є синтез штучних матеріалів. Мається, зокрема, на увазі пошуки стільникової, як у графені, структури, яку б утворювали атоми інших елементів. Якщо недавно це було на рівні мрій, то тепер таких матеріалів сотні, ними займаються, їх вже не тільки створюють або вивчають, а й застосовують.

Назву ще кілька фізичних результатів, які впродовж року я собі занотовував.

Почну з спостереження найбільш віддаленої на сьогодні чорної діри, яка знаходиться у центрі дуже яскравого квазару, що випромінює світло з часу, коли Всесвіту було всього 680 млн років (тепер десь 14 млрд). Сам він досягає Землі через 13 млрд років. Загадка у тому, як такий гігантський об'єкт міг вирости за такий короткий час.

Отримання методом 3Д принтингу нержавіючої сталі, що має знайти застосування де завгодно - від ракет до реакторів. Нержавіючій

сталі 150 років і вона виробляється плавленням різних інгредієнтів з послідовним закалюванням. Знаючи кінцеву зернисту структуру і її слабкі місця, вчені Ливерморської лабораторії перевели все на мову програми для 3Д принтера, яка відтворювала ту ж зернисту структуру, але без властивих їй дефектів, тобто принтер їх не відтворював, а якщо вони з'являлися, то використовувався лазер для їхнього знешкодження.

Ще один матеріалознавчий результат, що викликав великий фурор. У Карлсруе створено механічний метаматеріал з синтетичною структурою.

Це мікрокуб, який під тиском не стискається, а, навпаки, розширяється. Його структура містить кільця на гранях. Коли тиск оточуючого середовища зростає, кільця теж стискаються, але завдяки спеціальному кріпленню у вершинах куба, починають розгортатися так, що структура збільшується. Цікаво, що цю, можна сказати, іграшку видумали фізики, а повідомлення про неї надруковано в журналі Rpus.Key.X.

Були цікаві повідомлення про запуск у Німеччині найпотужнішого у світі рентгенівського лазера на вільних електронах, який робить можливим просторове розділення до пікометрів і пряме спостереження хімічних реакцій, або

на створення тонко-плівкового матеріалу, який забезпечує рекордне - до 14° -фарадєвське обертання, що на порядок підвищує чутливість деяких сенсорів, та на, нарешті, отримання металічного водню.

Зауважу, що коли порівняти наші кращі результати зі світовими, то якогось великого перетинання помітити неможливо. Безперечно, ми займаємося актуальними питаннями, але з відомих причин диктувати моду чи викликати світовий резонанс навряд чи можемо, і згадок про нас у підсумкових статтях я, на жаль, не зустрічав. Може, й через те, що ми маємо відносно мало робіт у найкращих журналах, хоча вони трапляються.

Тим не менш, ситуацію з публікаціями у нашій академічній фізиці я б не назвав кричущою – приблизно 40% робіт ми публікуємо в іноземних журналах з імпаکت-факторами.

Може, скоріше, проблема у підвищенні авторитету вітчизняних журналів.

Вивчення фізики і заняття фізикою не одне і те ж, тому скорочувати години з фізики на інженерно-технічних факультетах вишів, а тим більше у школах неприпустимо, хоча дії нашого МОН і керованих ним університетів зовсім інші – спростити, скоротити або повністю прибрати. Така політика, підтримувана, до речі, НАПН України, недалекоглядна, спричинює деградацію інтелекту. Навіть при схильності до гуманітарної діяльності повсякденне життя часто вимагає від людей логічного мислення, креативності, вміння виокремлювати головне, уявлень про Всесвіт і наукового світогляду. Без хоча б мінімальної природничої підготовки цього не опануєш, а отже не відповідатимеш вимогам часу.

У цьому сенсі, тобто визнанні ролі фізики, гадаю, буде не зайвою й така інформація: 10 квітня ц.р. президент Росії В.В.Путін відвідав Науковий центр «Курчатовський інститут», де провів цілий день. Повідомлю, що цей центр не входить до складу академії, але його бюджет 180 млрд. рублів, Агентства, що здійснює управління інститутами РАН – 100 млрд., а академії – 4 млрд. Так от, під час візиту було ні багато ні мало заявлено, що концепція інноваційного розвитку економіки Росії терпить невдачу і що необхідно повернутися до надійного способу виправлення ситуації через випереджаючий розвиток ВПК. При цьому планується змінити правовий статус 15 інститутів фізичного профілю, список яких не був оголошений, а пріоритетом визначено будівництво крупних установок у галузі ядерної фізики і фізики високих енергій. А загальний напрямок виходу з кризи такий: усі скільки-небудь дієздатні залишки академічного комплексу будуть переорієнтовані на ВПК. У словах Путіна це теж прозвучало: «Для возвращения технологического лидерства нам нужно тщательно выбрать приоритеты, где мы не потеряли преимущества – атомная промышленность и космос». Ось такі «науково-організаційні» новини від нашого північно-східного сусіда.

Дозвольте стисло зупинитися на співпраці з вищими навчальними закладами, або, що

одне й теж, МОН. Якщо характеризувати цю співпрацю в цілому, то вона є і відбувається у нормальному режимі, який навряд чи викликає заперечення.

Ви знаєте, що МОН України спільно з НАПН України весь час вигадує «новації» (не плутайте з інноваціями) у шкільному навчанні, одна з яких, подана дуже гучно, стала переглядом шкільної природничої підготовки. Практично він звівся до вилучення фізики разом з астрономією, хімії та біології як окремих предметів з навчальних програм загальноосвітніх середніх шкіл і об'єднання цих дисциплін у блоки або зведення усіх до однієї під назвою «природознавство». Зменшення годин зазнала і математика, хоча й не такого радикального. До речі, сказане є елементами започаткованої МОН освітньої реформи, чим як прикладом позитивних зрушень пишається уряд.

Ці так звані нововведення зачепили вчителів цих предметів, але супротив виявили тільки фізики, які не склали руки і, почали боротьбу. Через УФТ вони звернулись до відділення з проханням щось вдіяти. І від імені ВФА був підготовлений лист на адресу очільників держави, який, що важливо, підписали перший віце-президент НАН України, президенти УФТ і УАА, один з відомих вчителів і також я. У ньому коротко викладалася суть питання, висловлювалося наше ставлення до політики МОН і говорилося про можливі, шкідливі для держави, наслідки таких змін, якщо вони будуть схвалені КМ. Дивно, але цей лист спрацював, і МОН на вимогу Уряду скликало, як вони люблять називати, слухання з цього питання.

Ми, принаймні, можемо засвідчити неформальну участь академії у покращанні шкільної освіти, хоча, як мені з сумом сказав один з вчителів, зараз у школах майже нема викладачів, які могли б викладати розроблену за участі НАН України програму. Цим хотів закінчити, але днями дізнався, що і МОН, і НАПНУ продовжують чинити опір впровадженню наших програм, а свої всіма силами проштовхують у школи.

Питання фінансового стану наших установ. Питання настільки болоче, що обійти

його повністю неможливо. Ми інколи навіть не замислюємося, яким воно є тепер, бо стан з фінансуванням і академії, і науки в цілому в здається мені критичним. Особливо тямущі молоді, які на неї не розраховують, вимушені влаштуватися за кордоном, бо нормально жити на отримувані за неповний робочий тиждень мізерні гроші, які їм можна запропонувати, неможливо.

І взагалі найважче тепер не залучити молододу людину до інституту, а утримати її. Зарплата низька, але ми розуміємо, що ще більш гнітючим було і залишається питання житла. Знайти ж роботу за кордоном, як виявляється, не проблема, і у будь-якій, навіть найуспішнішій, закордонній лабораторії працюють колишні співробітники наших установ. Ми давно стали місцем підготовки кваліфікованих кадрів, а наші західні колеги активно запрошують талановитих українців і, більше того, існують програми по їх залученню до країн Європи і Америки.

Якщо ж говорити в цілому, то на фоні деякого, як згадувалося, спаду фінансування науки, є країни і навіть цілі регіони, де воно не погіршується, що

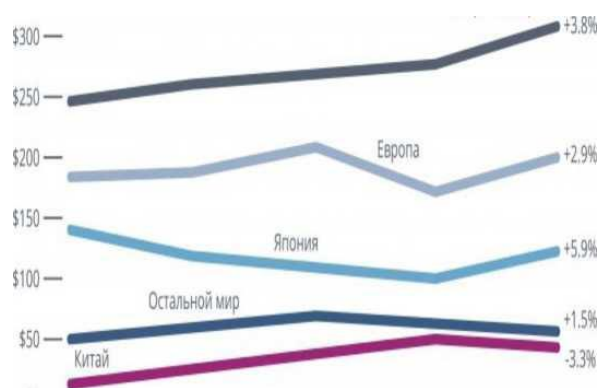


Рис. 15

видно з наведеного Рис. 15, на якому для порівняння показана відома ситуація з фінансуванням науки в Україні, де вже не один рік воно продовжує своє падіння. Це часова гістограма, а в абсолютних відсотках картина наступна (рис. 16): у відсотках

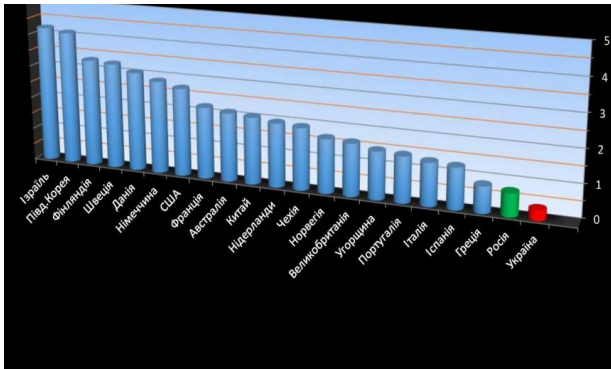


Рис. 16

ВНП перед ведуть Ізраїль і Південна Корея, де ця цифра більше 4-х, і десь 10 країн виділяють 2% і більше. Цей розподіл існує з невеликими поправками приблизно 10 років і нічого принципово нового не містить - ми продовжуємо пасти задніх, маючи при цьому не тільки соромний відсоток, а й незавидний ВНП. Тому вимоги до нас посідати у таких умовах чільні місця хоча б на деяких напрямках не витримують жодної критики

Повторю, ми – спадкоємці потужної і, без перебільшення, передової у науковому розвитку держави, в якій наукові дослідження велися по усьому фронту. Але хіба не ясно, що наразі в Україні широкого фронту досліджень

нема, ми фактично прогавили появу у світовій науці цілих напрямів, бо їх ніхто не відслідковував. А коли про них знали, щось започаткувати за браком коштів і кадрів не могли.

Разом з академією ми переживаємо скрутні часи, розвиватися в існуючих умовах нелегко, а за фінансового голодомору – практично неможливо, тому не дивно, що ми потрапили у стан деякої стагнації, вихід з якого вимагає ресурсів. Їх недостатньо або нема, хоча будь-яка бездіяльність швидко вступає у протиріччя з інтенсивним розвитком всього і вся навколо нас. Навіть у такій, несприятливій для творчої роботи, ситуації академії належить більша частина робіт високого рівня, які виконуються в Україні. Але щороку, дивлячись світові досягнення, відчуваєш, що цього критично мало. Фінансування, за яке ми маємо бути ще й вдячні, не може забезпечити оновлення академії в її теперішньому складі, отже не виключено, що треба думати і в напрямку її скорочення. Водночас, необхідно стукати в усі двері, щоб добитися не тільки розширення грантової підтримки із збереженням базової, а й суттєвого збільшення самих грантів. Проте й експертиза як попередня, так і заключна мають бути незалежними і професійно досконалыми.

Стаття надійшла до редакції 27.08.2018 р.

UDC 53, 52

DOI 10.18524/1815-7459.2018.3.142040

PHYSICS IN UKRAINE - ACHIEVEMENTS, PROBLEMS, PERSPECTIVES

V. M. Loktev

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

Summary

The results of the scientific and technical activities analysis of the research institutes and structures of Ukraine subordinated to the Department of Physics and Astronomy of the National Academy of Sciences of Ukraine for the period from April 2017 to April 2018 are presented.

The essence of the most significant scientific and technical results, both fundamental and applied, is briefly described.

It also shows possible perspectives of scientific achievements in terms of their use in the relevant branches of science, technology, the national economy, as well as in special technology.

There are authors and author groups that actively and fruitfully worked on the important scientific problems solving that have received appropriate recognition of the scientific community.

In particular, the results of studying the of laser ablation processes on materials with real application prospects in optoelectronics and telecommunication systems are shown. The work has been done by a team from the Institute of Physics under the guidance of the Corr. of NAS of Ukraine I. V. Blonsky.

In the Institute of V. E. Lashkarev Semiconductor Physics in the department headed by Corr. of NAS of Ukraine V.S. Lysenko has been created a series of luminophores with the ability to change the light frequency range. These works are close to the development of the technology and implementation.

It should be noted also the complex development of the combined team from the Institute of Magnetism (prof. Tovstolitkin O. I.), Institute of Physics, Corr. NAS of Ukraine (Ryabchenko S. M.), from NTUU “KPI them. Igor Sikorsky “ (prof. Kalita V.M.) and from the Institute of General and Inorganic Chemistry them. V. I. Vernadsky (prof. Bilous A. G.) - a method for modeling the behavior of a ensemble of magnetic nanoparticles immersed in a liquid, under the influence of the variable in field amplitude and frequency.

A number of important scientific results were obtained by teams of institutes in cooperation with foreign partners.

It is noted that this practice, especially in the face of a financing gap for Ukrainian science, can bring significant results.

The results obtained by our institutes and the achievements of foreign collectives which recognized by the most important in the world according to the results of the journals “Science” and “Nature”, on the situation with the publications has been compare. The financing of physical science in Ukraine and the world is estimated, attention is paid to exacerbating personnel problems. which is due, in particular, to the rapid growth of the departure of talented young people abroad for work in prestigious scientific institutions.

Keywords: science, physics, academy, micro and nano-electronics, theory, experiment

УДК 53, 52

DOI 10.18524/1815-7459.2018.3.142040

ФІЗИКА В УКРАЇНІ – ДОСЯГНЕННЯ, ПРОБЛЕМИ, ПЕРСПЕКТИВИ

В. М. Локтєв

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

Реферат

Наведені результати аналізу науково-технічної діяльності науково-дослідних інститутів і структур України, що підпорядковані Відділенню фізики і астрономії Національної академії наук України за період з квітня 2017 по квітень 2018 р.

Коротко описано суть найбільш вагомих науково-технічних результатів як фундаментального, так і прикладного характеру.

Показані також можливі перспективи наукових досягнень з позицій їх використання у відповідних галузях науки, техніки, народного господарства, а також у спеціальній техніці.

Відзначаються автори та авторські колективи, що активно і плідно працювали над розв'язанням важливих наукових проблем, які отримали відповідні визнання наукової спільноти.

Зокрема, показано результати вивчення процесів лазерної абляції на матеріалах, що мають реальні перспективи застосування в оптоелектроніці та телекомунікаційних системах. Робота виконана колективом з Інституту фізики під керівництвом чл.-кор. НАН України І. В. Блонського.

В інституті фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова у відділенні, яке очолює чл.-кор. НАНУ України В. С. Лисенко, створено низку люмінофорів з можливістю зміни діапазону частот свічення. Ці роботи близькі до розробки технології і впровадження.

Слід зазначити також комплексну розробку об'єднаного колективу з Інституту магнетизму проф. Товстолиткіна О.І., Інституту фізики чл.-кор. НАН України Рябченка С. М., проф. Калити В. М. з НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського” та проф. Білоуса А. Г. з Інституту загальної та неорганічної хімії ім. В. І. Вернадського – методику моделювання поведінки ансамблю магнітних наночастинок, занурених у рідину, під дією змінного за амплітудою і частотою поля.

Низку важливих наукових результатів отримано колективами інститутів у кооперації з іноземними партнерами.

Наголошується, що саме така практика, особливо за умов дефіциту фінансування української науки може приносити вагомі результати.

Зпівставляються за науковою значимістю отримані нашими інститутами результати з досягненнями зарубіжних колективів, що визнані найважливішими у світі за результатами журналів “Science” і “Nature”, ситуацію з публікаціями. Оцінюється фінансуванням фізичної науки в Україні і світі, звертається увага на загостренні кадрові проблеми, що зумовлена, зокрема, стрімким зростанням виїзду талановитої молоді за кордон для роботи у престижних наукових закладах.

Ключові слова: наука, фізика, академія, мікро- і нано -електроніка, теорія, експеримент

XИМИЧНИ СЕНСОРИ

CHEMICAL SENSORS

PACS 73.30.+y, 73.40.-c, 73.50.Fq; UDC 621.316.91
DOI 10.18524/1815-7459.2018.3.142041

HUMIDITY SENSORS BASED ON $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$ SEMICONDUCTOR VARISTOR CERAMICS

A. V. Gaponov

Dnipro National University, 72 Gagarin ave., Dnipro, 49010, Ukraine,
tel.: +380 50 3214157, E-mail: alexei_gaponov@ukr.net

HUMIDITY SENSORS BASED ON $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$ SEMICONDUCTOR VARISTOR CERAMICS

A. V. Gaponov

Abstract. The varistor effect in $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$ ceramics with different additions is accompanied by a strong humidity-sensitivity effect in the low-field electrical conductivity. The low-field electrical conductivity and dielectric permittivity of ceramics are increased when air relative humidity rises from 10 to 93%. Such effects are observed both in the samples prepared by solid-phase sintering without or with CaO addition and in the samples prepared by liquid-phase sintering with CuO or V_2O_5 additions. The lowest humidity-sensitivity effect was found in the liquid-phase sintering samples due to the more solid structures and the secondary phases which are located between the SnO_2 grains. For the studied samples the values of humidity sensitivity coefficient $1.8 \cdot 10^3\text{-}3.2 \cdot 10^5$ at low electric fields and the nonlinearity coefficient 30-57 at high electric fields ($E_1 = 5.3\text{-}7 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$) were calculated. The properties of oxide ceramics are explained by electrical conductivity which is controlled by the grain-boundary potential barriers. The barrier height decreases with the increase both of air relative humidity at low electric fields and of voltage at high electric fields. Strong humidity sensitivity is a key factor for sensor application of SnO_2 -based ceramics.

Keywords: humidity sensor, tin oxide, varistor, oxide ceramics, grain boundary, electrical conductivity

СЕНСОРИ ВОЛОГОСТІ НА ОСНОВІ НАПІВПРОВІДНИКОВОЇ ВАРИСТОРНОЇ КЕРАМІКИ $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$

О. В. Гапонов

Анотація. Варисторний ефект у $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$ кераміці з різними домішками супроводжувався сильним вологочутливим ефектом для електричної провідності у слабкому полі. Електропровідність у слабких полях і діелектрична проникність кераміки збільшувались при зростанні відносної вологості повітря з 10 до 93%. Такі ефекти спостерігались як для твердо-фазних синтезованих зразків без або з CaO домішкою, так і для рідко-фазних синтезованих зразків з CuO або V_2O_5 домішками. Найменшу вологочутливість мають рідко-фазні синтезовані зразки у зв'язку з їх більш щільною структурою й існуючими вторинними фазами, які розташовуються між зернами SnO_2 . Для досліджених зразків обчислені значення коефіцієнта вологочутливості $1,8 \cdot 10^3\text{-}3,2 \cdot 10^5$ при слабких електричних полях і коефіцієнта нелінійності 30-57 при сильних електричних полях ($E_1 = 5,3\text{-}7 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$). Властивості оксидної кераміки пояснюються електричною провідністю, яка контролюється потенціальними бар'єрами на межах зерен. Висота бар'єрів зменшується як зі збільшенням відносної вологості повітря при слабких електричних полях, так і напруги при сильних електричних полях. Велика вологочутливість є ключовим фактором для сенсорного використання кераміки на основі SnO_2 .

Ключові слова: сенсор вологості, оксид олова, варистор, оксидна кераміка, межа зерен, електрична провідність

СЕНСОРЫ ВЛАЖНОСТИ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ВАРИСТОРНОЙ КЕРАМИКИ $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$

А. В. Гапонов

Аннотация. Варисторный эффект в $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$ керамике с различными добавками сопровождался сильным влажочувствительным эффектом для электрической проводимости в слабом поле. Электропроводность в слабых полях и диэлектрическая проницаемость керамики увеличивались при повышении относительной влажности воздуха с 10 до 93%. Такие эффекты наблюдались как для твердофазных синтезированных образцов без или с CaO добавкой, так и для жидкофазных синтезированных образцов с CuO или V_2O_5 добавками. Наименьшую влажочувствительность имеют жидкофазные синтезированные образцы в связи с их более плотной структурой и существующими вторичными фазами, которые размещаются между зернами SnO_2 . Для исследованных образцов вычислены значения коэффициента влажочувствительности $1,8 \cdot 10^3\text{-}3,2 \cdot 10^5$ при слабых электрических полях и коэффициента нелинейности 30-57 при сильных электрических полях ($E_1 = 5,3\text{-}7 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$). Свойства оксидной керамики объясняются электрической проводимостью, которая контролируется потенциальными барьерами на границах зерен. Высота барьеров уменьшается как при повышении относительной влажности воздуха при слабых электрических полях, так и напряжения при сильных электрических полях. Большая влажочувствительность является ключевым фактором для сенсорного использования керамики на основе SnO_2 .

Ключевые слова: сенсор влажности, оксид олова, варистор, оксидная керамика, граница зерен, электрическая проводимость

1. INTRODUCTION

Tin dioxide is well known as a material for the manufacture of gas sensors [1-4], humidity sensors [3-7] and varistors [8-14]. The tin oxide based ceramics has non-Ohmic electrical conductivity which is caused by the grain-boundary potential barriers [8 - 14]. It is the two Schottky barriers at the SnO₂ grain boundaries which are connected in opposite directions.

One of the important properties of SnO₂-based varistor ceramics is the sensitivity of its electrical conductivity to the air relative humidity [3-8]. The humidity-sensitive or varistor properties can prevail depending upon the additions to the ceramic samples. The combining of both properties is due to the grain-boundary nature of both effects [15-18]. Therefore the devices with combined properties of a relative-humidity sensor and a varistor can be used. For example, such ceramics were investigated earlier in SnO₂-ZnO-CoO system with SiO₂, GeO₂ or Bi₂O₃ additions [8] and in SnO₂-Co₃O₄-Nb₂O₅-Cr₂O₃ system with Bi₂O₃ [15, 16], V₂O₅ [17] or CuO [18] additions. The GeO₂, Bi₂O₃, V₂O₅ and CuO oxides have low melting temperatures which are less than burning temperatures of samples. Therefore ceramics with these additions have liquid phases in the process of sintering.

Recently we have found that CaO and BaO additions to tin oxide based ceramics can provide varistor effect [19]. Such ceramics have no liquid phases at sintering but have intergranular inclusions. The behaviour of these ceramic materials in air with different relative humidity is very important for sensor application.

In order to study the influence of different oxides on the humidity sensitivity and other electrical properties of SnO₂-based ceramics we investigated SnO₂-Co₃O₄-Nb₂O₅-Cr₂O₃ varistor system with several additions prepared by solid-phase sintering (without additions or with CaO addition) and liquid-phase sintering (with CuO or V₂O₅ additions). The electrical properties of ceramics which were sintered differently have not been thoroughly investigated before. The received results are presented in this paper below.

2. EXPERIMENTAL DETAILS

The samples (99.4-x) SnO₂ - 0.5 Co₃O₄ - 0.05 Nb₂O₅ - 0.05 Cr₂O₃ - x A (mol. %), where x = 0 or 0.5, A = CaCO₃, CuO or V₂O₅, were prepared by a conventional mixture method. Mixture of powders was wet-milled with distilled water, dried and pressed in tablets 12 mm in diameter and about 0.7 mm thick under axial pressure 45 MPa. Pressed tablets were sintered in air at the temperatures 1250°C during 1 hour. While heating the tablet with carbonate addition, the decomposition CaCO₃ with CO₂ emission took place and this compound changed into CaO [19].

The microstructure of ceramics was studied by the scanning electron microscope Zeiss Supra 35VP. The shrinkage of the samples γ was calculated by the expression

$$\gamma = \frac{D_0 - D}{D_0}, \quad (1)$$

where D_0 and D are the diameters of the sample before and after sintering respectively.

Electrical characteristics were obtained after storage of the samples in the room conditions during four months after the sintering in order to achieve the stability of their electrical properties [17]. In-Ga-eutectic electrodes were used in tested samples. Current-voltage characteristics were recorded by applying dc voltage in air with fixed relative humidity w and measuring the steady-state current. The possible self-heating of samples during the measurement was detected as the increase of current at a fixed voltage. The results were obtained avoiding the self-heating of the samples. They are presented as the dependence of the current density j on the electric field E to compare properties of different materials.

The nonlinearity coefficient β was calculated by

$$\beta = \frac{E}{j} \frac{dj}{dE} = \frac{d(\log j)}{d(\log E)} \approx \frac{\log(j_1 / j_{0.1})}{\log(E_1 / E_{0.1})}, \quad (2)$$

where E_1 and $E_{0.1}$ are the applied electric fields corresponding to the current densities $j_1 = 1 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ and $j_{0.1} = 0.1 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ respectively.

The fixed values of air relative humidity w in the 10-93% range were obtained by putting samples into a closed chamber above the surface of water solution of a proper salt for about 1 hour before starting measurements. Current-voltage characteristics were recorded at $w_1 = 10\%$ and then at higher relative humidity. Before the next increase of the relative humidity the samples were kept again at $w_1 = 10\%$ and current-voltage characteristics were recorded again. The irreversible changes of conductivity were not observed. The humidity sensitivity coefficient

$$S = \frac{\sigma_{w2} - \sigma_{w1}}{\sigma_{w1}} \quad (3)$$

was calculated at electric field $0.5 E_1$ and relative humidity $w_1 = 10\%$ and $w_2 = 93\%$.

The temperature dependence of dc electrical conductivity $\sigma(T)$ was obtained at heating of samples in air. It allows estimating the grain-boundary potential barrier height φ_0 in high-temperature part of $\sigma(T)$ dependences. The values of φ_0 is only slightly less than the activation energy of electrical conduction E_σ [20] found by formula

$$E_\sigma \approx -0.2 \frac{\Delta \log \sigma}{\Delta(1000/T)}, \quad (4)$$

where σ is the electrical conductivity and T is the absolute temperature. Low-temperature part of $\sigma(T)$ dependences contains an anomalous area related to non-zero relative humidity [15 - 18].

The dielectric permittivity of the ceramics at different values of air relative humidity was calculated by formula

$$\varepsilon = \frac{Ch}{\varepsilon_0 S}, \quad (5)$$

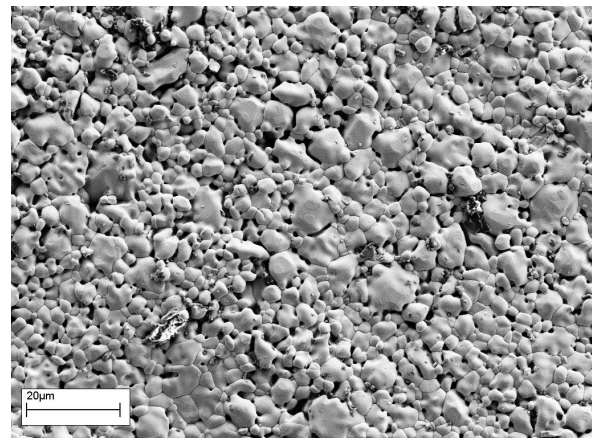
where h is the sample thickness, S is the electrode area and ε_0 is the electric constant. The capacitance C at frequency 1 kHz was measured by LCRG meter Tesla BM 591.

3. RESULTS AND DISCUSSION

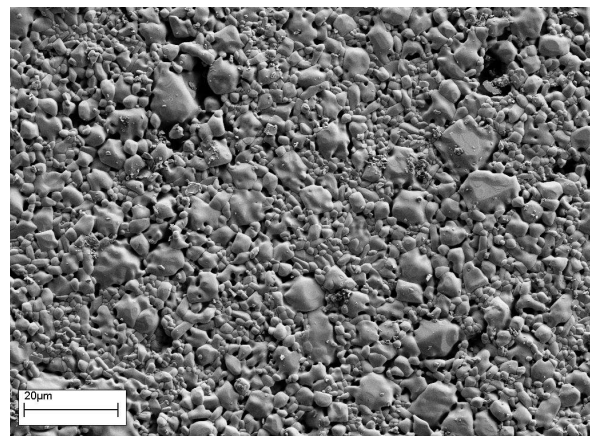
3.1. Microstructure

The micrographs of all studied ceramic materials are shown in Fig. 1. The obtained parameters for these samples are presented in Table 1. The average grain size of $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$

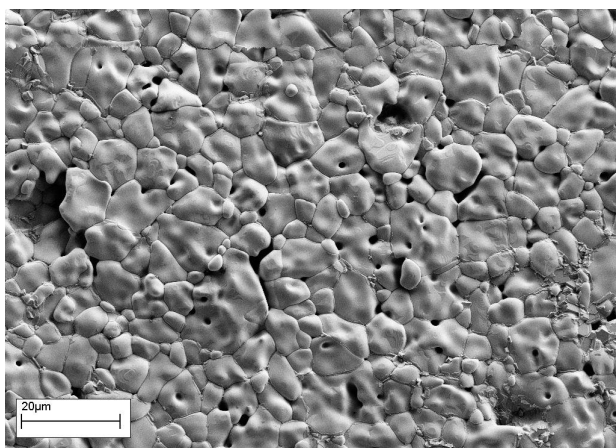
sample is $3.54 \mu\text{m}$. This material was sintered enough but its porosity is significant (Fig. 1a). For that reason this ceramics has the environmental sensitive effects. The sample with CaO addition has the less porous structure (Fig. 1b) and slightly less value of average grain size ($2.58 \mu\text{m}$) than the $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$ sample. It is probably connected with the segregation of the ion Ca^{2+} with large ion radius (104 pm) on the grain boundaries of SnO_2 (ion radius for Sn^{4+} 67 pm) [19]. This leads to the unfavorable conditions for SnO_2 grain growth and the worsening of burning. This conclusion is proved by a smaller value of linear shrinkage for the sample with addition (6.25%) as compared to that for the sample without CaO addition (8.25%). The SnO_2 , Co_3O_4 , Nb_2O_5 , Cr_2O_3 and CaO oxides have melting temperatures which are considerably higher than the burning temperature of ceramics (1250°C). Therefore the sintering of samples with and without CaO addition is a solid-phase one.



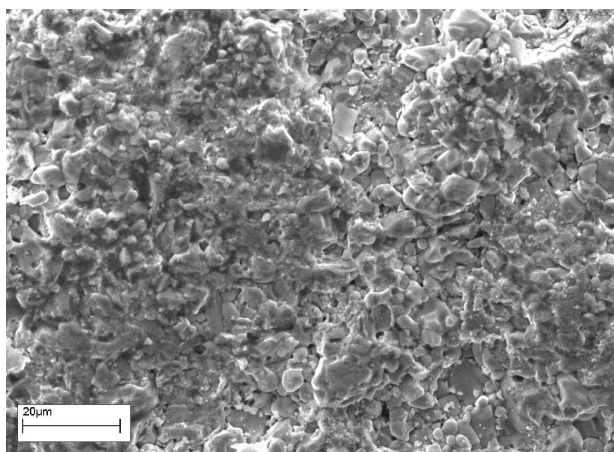
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 1. Micrographs of the as-sintered surface of $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$ ceramics without (a) and with CaO (b), CuO (c) and V_2O_5 (d) additions.

In the micrographs of ceramics with CuO and V_2O_5 additions the tin oxide grains and the intergranular layers are seen (Figs. 1c and 1d). These layers occur rather inhomogeneously throughout such samples. They locate between the SnO_2 grains at CuO addition (Fig. 1c) and even covered the surface of SnO_2 grains at V_2O_5 addition (Fig. 1d). These are CuO-pure [18] and V_2O_5 -pure [17] secondary phases which are liquid at the high burning temperature and solidify during cooling at the sintering. The CuO-rich liquid phases foster the grain growth at high temperatures in the process of burning [18]. Therefore the average grain size in such ceramics ($5.8 \mu\text{m}$) is more than that in the ceramics

without addition. The V_2O_5 -rich intergranular layers are randomly distributed throughout the sample and inhibit the grain growth [17]. The SnO_2 grains rise only to $3.23 \mu\text{m}$ at sintering of ceramics with V_2O_5 addition. The linear shrinkage of $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$ samples with CuO and V_2O_5 additions is large enough (10.92 and 12.17% respectively). The great values of the linear shrinkage confirm the presence of a liquid component at burning and the formation of materials with the strong solid structure (Figs. 1c and 1d). Thus, the sintering of ceramics with CuO and V_2O_5 additions is a liquid-phase one.

The structural peculiarities of the studied samples must correlate with their electrical properties. The appearance of different intergranular inclusions and layers at the sintering can change the conditions of grain-boundary potential barrier formation. So, the electrical characteristics of examined ceramics are investigated and presented below.

3.2. Electrical characteristics

Current-voltage characteristics of SnO_2 -based ceramics with different additions measured in air at room conditions are presented in coordinate $j(E)$ in Fig. 2. The obtained electrical parameters of this ceramics are presented in Table 1. $j(E)$ characteristic of SnCoNbCr sample is highly nonlinear (Fig. 2, curve 1) with values of nonlinearity coefficient $\beta \approx 50$ and breakdown electric field $E_1 = 5630 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$. The relative dielectric permittivity $\varepsilon = 274$ of this sample is quite high due to the formation of the sufficiently large grains (see Fig. 1a) and the existence of thin depletion layers at the grain boundaries [10, 12].

The CaO addition leads to the some increase of electric field E_1 up to $7000 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ (Table 1) though the value of nonlinearity coefficient remains quite high ($\beta \approx 30$). The observed increase of the electric field E_1 in the sample with CaO addition (Fig. 2, curve 2) is due to the decrease of the average grain size (see Fig. 1b) and to the increase of the number of grain boundaries per unit length correspondingly. The relative dielectric permittivity of the sample is also correlated with average grain size [17]. Therefore the value

of dielectric permittivity of the ceramics with CaO addition $\epsilon = 78$ is less than that for $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$ sample.

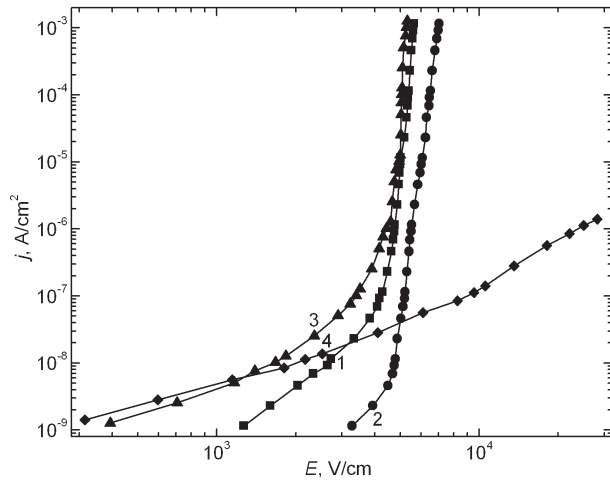


Fig. 2. $j(E)$ characteristics of $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$ ceramics without (1) and with CaO (2), CuO (3) and V_2O_5 (4) additions at room conditions.

In ceramics with CuO addition the average grain size is larger than for the ceramics without addition. So, the electric field E_1 is less (Fig. 2, curve 3), but the dielectric permittivity is larger (Table 1) than that of $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$ ceramics. The sample with CuO addition exhibits quite large value of nonlinearity coefficient $\beta \approx 57$. Probably, the tin oxide grains are wet sufficiently by the CuO-pure liquid phases at the sintering (see Fig. 1c) and therefore the Co_3O_4 and Cr_2O_3 oxides are homogeneously distributed on the sample. These additions are responsible for the high nonlinearity of current-voltage characteristics of the ceramics [10].

The V_2O_5 addition to the $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$ ceramics causes the significant decrease of the nonlinearity coefficient and the increase of breakdown electric field (Fig. 2, curve 4). The vanadium oxide forms quite conductive phases which cover SnO_2 grains (see Fig. 1d) and working as an electric shunt to the grain boundaries [17]. Therefore the nonlinearity of current-voltage characteristics became considerable less and it became impossible to reach the breakdown electric field E_1 (at $j = 1 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$) in our experiment. Besides, the sample with V_2O_5 addition exhibits lower value $\epsilon \approx 14$ (Table 1) due

to the influence of vanadium oxide phase with not high relative dielectric permittivity [21, 22].

The high nonlinearity of current-voltage characteristics in $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$ ceramics and in ceramics with CaO and CuO additions ($\beta = 30 - 57$) is attributed to the grain-boundary nature of conductivity for different tin oxide based varistors [8-19]. In these samples the grains are quite conductive but grain-boundary areas are resistive due to the formation of grain-boundary potential barriers during sintering of ceramics in air atmosphere. Therefore the $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$ sample has low-field electrical conductivity $\sigma = 9.1 \cdot 10^{-13} \text{ Ohm}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$. The values of electrical conductivity became larger with the addition of CuO and V_2O_5 oxides to the ceramics (Table 1). Such samples have quite conductive intergranular phases and, consequently, the electrical conductivity of ceramics increases.

The decrease of low-field conductivity σ up to $3.5 \cdot 10^{-13} \text{ Ohm}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ is observed in the case of CaO addition (Table 1). This effect is connected with the decrease of the grain size (as a result, the significant decrease of the grain boundary cross-section and the increase of grain neck resistivity) and also to the increase of the grain-boundary potential barrier height (see later about this). The effect with lowered low-field conductivity is reproducible if air relative humidity increases. In such conditions the sample with CaO addition has the lowest electrical conductivity.

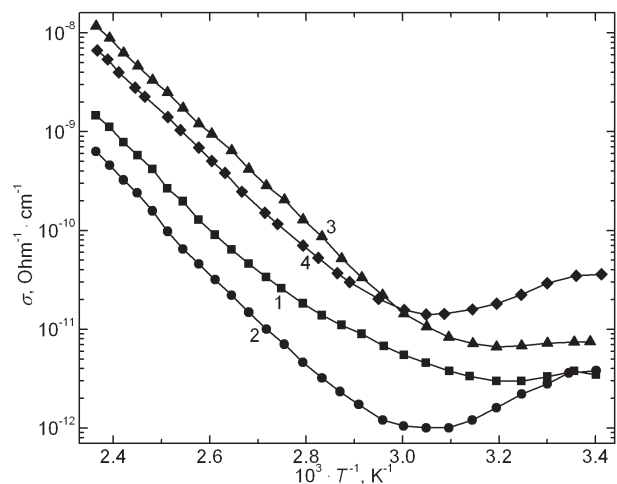


Fig. 3. Temperature dependences of electrical conductivity of $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$ ceramics without (1) and with CaO (2), CuO (3) and V_2O_5 (4) additions.

To explain the observed alteration of the low-field conductivity in the ceramics with different additions the temperature dependences of electrical conductivity were investigated (Fig. 3). The obtained values of the activation energy of electrical conduction E_σ of studied samples are presented in Table 1.

and V_2O_5 additions respectively. It causes the increase of low-field electrical conductivity in these samples (Fig. 2). With adding CaO in $SnO_2-Co_3O_4-Nb_2O_5-Cr_2O_3$ ceramics the activation energy of electrical conduction slightly increases up to 1.03 eV which leads to the decrease of conductivity (Fig. 2).

Table 1.

Parameters of $SnO_2-Co_3O_4-Nb_2O_5-Cr_2O_3$ ceramics with different additions at room conditions

Parameters	Additions			
	–	CaO	CuO	V_2O_5
Average grain size l_g , μm	3.54	2.58	5.80	3.23
Linear shrinkage γ , %	8.25	6.25	10.92	12.17
Electric field E_1 , $V \cdot cm^{-1}$	5630	7000	5280	23710*
Nonlinearity coefficient β	49.9	30.4	56.7	2.4*
Dielectric permittivity ε	274	78	489	14.4
Electrical conductivity σ , $Ohm^{-1} \cdot cm^{-1}$	$9.1 \cdot 10^{-13}$	$3.5 \cdot 10^{-13}$	$3.2 \cdot 10^{-12}$	$4.5 \cdot 10^{-12}$
Activation energy of electrical conduction E_σ , eV	0.97	1.03	0.91	0.94
Humidity sensitivity coefficient S	318180	220540	1830	8920

* at $j = 10^{-6} A \cdot cm^{-2}$

All $\sigma(T)$ dependences are quite complicated: they cannot be approximated by a straight line in the whole studied temperature range 20 - 150°C (Fig. 3). At low temperatures in the range about 20 - 50°C the decrease of low-field conductivity at heating is caused by desorption of water molecules [15 - 18]. The humid air at room conditions can penetrate inside the ceramics and reach grain boundary areas. At heating water molecules evaporate and electrical conductivity of samples decreases (Fig. 3). Further temperature growth (50 - 150°C) gives thermally-activated increase of low-field conductivity.

The obtained value $E_\sigma = 0.97$ eV for $SnO_2-Co_3O_4-Nb_2O_5-Cr_2O_3$ sample gives quite correct estimation of the barrier height [20]. The addition of different oxides leads to some variation of $\sigma(T)$ dependences (Fig. 3). Commonly, the values of activation energy are quite high (Table 1). The weak decrease of E_σ up to 0.91 and 0.94 eV is found for ceramics with CuO

and V_2O_5 additions respectively. Thus, in the $SnO_2-Co_3O_4-Nb_2O_5-Cr_2O_3$ sample and in the ceramics with different additions the electrical conductivity is controlled by the grain-boundary potential barriers. The thermionic emission across the barrier is the most probable conduction mechanism near about 20 - 150°C.

3.3. Effect of humidity on the electrical properties

Low-field electrical conductivity of various tin oxide based ceramics is increased with the growth of air relative humidity [3 - 8, 15 - 18]. However, the humidity sensitivity of solid-phase sintering and liquid-phase sintering ceramic materials is studied insufficiently. Therefore we decided to study current-voltage characteristics of all obtained samples at different humidity of air.

For example, the $j(E)$ dependences of $SnO_2-Co_3O_4-Nb_2O_5-Cr_2O_3-CuO$ ceramics measured in air with various relative humidity are shown in

Fig. 4. They are close to linear ones at low electric fields but they are highly nonlinear at higher electric fields. The rise of relative humidity from 10 to 93% causes the strong shift of low-field part of $j(E)$ characteristics to higher current but high-field part of these characteristics changes weakly (Fig. 4). This effect is reversible and reproducible. If such samples are placed in dry air (with relative humidity 10%) after humid air (with relative humidity 34 - 93%), then their characteristics return to the initial state.

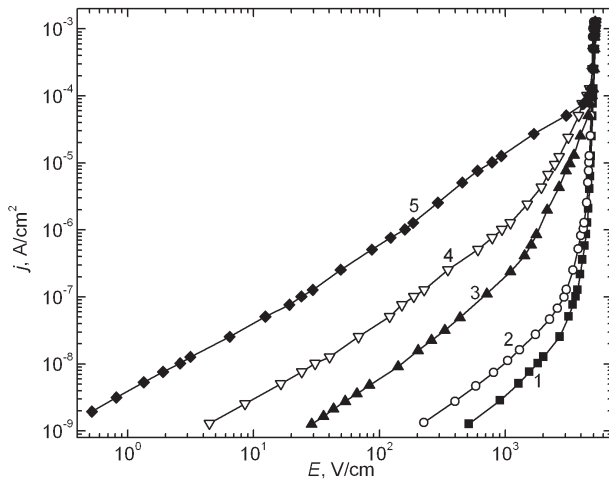


Fig. 4. $j(E)$ characteristics of $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-CuO}$ ceramics in air with relative humidity 10 (1), 34 (2), 51 (3), 82 (4) and 93% (5).

For comparison the humidity sensitivity of tin oxide based ceramics with different additions, we presented in Fig. 5 the $j(E)$ characteristics of all investigated samples in air with relative humidity 10 and 93%. The rise of relative humidity causes the increase of low-field electrical conductivity for all ceramics. The sample with CuO addition showed the lowest increase than the other samples (Fig. 5). The intergranular layers of CuO-pure secondary phases prevent the access of the humid air into the electrical active areas of grain boundaries and diminish the role of barrier-related sensitivity mechanism.

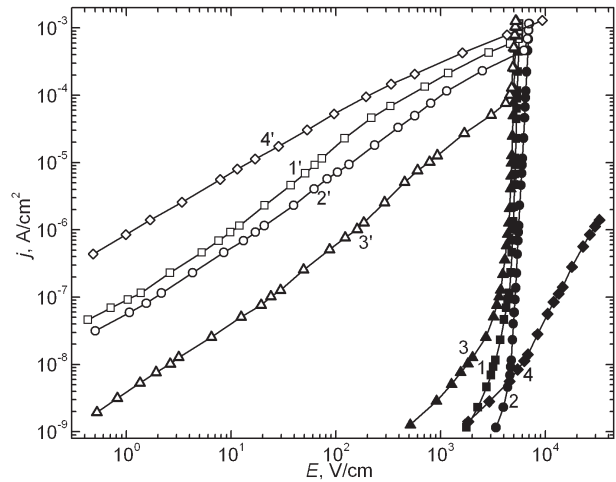


Fig. 5. $j(E)$ characteristics of $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$ ceramics without (1, 1') and with CaO (2, 2'), CuO (3, 3') and V_2O_5 (4, 4') additions in air with relative humidity 10% (1, 2, 3, 4) and 93% (1', 2', 3', 4').

In order to estimate the influence of humidity on the characteristics of studied samples the values of humidity sensitivity coefficient S are presented in Table 1. For the solid-phase sintering ceramics the addition of CaO oxide causes the decrease of the value S . It can be explained by the segregation of the secondary solid phases at the grain boundaries [19] and the decrease of the environmental influence on the electrical properties of ceramics. For the liquid-phase sintering samples with CuO and V_2O_5 additions the humidity sensitivity is less (Table 1) because such ceramics are more solid and less porous. Besides, solidified at sintering the CuO and V_2O_5 secondary liquid phases located at grain boundary areas and even cover surface of SnO_2 grains (see Figs. 1c and 1d) and partially prevent the penetration of humid air into the grain boundaries. For that reason the electrical conductivity increases less at higher humidity. Therefore humidity sensitivity of liquid-phase sintering samples is lower than that of the solid-phase sintering ceramics.

The high humidity sensitivity of studied material is explained by the grain boundary controlled conduction mechanism [8, 15 - 18]. The observed increase of the low-field electrical conductivity with the rise of air relative humidity (Figs. 4 and 5) can be caused by the decrease of the grain-boundary barrier height. It was

shown earlier that the potential barrier height decreases only by nearly 20% if air relative humidity reaches about 80% [16]. Therefore the grain-boundary potential barriers at high humidity are still sufficiently high to be decreased at high voltages. Thus, highly-nonlinear $j(E)$ dependences are still observed at high values of relative humidity (Figs. 4 and 5).

The rise of low-field electrical conductivity at the increase of air relative humidity is connected with the adsorption of water molecules at the near-surface areas of studied ceramics. These molecules can dissociate according to the equation



The quite mobile proton H^+ can penetrate to the grain-boundary areas and interact with oxygen which has been chemisorbed there at the sintering of ceramics in oxidizing atmosphere. For that reason the total negative charge at the near-surface grain boundary can become lower in absolute value. This leads to the decrease of potential barrier heights. Therefore in air with higher relative humidity the grain-boundary barriers are lower at the near-surface areas of sample and the low-field electrical conductivity of ceramics is larger than in air with lower relative humidity.

If the samples were placed into the dry air (with relative humidity 10%) after recording of current-voltage characteristics, desorption of water molecules began. The grain-boundary potential barrier heights are increasing and the low-field electrical conductivity of samples is decreasing. The $j(E)$ characteristics return to the initial state.

The existence of the grain-boundary potential barriers in studied ceramics is confirmed by the following observed facts: strong non-Ohmic conduction at relatively low electric fields (see Fig. 2), thermally-activated electrical conductivity (see Fig. 3) and reversible increase of dielectric permittivity with the rise of relative humidity. The last statement is related to the decrease of grain-boundary barrier height as well as the width of these barriers at higher air humidity. The less the grain-boundary barrier width is the

larger dielectric permittivity of sample is. This conclusion is proved by the values of dielectric permittivity for all samples with different additions (Table 2). The dielectric permittivity of ceramics is increasing with the rise of air relative humidity.

Table 2.

Dielectric permittivity of $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$ ceramics without and with CaO, CuO and V_2O_5 additions at different values of air relative humidity

Relative humidity, %	Additions			
	–	CaO	CuO	V_2O_5
10	245.7	77.2	483.3	14.2
34	254.5	77.5	484.3	14.3
51	275.8	86.7	505.8	27.1
82	399.1	223.5	569.4	3759
93	885.1	265.5	677.0	876147

Thus, the discussed humidity-sensitive effect in tin oxide based ceramics leads to the increase of low-field electrical conductivity in humid air in comparison with dry air. The obtained results for SnO_2 -based humidity-sensitive ceramics allow using it as the sensors that are the devices for measuring the air relative humidity.

4. CONCLUSIONS

The humidity-sensitive properties and varistor characteristics are observed in solid-phase and liquid-phase sintering of SnO_2 -based ceramics with different additions. These peculiarities are explained by the decrease of the grain-boundary potential barrier height and width on relative humidity (at low electric fields) and on voltage (at high electric fields). The estimated values of barrier height of studied samples are 0.91 - 1.03 eV. Low-field electrical conductivity and dielectric permittivity of investigated ceramics are increased with the rise of air relative

humidity. The lowest humidity sensitivity coefficient $S = 1830$ and highest nonlinearity coefficient $\beta = 57$ at electric field $E_1 = 5280 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ were obtained for $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-CuO}$ sample. The values S is decreased with CaO addition (solid-phase sintering) and greatly decreased with CuO and V_2O_5 additions (liquid-phase sintering). The CaO addition provides the lowest value of low-field electrical conductivity for studied samples. The observed decrease of the conductivity at low field correlates with the experimentally found increase of the activation energy of electrical conduction and the decrease of the grain size. The studied ceramics are prospective materials for humidity sensors and varistor production.

ACKNOWLEDGMENTS

The author is very grateful to Dr. A. B. Glot (Universidad Tecnológica de la Mixteca) and Dr. R. Bulpett (Experimental Techniques Centre, Brunel University) for their help with the scanning electron microscopy.

REFERENCES

- [1]. B. M. Kulwicki. Ceramic sensors and transducers // *J. Phys. Chem. Solids*, 45 (10), pp. 1015-1031 (1984).
- [2]. W. Gopel, K. D. Schierbaum. SnO_2 sensors: current status and future prospects // *Sens. Actuat. B: Chem.*, 26 (1-3), pp. 1-12 (1995).
- [3]. J. F. McAleer, P. T. Moseley, J. O. W. Norris, D. E. Williams. Tin dioxide gas sensors. Part 1. Aspects of the surface chemistry revealed by electrical conductance variations // *J. Chem. Soc., Faraday Trans. 1*, 83 (4), pp. 1323-1346 (1987).
- [4]. J. F. McAleer, P. T. Moseley, J. O. W. Norris, D. E. Williams, B. C. Tofield. Tin dioxide gas sensors. Part 2. The role of surface additives // *J. Chem. Soc., Faraday Trans. 1*, 84 (2), pp. 441-457 (1988).
- [5]. E. Traversa. Ceramic sensors for humidity detection: the state-of-the-art and future developments // *Sens. Actuat. B: Chem.*, 23 (2-3), pp. 135-156 (1995).
- [6]. Z. Chen, C. Lu. Humidity sensors: a review of materials and mechanisms // *Sensor Lett.*, 3 (4), pp. 274-295 (2005).
- [7]. S. P. Yawale, S. S. Yawale, G. T. Lamdhade. Tin oxide and zinc oxide based doped humidity sensors // *Sens. Actuat. A: Phys.*, 135 (2), pp. 388-393 (2007).
- [8]. A. B. Glot. Conductivity of SnO_2 based ceramics // *Inorg. Mater.*, 20 (10), pp. 1522-1523 (1984).
- [9]. A. B. Glot, A. P. Zlobin. Nonohmic conductivity of tin dioxide ceramics // *Inorg. Mater.*, 25 (2), pp. 274-276 (1989).
- [10]. S. A. Pianaro, P. R. Bueno, E. Longo, J. A. Varela. A new SnO_2 -based varistor system // *J. Mater. Sci. Lett.*, 14 (10), pp. 692-694 (1995).
- [11]. P. N. Santosh, H. S. Potdar, S. K. Date. Chemical synthesis of a new tin dioxide based (SnO_2 : Co, Al, Nb) varistor // *J. Mater. Res.*, 12 (2), pp. 326-328 (1997).
- [12]. A. B. Glot. Non-ohmic conduction in oxide ceramics: tin dioxide and zinc oxide varistors. Chap. 10 in *Ceramic Materials Research Trends*, Ed. P.B. Lin, pp. 227-273, Nova Science Publishers, Inc., New York (2007).
- [13]. A. B. Glot, A. V. Gaponov, A. P. Sandoval-Garcia. Electrical conduction in SnO_2 varistors // *Phys. B: Condensed Matter*, 405 (2), pp. 705-711 (2010).
- [14]. A. V. Gaponov, A. B. Glot. Non-ohmic conduction in tin dioxide based ceramics with copper addition // *Semicond. Phys., Quant. Electron. & Optoelectr.*, 14 (1), pp. 71-76 (2011).
- [15]. I. Skuratovsky, A. Glot, E. Di Bartolomeo, E. Traversa, R. Polini. The effect of humidity on the voltage-current characteristic of SnO_2 based ceramic varistor // *J. Eur. Ceram. Soc.*, 24 (9), pp. 2597-2604 (2004).
- [16]. I. Skuratovsky, A. Glot, E. Traversa. Modelling of the humidity effect on the barrier height in SnO_2 varistors // *Mater. Sci. Eng. B*, 128 (1-3), pp. 130-137 (2006).
- [17]. A. V. Gaponov, A. B. Glot, A. I. Ivon, A. M. Chack, G. Jimenez-Santana. Varistor and humidity-sensitive properties of $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$ ceramics with V_2O_5 addition // *Mater. Sci. Eng. B*, 145 (1-3), pp. 76-84 (2007).
- [18]. A. B. Glot, A. P. Sandoval-Garcia, A. V. Gaponov, R. Bulpett, B. J. Jones, G. Jimenez-Santana. Electronic properties of SnO_2 -based ceramics with double function of varistor and humidity sensor // *Adv. in Tech. of Mat. and*

Mat. Proc. J., 10 (1), pp. 21-32 (2008).

[19]. A. V. Gaponov, O. V. Vorobiov, A. M. Vasyliiev. Electrical parameters of SnO₂ based varistor ceramics with CaO and BaO additions // Phys. Chem. Solid State, 17 (1), pp. 81-87 (2016).

[20]. M. Batzill, U. Diebold. The surface and materials science of tin oxide // Prog. Surf. Sci., 79, pp. 47-154 (2005).

[21]. A. I. Ivon, I. M. Chernenko. Dielectric polarization of vanadium pentoxide // Izv. Vyssh. Ucheb. Zaved., Fiz., 21 (1), pp. 111-113 (1978).

[22]. R. Sengodan, B. Chandar Shekar, S. Sathish. Morphology, structural and dielectric properties of vacuum evaporated V₂O₅ thin films // Phys. Proc., 49, pp. 158-165 (2013).

Стаття надійшла до редакції 15.05.2018 р.

PACS 73.30.+y, 73.40.-c, 73.50.Fq; UDC 621.316.91

DOI 10.18524/1815-7459.2018.3.142041

HUMIDITY SENSORS BASED ON SnO₂-Co₃O₄-Nb₂O₅-Cr₂O₃ SEMICONDUCTOR VARISTOR CERAMICS

A. V. Gaponov

Dnipro National University, 72 Gagarin ave., Dnipro, 49010, Ukraine,
tel.: +380 50 3214157, E-mail: alexei_gaponov@ukr.net

Summary

The aim of this article is to study the influence of different oxides on the humidity-sensitivity properties and electrical characteristics of SnO₂-based semiconductor ceramics. In this paper we have investigated SnO₂-Co₃O₄-Nb₂O₅-Cr₂O₃ varistor ceramics with three various additions prepared by solid-phase sintering (without or with CaO addition) and liquid-phase sintering (with CuO or V₂O₅ additions).

The microstructure of samples was studied by the scanning electron microscope. The current-voltage characteristics, the values of dielectric permittivity of the ceramics at air relative humidity 10 - 93% and the temperature dependences of electrical conductivity were recorded.

The low-field electrical conductivity and dielectric permittivity of ceramics are increased when air relative humidity rises from 10 to 93%. Such effects are observed both in the samples prepared by solid-phase sintering and in the samples prepared by liquid-phase sintering. The lowest humidity-sensitivity effect was found in the liquid-phase sintering samples due to the more solid structures and the secondary phases which are located between the SnO₂ grains. For the studied samples the values of humidity sensitivity coefficient $1.8 \cdot 10^3$ - $3.2 \cdot 10^5$ at low electric fields and the nonlinearity coefficient 30-57 at high electric fields ($E_1=5.3$ - 7 kV·cm⁻¹) were calculated.

The properties of oxide ceramics are explained by electrical conductivity which is controlled by the grain-boundary potential barriers. The barrier height decreases with the increase both of air relative humidity at low electric fields and of voltage at high electric fields. Strong humidity sensitivity is a key factor for sensor application of SnO₂-based ceramics.

Keywords: humidity sensor, tin oxide, varistor, oxide ceramics, grain boundary, electrical conductivity

СЕНСОРИ ВОЛОГОСТІ НА ОСНОВІ НАПІВПРОВІДНИКОВОЇ ВАРИСТОРНОЇ КЕРАМІКИ $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$

О. В. Гапонов

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, Дніпро,
49010, Україна, тел.: +380 50 3214157, E-mail: alexei_gaponov@ukr.net

Реферат

Метою цієї статті є вивчення впливу різних оксидів на вологочутливі властивості й електричні характеристики напівпровідникової кераміки на основі SnO_2 . В цій роботі ми провели дослідження варисторної кераміки $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$ з трьома різними домішками, виготовленої шляхом твердо-фазного синтезу (без або з CaO домішкою) і рідко-фазного синтезу (з CuO або V_2O_5 домішками).

Мікроструктура зразків досліджена в скануючому електронному мікроскопі. Були зареєстровані вольт-амперні характеристики, значення діелектричної проникності кераміки при відносній вологості повітря 10 - 93% і температурні залежності електричної провідності.

Електропровідність у слабких полях і діелектрична проникність кераміки збільшувались при зростанні відносної вологості повітря з 10 до 93%. Такі ефекти спостерігались як для твердо-фазних синтезованих зразків, так і для рідко-фазних синтезованих зразків. Найменшу вологочутливість мають рідко-фазні синтезовані зразки у зв'язку з їх більш щільною структурою й існуючими вторинними фазами, які розташовуються між зернами SnO_2 . Для досліджених зразків обчислені значення коефіцієнта вологочутливості $1,8 \cdot 10^3\text{-}3,2 \cdot 10^5$ при слабких електричних полях і коефіцієнта нелінійності 30 - 57 при сильних електричних полях ($E_1=5,3\text{-}7$ кВ·см⁻¹).

Властивості оксидної кераміки пояснюються електричною провідністю, яка контролюється потенціальними бар'єрами на межах зерен. Висота бар'єрів зменшується як зі збільшенням відносної вологості повітря при слабких електричних полях, так і напруги при сильних електричних полях. Велика вологочутливість є ключовим фактором для сенсорного використання кераміки на основі SnO_2 .

Ключові слова: сенсор вологості, оксид олова, варистор, оксидна кераміка, межа зерен, електрична провідність

БІОСЕНСОРИ

BIOSENSORS

УДК: 543.06 + 577.15 + 543.553
DOI 10.18524/1815-7459.2018.3.142042

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕДУРИ ВИЗНАЧЕННЯ ЛАКТАТУ ТА ПІРУВАТУ У СИРОВАТЦІ КРОВІ ЗА ДОПОМОГОЮ БІОСЕНСОРНОЇ СИСТЕМИ

І. С. Кучеренко¹, Я. В. Топольнікова¹, Д. В. Книжникова², О. О. Солдаткін^{1,2}

¹Інститут молекулярної біології і генетики НАН України,
вул. Заболотного, 150, 02680, м. Київ, Україна

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

e-mails: kucherenko.i.s@gmail.com, topolnyk.ya@gmail.com, melonika5@gmail.com,
alex_sold@yahoo.com

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕДУРИ ВИЗНАЧЕННЯ ЛАКТАТУ ТА ПІРУВАТУ У СИРОВАТЦІ КРОВІ ЗА ДОПОМОГОЮ БІОСЕНСОРНОЇ СИСТЕМИ

І. С. Кучеренко, Я. В. Топольнікова, Д. В. Книжникова, О. О. Солдаткін

Анотація. Метою даної роботи була оптимізація процедури одночасного визначення концентрацій лактату та пірувату в сироватці крові людини з використанням біосенсорної системи. Система складалась з двох амперометричних біосенсорів на основі піруватоксидази та лактатоксидази відповідно, що підключались до однієї вимірювальної схеми та одночасно працювали в єдиній вимірювальній комірці. В роботі було перевірено залежність відгуків біосенсорної системи від ступеня розведення сироватки крові в робочій комірці. Досліджено відтворюваність відгуків і зміну калібрувальних кривих біосенсорної системи при роботі з сироваткою крові. Визначено концентрації лактату, пірувату та їх співвідношення в зразках сироватки крові і показана висока кореляція отриманих результатів з даними контрольного методу. Доведено, що запропонована біосенсорна система придатна для швидкого визначення лактату, пірувату та їх співвідношення і може бути використана при медичній діагностиці відповідних захворювань.

Ключові слова: амперометричний біосенсор, лактат, піруват, співвідношення лактату і пірувату, сироватка крові

OPTIMIZATION OF THE PROCEDURE OF LACTATE AND PYRUVATE DETERMINATION IN BLOOD SERUM USING A BIOSENSOR SYSTEM

I. S. Kucherenko, Ya. V. Topolnikova, D. V. Knyzhnykova, O. O. Soldatkin

Abstract. The purpose of this work was to optimize the procedure for simultaneous determination of concentrations of lactate and pyruvate in human serum using a biosensor system. The system consisted of two amperometric biosensors based on pyruvate oxidase and lactate oxidase, respectively, that were connected to one measuring circuit and simultaneously operated in a single measuring cell. In the work, the dependence of the responses of the biosensor system on the dilution of serum in the working cell was tested. The reproducibility of the responses and the change in the calibration curves of the biosensor system when working with serum were studied. The concentrations of lactate, pyruvate and their ratio in blood serum samples were determined and a high correlation of the results with the data of the control method was shown. It is proved that the proposed biosensor system is suitable for the rapid determination of lactate, pyruvate and their ratio and can be used in the medical diagnostics of the relevant diseases.

Keywords: amperometric biosensor, lactate, pyruvate, lactate to pyruvate ratio, blood serum

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕДУРЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛАКТАТА И ПИРУВАТА В СЫВОРОТКЕ КРОВИ С ПОМОЩЬЮ БИОСЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ

И. С. Кучеренко¹, Я. В. Топольникова¹, Д. В. Книжникова², О. О. Солдаткин^{1,2}

Аннотация. Целью данной работы была оптимизация процедуры одновременного определения концентраций лактата и пирувата в сыворотке крови человека с использованием биосенсорной системы. Система состояла из двух амперометрических биосенсоров на основе пируватоксидазы и лактатоксидазы соответственно, что подключались к одной измерительной схеме и одновременно работали в единой измерительной ячейке. В работе была проверена зависимость откликов биосенсорной системы от степени разведения сыворотки крови в рабочей ячейке. Исследована воспроизводимость откликов и изменение калибровочных кривых биосенсорной системы при работе с сывороткой крови. Определены концентрации лактата, пирувата и их соотношение в образцах сыворотки крови и показана высокая корреляция полученных результатов с данными контрольного метода. Доказано, что предложенная биосенсорная система пригодна для быстрого определения лактата, пирувата и их соотношения и может быть использована при медицинской диагностике соответствующих заболеваний.

Ключевые слова: амперометрический биосенсор, лактат, пируват, соотношение лактата и пирувата, сыворотка крови

1. ВСТУП

Лактат є продуктом метаболізму глюкози та утворюється з пірувату в анаеробних умовах. Підвищення концентрації лактату (лактатацидоз) в крові виникає при гіперпродукції лактату за анаеробних умов внаслідок тканинної гіпоксії. Гіпоксія виникає при багатьох патологічних станах, наприклад ішемії, значної крововтрати, асфіксії, пневмотораксі. Також лактатацидоз виникає або посилюється при недостатньому кліренсі лактату, зокрема при недостатності нирок, печінки, діабеті, тощо [1]. Тому вимірювання концентрації лактату у крові використовується у відділеннях реанімації для оцінки тяжкості стану пацієнта, прогнозу імовірності шоквих станів та колапсу і смертності пацієнтів [2]. Так, стабільна концентрація лактату в крові більше 5 мМ на фоні важкого ацидозу (рН крові менше 7,35) дає прогноз 80% смертності [3].

На сьогоднішній день метаболічні схеми виникнення та перебігу лактатацидозу є предметом дискусії, особливо у випадках, пов'язаних із септичними станами [4]–[6]. Однак розрізнення причин лактатацидозу має цінне діагностичне значення для невідкладної терапії, і в клінічних умовах з цією метою визначають відношення лактату до пірувату у венозній крові. Коли клітинне дихання порушене і є дефіцит кисню, окислення пірувату зменшується, при цьому накопичується багато відновлених форм НАДН і ФАДН₂, і відношення лактату до пірувату зростає, на фоні зростання концентрації обох субстратів. Натомість, порушення функції піруватдегідрогенази блокує цикл Кребса та дихальний ланцюг на самому початку, тому відновлені форми не накопичуються, і співвідношення не змінюється. Також відношення лактату до пірувату у венозній крові використовується для розрізнення вроджених дисфункцій піруватдегідрогеназного комплексу та інших форм вродженого лактатацидозу у новонароджених, для діагностики септичних станів [7].

При підвищеній концентрації лактату в новонароджених проводять визначення кон-

центрації пірувату для додаткової діагностики, але величини співвідношення лактату до пірувату дещо відрізняються в різних літературних джерелах. Згідно з ARUP Laboratories (США), співвідношення більше 30 вказує на порушення дихального ланцюга або циклу Кребса, в той час як співвідношення менше 25 вказує на порушення метаболізму пірувату. Медичні лабораторії Майо (Mayo Medical Laboratories, США) вважають, що дефекти дихального ланцюга зазвичай приводять до співвідношення лактату до пірувату більше 20, в той час як дефекти піруватдегідрогеназного комплексу – до співвідношення менше 10. Таким чином, в обох випадках низьке співвідношення свідчить про проблеми в роботі піруватдегідрогенази, а високе – про порушення роботи мітохондрій.

Крім медичних цілей, визначення концентрацій та співвідношення лактату до пірувату може бути інформативним для харчової промисловості, зокрема, для контролю деяких процесів бродіння та оцінки якості молочних продуктів [8].

Традиційними методами вимірювання лактату та пірувату в клінічній практиці є спектрометрія [1] та флуориметрія [9], також застосовуються такі методи як ЯМР [10] та високоефективна рідинна хроматографія [11]. Однак ці методи потребують тривалої попередньої обробки проби біоматеріалу, а також наявності кваліфікованого персоналу та складного і дорогого обладнання. Біосенсорні методи є також високоточними, швидкими та селективними, при цьому потребують незначних об'ємів зразків біологічних рідин для аналізу.

На сьогодні існують розробки біосенсорів для аналізу лактату та пірувату, як для клінічної діагностики, так і для інших потреб, зокрема харчової промисловості. Так, Sanbay et al. розробили біосенсорну систему для одночасного вимірювання лактату та пірувату у молочнокислих продуктах на основі бактерій *Lactobacillus delbrueckii*, іммобілізованих у шарі поліпіролу [8]. Revzin et al. розробили лабораторний прототип біосенсорного масиву для одночасного вимірювання глюкози,

лактату та пірувату [12]. Однак систем чи мультибіосенсорів для одночасного вимірювання концентрацій лактату та пірувату, які б були апробовані при роботі з сироваткою крові, досі не було описано.

Тому метою даної роботи була оптимізація амперометричної біосенсорної системи для одночасного визначення концентрацій лактату та пірувату і їх співвідношення в сироватці крові людини та порівняння отриманих результатів з контрольним методом визначення лактату і пірувату.

2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Матеріали

Для виготовлення біоселективних елементів біосенсорної системи використовували ферменти лактатоксидазу (ЛОД) із *Pedococcus sp.* (КФ 1.1.3.2) з активністю 35 од. акт./мг та піруватоксидазу (ПОД) з *Aerococcus sp.* (КФ 1.2.3.3) з активністю 54 од. акт./мг виробництва Sigma-Aldrich Chimie (США).

Субстратами біосенсорної системи виступали лактат натрію та піруват натрію виробництва Sigma-Aldrich Chimie (США). Також в роботі використовували бичачий сироватковий альбумін, фотополімер полівінілалкоголь, що містить стирилпіридинові групи (PVA-SbQ), 25% водний розчин глутарового альдегіду, *m*-фенілендіамін, $Mg(NO_3)_2$, НЕРЕС, 4-аміноантипирин та натрієва сіль 3-(*N*-етил-3-метиланліно)-2-гідроксипропансульфонової кислоти (ЕМГК) виробництва Sigma-Aldrich Chimie (США). Тіамінпірофосфат (ТПФ) у вигляді ліофілізату для приготування розчинів для ін'єкцій був вироблений фірмою «Biofarma» (Україна). Інші неорганічні сполуки, що використовувалися в роботі, були вітчизняного виробництва та мали ступінь чистоти „х.ч.“ та „ч.д.а.“.

Зразки сироватки крові людей були люб'язно надані Київським міським науково-практичним центром нефрології та гемодіалізу. Зразки містили відносно невеликі концентрації пірувату (до 50 мкМ), тому в декілька зразків було штучно додано піруват для перевірки роботи біосенсорної системи

в усьому діапазоні можливих концентрацій пірувату і співвідношень лактату до пірувату.

Виготовлення біоселективних елементів

Біоселективні елементи біосенсорів отримували шляхом іммобілізації ферментів і допоміжних речовин на поверхню амперометричних перетворювачів. Перед іммобілізацією чутливу поверхню перетворювачів модифікували плівкою з полі(фенілендіамін) у, метод нанесення якої був описаний в попередній роботі [13]. Дана плівка запобігала окисненню інтерферуючих речовин, які могли бути присутніми в зразках сироватки крові.

Вихідний розчин для виготовлення піруват-чутливого біосенсора містив 20% (тут і далі – масова частка) ПОД, 5% БСА, 10% гліцеролу в 100 мМ фосфатному буфері, рН 6,5. Вихідний розчин для виготовлення лактат-чутливого біосенсора містив 8% ЛОД, 4% БСА, 10% гліцеролу в 100 мМ фосфатному буфері, рН 6,5. Дані розчини змішували з 13,3 % водним розчином PVA-SbQ у пропорції 1:1. Одразу після цього суміш наносили на чутливу поверхню перетворювача і опромінювали її ультрафіолетовим світлом протягом 25 хв. за допомогою УФ лампи КФ-4М для формування біоселективних мембран.

Методика вимірювання

В якості робочих перетворювачів для створення біосенсорної системи виступали платинові дискові електроди власного виробництва, які описані у попередній роботі [14]. Вони склалися з платинового дроту діаметром 0,5 мм, запаяного у скляній трубці. Після нанесення відповідних ферментів на чутливі області перетворювачів отримували біосенсори, чутливі до лактату та пірувату. Два біосенсори, допоміжний платиновий електрод (платиновий дріт) та Ag/AgCl електрод порівняння під'єднували до потенціостату PalmSens (PalmInstruments BV, Нідерланди) із використанням мультиплексору тієї ж фірми. Виміри проводили за кімнатної температури у відкритій вимірювальній комірці об'ємом 1,5 мл при постійному переми-

шуванні та при постійному потенціалі +0,6 В відносно Ag/AgCl електрода порівняння. В якості робочого буфера використовували 25 мМ НЕРЕС, до якого додавали кофактори піруватоксидази – іони магнію (125 мкМ Mg²⁺), ТПФ (500 мкМ) та іони фосфорної кислоти (20 мМ), і доводили рН до 7,4. Усі дослідження проводились щонайменше у трьох повторностях.

Методика фотометричного визначення лактату та пірувату

Для фотометричного вимірювання концентрацій лактату та пірувату застосовувались кольорові реакції.

Вимірювання проводились у пластикових кюветах об'ємом 1 мл. У кювету додавали: 0,3 мМ ЕМГК, 0,1 мМ 4-аміноантипірину, 1 од. акт. пероксидази хрому, 25 мМ НЕРЕС, рН 7,4, та аліквоту сироватки крові конкретного пацієнта (10 мкл для визначення лактату та 100 мкл для визначення пірувату). Запуск реакції починався при додаванні 0,56 од. акт. лактатоксидази або 0,74 од. акт. піруватоксидази. Лактат окиснювався ЛОД до пірувату і пероксиду водню, який в присутності пероксидази реагував з ЕМГК з утворенням фіолетової сполуки. Інтенсивність забарвлення була пропорційна концентрації лактату у пробі. Аналогічно відбувалось і визначення пірувату, оскільки ПОД окиснювала піруват і утворювала пероксид водню.

Оскільки сироватка крові може мати певне забарвлення навіть у розведеному вигляді, а також містити власний пероксид водню, значення абсорбції (інтенсивності поглинання світла розчином) досліджуваного розчину перед додаванням ЛОД чи ПОД прирівнювали до нуля. Після цього в кювету додавали ЛОД чи ПОД і інкубували протягом 5 хв, після чого вимірювали значення абсорбції проби. Підбір оптимального часу інкубації було проведено попередньо.

Вимірювання абсорбції розчину сироватки проводилось спектрофотометром Thermo Electron Corporation Bio Mate 5. На початку роботи було підбрано оптимальну довжину хвилі світла для вимірювання абсорбції

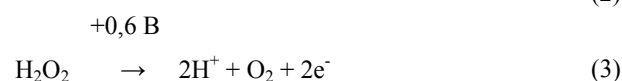
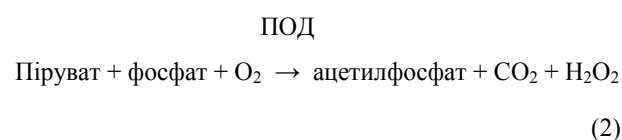
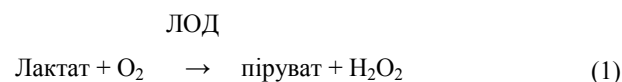
– найвищий пік поглинання продукту реакції спостерігався при довжині хвилі 555 нм, і саме цю довжину хвилі використовували у всіх фотометричних вимірюваннях.

Абсорбцію невідомого зразку порівнювали з попередньо отриманими калібрувальними кривими, які показували залежність абсорбції розчину від концентрацій лактату та пірувату.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Принцип роботи біосенсорної системи

Робота біосенсорної системи базується на наступних ферментативних реакціях. Лактат-чутливий біосенсор містить ЛОД, яка окиснює лактат до пірувату, генеруючи одночасно пероксид водню (1). Піруват-чутливий біосенсор містить ПОД, яка перетворює піруват і фосфат на ацетилфосфат, вуглекислий газ та пероксид водню (2). Утворений H₂O₂ розкладається на чутливій поверхні перетворювачів в реакції (3) і поява в ній електронів призводить до відгуків біосенсорів.



Розробку та детальний опис біосенсорної системи було представлено авторами в попередній роботі [15]. Коротко, за оптимальних умов (див. розділ «Методика вимірювання»), лінійний діапазон визначення лактату становив від 5-1000 мкМ, а пірувату – 10-5000 мкМ. Мінімальна межа визначення лактату складала 3 мкМ, а пірувату – 5 мкМ. Тривалість одного аналізу була 5 хв.

Підбір оптимального розведення сироватки крові

В принципі біосенсорна система придатна для визначення лактату та пірувату у нероз-

веденій сироватці крові, але це не є доцільним, оскільки сироватка містить велику кількість компонентів (білки, ліпіди, фрагменти зруйнованих клітин), які можуть адсорбуватися на чутливій поверхні біосенсорів [16], [17]. Це призводить до погіршення дифузії речовин до поверхні і зменшення чутливості біосенсора.

Для зменшення впливу компонентів зразку і збільшення кількості зразків, які можуть бути проаналізовані біосенсорною системою без необхідності заміни біосенсорів, потрібно проводити розведення зразку. Друга необхідність у розведенні зразка полягає в надто високій концентрації лактату в сироватці, яка часто перевищує лінійний діапазон роботи лактат-чутливого біосенсора. Розведення зразку дозволяє зменшити концентрацію лактату, щоб напевно потрапити в лінійну ділянку роботи біосенсора.

В нашому випадку розведення відбувається безпосередньо у робочій комірці, тобто попередньої обробки проби проводити не потрібно. Зважаючи на мінімально можливу концентрацію лактату у сироватці (близько 0,5 мМ), можливо розводити пробу до 150 разів. Об'єм робочої комірки біосенсора становить 1,5 мл, відповідно 150-кратне розведення потребує додавання до комірки 10 мкл сироватки. Ми вирішили дослідити залежність відгуків біосенсора від доданого об'єму сироватки крові (Рис. 1).

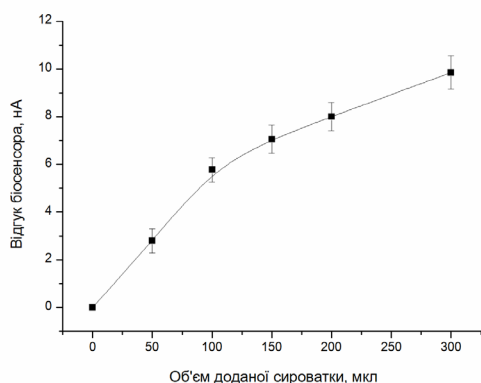


Рис. 1. Залежність відгуку лактат-чутливого біосенсора від об'єму сироватки крові, який було додано до робочої комірки.

Виявилось, що відгук зростає лінійно при додаванні до 100 мкл сироватки (тобто 15-кратного розведення), після чого збільшення відгуків стає повільнішим, що свідчить про погіршення чутливості біосенсора при надто високій концентрації сироватки. Це можна пояснити негативним впливом компонентів сироватки на роботу біосенсора. Для піруват-чутливого біосенсора спостерігалась аналогічна картина, але діапазон можливих розведень сироватки був значно вужчим: мінімальна межа визначення пірувату становили 5 мкМ, а мінімальна концентрація пірувату в сироватці крові за нормальних умов – 40 мкМ, тому максимально можливим є 8-кратне розведення зразку. В подальшій роботі використовували 5-кратне розведення зразку для забезпечення надійного попадання концентрації пірувату та лактату в межі лінійного діапазону роботи біосенсорної системи.

Перевірка впливу сироватки крові на калібрувальні криві біосенсорної системи

Як було згадано раніше, передбачалося, що під час вимірювань сироватки крові відбудеться осадження речовин на поверхні біоселективної мембрани біосенсорів, що призведе до поступового зменшення чутливості біосенсорів. Тому необхідно було порівняти калібрувальні криві біосенсорної системи до та після аналізу сироватки. Як виявилось, після 7 вимірювань сироватки крові чутливість біосенсорної системи не тільки не зменшилась, а навіть збільшилась на 10-20% (Рис. 2). Ймовірно це пояснюється поступовим відновленням активності ферментів після іммобілізації, в той час як блокування чутливої поверхні компонентами сироватки було несуттєвим. Цей ефект слід враховувати при проведенні вимірювань. Наприклад, для розрахунків концентрацій речовин можливо використовувати середню чутливість біосенсорів до та після аналізів сироватки, або ввести коефіцієнт збільшення чутливості біосенсорів з часом. Також можливе використання методу стандартних додавань, для якого не потрібне попереднє отримання калібрувальних кривих.

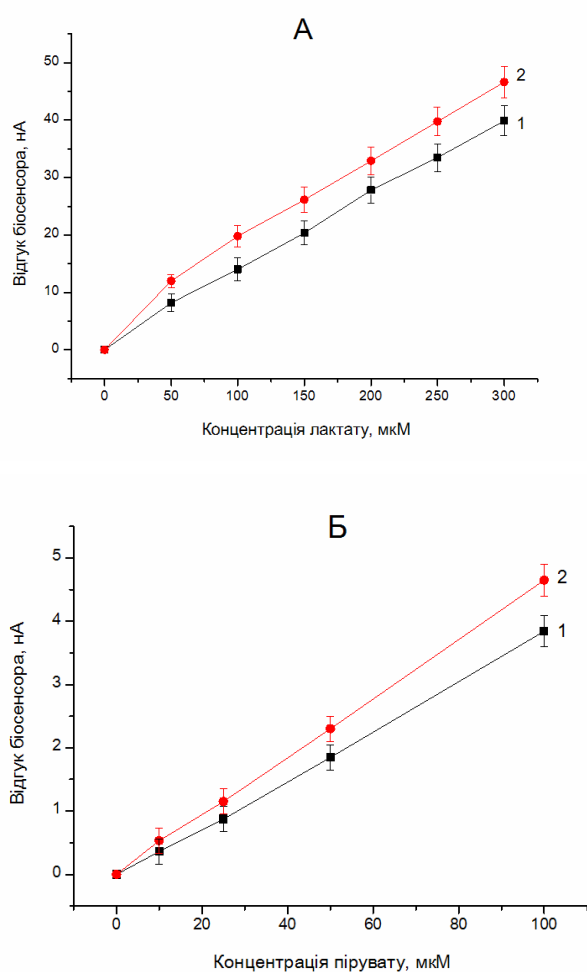


Рис. 2. Калібрувальні криві лактат-чутливого біосенсора (А) та піруват-чутливого біосенсора (Б), отримані до (1) та після (2) семи вимірювань сироватки крові.

Відтворюваність відгуків біосенсорної системи на сироватку крові

Відтворюваність відгуків біосенсорів є важливою аналітичною характеристикою, яка показує розбіжність між результатами декількох вимірювань одного зразку. Для її оцінки було отримано 7 відгуків біосенсорної системи на додавання сироватки крові до робочої комірки (Рис. 3). Під час вимірювань, зменшення відгуків не спостерігалось. Відносне середньоквадратичне відхилення відгуків лактат-чутливого біосенсора становило 4,5%, а піруват-чутливого – 9,3%. Це свідчить про достатньо високу точність біосенсорної системи і можливість її практич-

ного використання для багаторазового вимірювання реальних зразків.

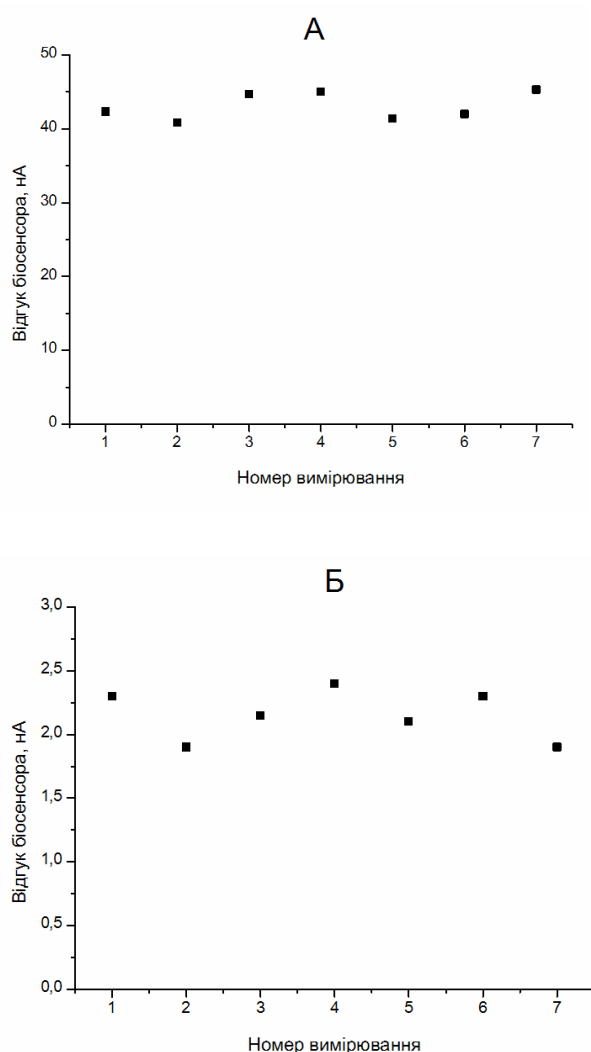


Рис. 3. Відтворюваність відгуків лактат-чутливого біосенсора (А) та піруват-чутливого біосенсора (Б) при проведенні послідовних вимірювань сироватки крові.

Визначення концентрації лактату, пірувату і їх співвідношення у зразках сироватки крові

Після оптимізації процедури вимірювання було проведено визначення концентрації лактату та пірувату у семи зразках сироватки крові людей. Біосенсорні вимірювання проводились із використанням калібрувальних кривих, в той час як контрольним методом виступав фотометричний метод визначення лактату та пірувату (Табл. 1). Також були

побудовані кореляційні графіки (Рис. 4). Кореляція (R^2) між результатами, отриманими за допомогою лактат-чутливого біосенсора і фотометрією становила 0,944, результатами піруват-чутливого біосенсора і фотометрією – 0,964, що є досить високим показником і свідчить про співвідносність результатів біосенсорної системи та контрольного метода. Таким чином, біосенсорну систему можна використовувати для визначення концентрацій лактату, пірувату і їх співвідношення у сироватці крові.

Доцільно порівняти отримані результати з літературними даними. Зокрема, в роботі [18] в 7 здорових людей у стані спокою концентрація лактату в крові була встановлена як $0,8 \pm 0,03$ мМ, а пірувату – $0,11 \pm 0,04$ мМ. Співвідношення лактату до пірувату становило $8,9 \pm 3,2$. В іншій роботі досліджували концентрації лактату і співвідношення лак-

тату до пірувату у 60 пацієнтів з шоківим станом і лактатацидозом [19]. У випадку септичного шоку, концентрації лактату становили від 4,6 мМ до 12,2 мМ, а співвідношення лактату до пірувату – від 19 до 37. В пацієнтів, які одужували, концентрація лактату зменшилась до $2,8 \pm 0,4$ мМ, а співвідношення лактату до пірувату зменшилось до 14 ± 1 після 24 годин. У випадку кардіогенного шоку, концентрація лактату складала 4 ± 1 мМ, а співвідношення лактату до пірувату – 40 ± 6 . В іншій роботі були встановлені співвідношення лактату до пірувату в 110 дітей з гострою печінковою недостатністю, які становили від 2,8 до 170,0, а медіанне значення складало 22,5 [20]. Таким чином, наші результати вимірювань концентрацій лактату та пірувату і їх співвідношення, наведені в Табл. 1, є цілком співставними з літературними даними.

Таблиця 1.

Результати визначення концентрацій лактату та пірувату в сироватці крові за допомогою біосенсорної системи та фотометричного метода.

Номер зразку	Концентрація лактату		Концентрація пірувату		Співвідношення лактату до пірувату
	Біосенсор, мМ	Фотометрія, мМ	Біосенсор, мкМ	Фотометрія, мкМ	
1	$2,7 \pm 0,7$	$3,0 \pm 0,7$	113 ± 19	121 ± 21	24
2	$1,4 \pm 0,3$	$1,1 \pm 0,3$	116 ± 18	108 ± 20	12
3	$1,1 \pm 0,3$	$1,1 \pm 0,3$	98 ± 15	91 ± 14	11
4	$0,6 \pm 0,1$	$0,54 \pm 0,2$	31 ± 4	25 ± 4	19
5	$1,3 \pm 0,3$	$1,3 \pm 0,4$	32 ± 3	27 ± 5	41
6	$1,2 \pm 0,3$	$1,0 \pm 0,3$	26 ± 6	35 ± 7	46
7	$1,4 \pm 0,3$	$1,6 \pm 0,6$	134 ± 17	146 ± 20	10

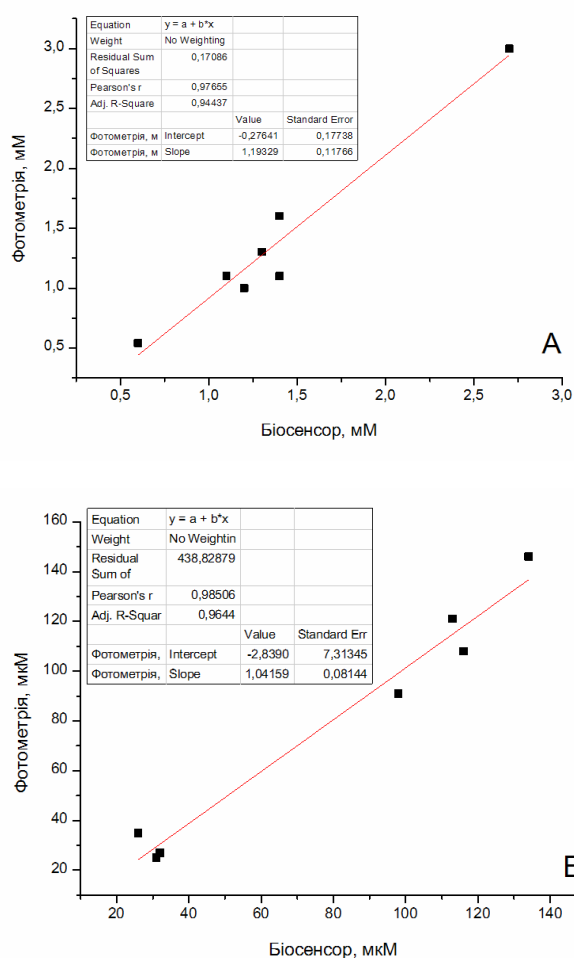


Рис. 4. Кореляція між результатами визначення концентрацій лактату (А) та пірувату (Б) в сироватці крові за допомогою біосенсора та фотометричного метода.

4. ВИСНОВКИ

В роботі оптимізовано біосенсорну систему для одночасного визначення концентрацій лактату та пірувату в сироватці крові. Встановлено, що оптимальне розведення сироватки крові для проведення вимірювань становить 5 разів. Показано, що після послідовних аналізів 7 зразків сироватки крові, біосенсорна система демонструє незначне збільшення чутливості до субстратів, що, ймовірно, пояснюється поступовою активацією ферментів в складі біоселективних елементів після їх іммобілізації. Відтворюваність відгуків біосенсорної системи при роботі з сироваткою становила 4,5% для лактат-чутливого біосенсора та 9,3% – піруват-чутливого.

Проведено вимірювання концентрації лактату і пірувату в 7 зразках сироватки крові, визначено співвідношення лактату до пірувату і показано високу кореляцію отриманих результатів з контрольним методом – фотометричним визначенням. Розроблена біосенсорна система може використовуватись у клінічній діагностиці захворювань, які пов'язані зі змінами в концентраціях лактату та пірувату у сироватці крові.

ПОДЯКА

Робота виконана за фінансової підтримки НАН України в рамках цільової програми наукових досліджень НАН України «Розумні» сенсорні прилади нового покоління на основі сучасних матеріалів та технологій».

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] C. S. Pundir, V. Narwal, and B. Batra, "Determination of lactic acid with special emphasis on biosensing methods: A review," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 86, pp. 777–790, Dec. 2016.
- [2] O. Kruse, N. Grunnet, and C. Barford, "Blood lactate as a predictor for in-hospital mortality in patients admitted acutely to hospital: a systematic review," *Scand. J. Trauma. Resusc. Emerg. Med.*, vol. 19, no. 1, p. 74, 2011.
- [3] Z. Zhang and X. Xu, "Lactate Clearance Is a Useful Biomarker for the Prediction of All-Cause Mortality in Critically Ill Patients," *Crit. Care Med.*, vol. 42, no. 9, pp. 2118–2125, Sep. 2014.
- [4] B. Suetrong and K. R. Walley, "Lactic Acidosis in Sepsis: It's Not All Anaerobic," *Chest*, vol. 149, no. 1, pp. 252–261, Jan. 2016.
- [5] E. Nuzzo, X. Liu, K. Berg, L. Andersen, and M. Doninno, "Pyruvate dehydrogenase levels are low in sepsis," *Crit. Care*, vol. 19, no. Suppl 1, p. P33, 2015.
- [6] M. Garcia-Alvarez, P. Marik, and R. Bellomo, "Sepsis-associated hyperlactatemia," *Crit. Care*, vol. 18, no. 5, p. 503, Oct. 2014.
- [7] F.-G. Debray, G. A. Mitchell, P. Allard, B. H. Robinson, J. A. Hanley, and M. Lambert, "Diagnostic Accuracy of Blood Lactate-to-Pyruvate Molar Ratio in the Differential Diagno-

sis of Congenital Lactic Acidosis,” *Clin. Chem.*, vol. 53, no. 5, pp. 916–921, Mar. 2007.

[8] E. Canbay, A. Habip, G. Kara, Z. Eren, and E. Akyilmaz, “A microbial biosensor based on *Lactobacillus delbrueckii* sp. bacterial cells for simultaneous determination of lactic and pyruvic acid,” *Food Chem.*, vol. 169, pp. 197–202, Feb. 2015.

[9] Q. Xue and E. S. Yeung, “Indirect fluorescence determination of lactate and pyruvate in single erythrocytes by capillary electrophoresis,” *J. Chromatogr. A*, vol. 661, no. 1–2, pp. 287–295, Feb. 1994.

[10] G. D. Graham *et al.*, “Proton magnetic resonance spectroscopy of cerebral lactate and other metabolites in stroke patients,” *Stroke*, vol. 23, no. 3, pp. 333–40, Mar. 1992.

[11] A. Hallström, A. Carlsson, L. Hillered, and U. Ungerstedt, “Simultaneous determination of lactate, pyruvate, and ascorbate in microdialysis samples from rat brain, blood, fat, and muscle using high-performance liquid chromatography,” *J. Pharmacol. Methods*, vol. 22, no. 2, pp. 113–24, Sep. 1989.

[12] A. F. Revzin, K. Sirkar, A. Simonian, and M. V. Pishko, “Glucose, lactate, and pyruvate biosensor arrays based on redox polymer/oxidoreductase nanocomposite thin-films deposited on photolithographically patterned gold microelectrodes,” *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 81, no. 2–3, pp. 359–368, Jan. 2002.

[13] T. Borisova *et al.*, “An amperometric glutamate biosensor for monitoring glutamate release from brain nerve terminals and in blood plasma,” *Anal. Chim. Acta*, Mar. 2018.

[14] I. S. Kucherenko, D. Y. Didukh, O. O. Soldatkin, and A. P. Soldatkin, “Amperometric biosensor system for simultaneous determina-

tion of adenosine-5'-triphosphate and glucose,” *Anal. Chem.*, vol. 86, no. 11, 2014.

[15] Y. V. Topolnikova, D. V. Knyzhnykova, I. S. Kucherenko, S. V. Dzyadevych, and O. O. Soldatkin, “Development of amperometric biosensor system for simultaneous determination of pyruvate and lactate,” *Sens. Electron. Microsyst. Technol.*, vol. 14, no. 4, pp. 13–26, Dec. 2017.

[16] G. Rocchitta *et al.*, “Enzyme biosensors for biomedical applications: Strategies for safeguarding analytical performances in biological fluids,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 6, p. 780, May-2016.

[17] N. Wisniewski and M. Reichert, “Methods for reducing biosensor membrane biofouling,” *Colloids Surfaces B Biointerfaces*, vol. 18, no. 3–4, pp. 197–219, Oct. 2000.

[18] M. A. Mintun, A. G. Vlassenko, M. M. Rundle, and M. E. Raichle, “Increased lactate/pyruvate ratio augments blood flow in physiologically activated human brain,” *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 101, no. 2, pp. 659–664, Jan. 2004.

[19] B. Levy, L.-O. Sadoune, A.-M. Gelot, P.-E. Bollaert, P. Nabet, and A. Larcan, “Evolution of lactate/pyruvate and arterial ketone body ratios in the early course of catecholamine-treated septic shock,” *Crit. Care Med.*, vol. 28, no. 1, pp. 114–119, Jan. 2000.

[20] A. G. Feldman, R. J. Sokol, R. M. Hardison, E. M. Alonso, R. H. Squires, and M. R. Narkewicz, “Lactate and Lactate: Pyruvate Ratio in the Diagnosis and Outcomes of Pediatric Acute Liver Failure,” *J. Pediatr.*, vol. 182, p. 217–222.e3, Mar. 2017.

Стаття надійшла до редакції 16.08.2018 р.

UDC: 543.06 + 577.15 + 543.553

DOI 10.18524/1815-7459.2018.3.142042

OPTIMIZATION OF THE PROCEDURE OF LACTATE AND PYRUVATE DETERMINATION IN BLOOD SERUM USING A BIOSENSOR SYSTEM

I. S. Kucherenko¹, Ya. V. Topolnikova¹, D. V. Knyzhnykova², O. O. Soldatkin^{1,2}

¹Institute of Molecular Biology and Genetics of NAS of Ukraine,
Zabolotnogo Str. 150, Kyiv, 02680, Ukraine.

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

Summary

Aim: optimization of the procedure for simultaneous determination of concentrations of lactate and pyruvate in human serum using a biosensor system.

Methods. Biosensor system contained two amperometric biosensors, connected to one measuring circuit and simultaneously worked in a single measuring cell. Both biosensors were based on platinum disk electrodes. Using the PVA-SbQ photopolymer, the pyruvate oxidase was immobilized on the sensitive surface of one electrode, and lactate oxidase – on the second electrode. In the presence of lactate and pyruvate, the corresponding enzymes produced hydrogen peroxide, which was detected using an amperometric measurement method.

Results. The dependence of responses of the biosensor system on the degree of serum dilution in the work cell was checked. It was investigated how the calibration curves of the biosensor system change after work with serum. The reproducibility of biosensor system responses when working with serum has been studied. The concentrations of lactate, pyruvate and their ratio in serum samples were determined and compared with the results of the control method.

Conclusions. The amperometric biosensor system is adapted for the determination of the concentrations of lactate and pyruvate and their ratio in serum. It is proved that the proposed biosensor system is suitable for the rapid determination of lactate, pyruvate and their ratio and can be used in the medical diagnosis of certain diseases.

Keywords: amperometric biosensor, lactate, pyruvate, lactate to pyruvate ratio, blood serum

УДК: 543.06 + 577.15 + 543.553

DOI 10.18524/1815-7459.2018.3.142042

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕДУРИ ВИЗНАЧЕННЯ ЛАКТАТУ ТА ПІРУВАТУ У СИРОВАТЦІ КРОВІ ЗА ДОПОМОГОЮ БІОСЕНСОРНОЇ СИСТЕМИ

І. С. Кучеренко¹, Я. В. Топольнікова¹, Д. В. Книжникова², О. О. Солдаткін^{1,2}

¹Інститут молекулярної біології і генетики НАН України,
вул. Заболотного, 150, 02680, м. Київ, Україна

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

Реферат

Мета: оптимізація процедури одночасного визначення концентрацій лактату та пірувату в сироватці крові людини з використанням біосенсорної системи.

Методи дослідження. Біосенсорна система на основі двох амперометричних біосенсорів, що підключались до однієї вимірювальної схеми та одночасно працювали в єдиній вимірювальній комірці. Обидва біосенсори були на основі платинових дискових електродів. За допомогою фотополімеру PVA-SbQ на чутливу поверхню одного електроду було іммобілізовано фермент піруватоксидазу, а на другому електроді – лактатоксидазу. При наявності субстратів ферменти продукували пероксид водню, який і реєструвався.

Результати дослідження. Перевірено залежність відгуків біосенсорної системи від ступеня розведення сироватки крові в робочій комірці. Досліджено, як змінюються калібрувальні криві біосенсорної системи після роботи з сироваткою. Перевірено відтворюваність відгуків біосенсорної системи при роботі з сироваткою. Визначено концентрації лактату, пірувату та їх співвідношення в зразках сироватки крові і порівняно отримані результати з даними контрольного методу.

Висновки. Біосенсорну систему адаптовано для визначення концентрацій лактату і пірувату та їх співвідношення у сироватці крові. Доведено, що запропонована біосенсорна система придатна для швидкого визначення лактату, пірувату та їх співвідношення і може бути використана при медичній діагностиці деяких захворювань.

Ключові слова: амперометричний біосенсор, лактат, піруват, співвідношення лактату і пірувату, сироватка крові

МАТЕРІАЛИ ДЛЯ СЕНСОРІВ

SENSOR MATERIALS

УДК 666.1.056

DOI 10.18524/1815-7459.2018.3.142043

ІНТЕРЕНФЕРЕНЦІЙНІ СИСТЕМИ ЯК ФОТОННІ КРИСТАЛИ

Н. Л. Дьяконенко¹, О. П. Овчаренко²

1. Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"
dnina490@gmail.com
2. Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна aromira20b@gmail.com

ІНТЕРЕНФЕРЕНЦІЙНІ СИСТЕМИ ЯК ФОТОННІ КРИСТАЛИ

Н. Л. Дьяконенко, О. П. Овчаренко

Анотація. Властивості фотонних кристалів - штучно створених багатошарових структур, в яких діелектрична проникність і геометричні розміри змінюються з періодом, які можна порівняти з довжиною хвилі - розглядаються шляхом розрахунку інтерференції світла в заданій багатошаровій системі. Обчислення проводилися за допомогою розроблених програм, складених з використанням матричних методів. Основна увага приділялася впливу дефектів, пов'язаних з порушенням періодичності шарів, на кількість і розташування дозволених і заборонених зон у широкому спектральному діапазоні. Наведено спектральні залежності коефіцієнта відбиття, аргументу полінома Чебишева і модуля аргументу полінома Чебишева.

Розрахунок оптичних характеристик багатошарових покриттів за допомогою матричного методу дозволяє визначити наявність зон загородження для періодичних та дефектних систем і запропонувати їх застосування в якості контрастного або вузькосмугового інтерференційного фільтра.

Ключові слова: фотонні кристали; інтерференція світла; багатошарова система; матричний метод

INTERFERENCE SYSTEMS AS PHOTONIC CRYSTALS

N. Dyakonenko, O. Ovcharenko

Abstract. Photonic crystals that are the artificially created multilayer structures, which dielectric permittivity and geometric dimensions vary with a period comparable with the wavelength, were examined by the calculation of interference of light in a given multilayer system. The developed calculation programs using the matrix method make it possible to obtain the given optical characteristics (reflection, transmission, etc.) for any multilayer coatings. The main attention is paid to the analysis of the effect of defects associated with the violation of the layer periodicity. Spectral dependences of the reflection coefficient, argument of Chebyshev polynomial and argument module of the Chebyshev polynomial are given.

Calculation of the multilayer coatings optical characteristics with the help of the matrix method made it possible to determine the presence of barrier zones for periodic and defective systems and to propose their application as a contrast or narrowband interference filter.

Keywords: photonic crystals; interference of light; multi-layered system; matrix method

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ КАК ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ

Н. Л. Дьяконенко, А. П. Овчаренко

Аннотация. Свойства фотонных кристаллов – искусственно созданных многослойных структур, в которых диэлектрическая проницаемость и геометрические размеры изменяются с периодом, сравнимым с длиной волны – рассматриваются путем расчета интерференции света в заданной многослойной системе. Вычисления проводились с помощью разработанных программ, составленных с использованием матричных методов. Основное внимание уделялось влиянию дефектов, связанных с нарушением периодичности слоев, на количество и расположение разрешенных и запрещенных зон в широком спектральном диапазоне. Приведены спектральные зависимости коэффициента отражения, аргумента полинома Чебышева и модуля аргумента полинома Чебышева.

Расчет оптических характеристик многослойных покрытий с помощью матричного метода позволяет определить наличие зон заграждения для периодических и дефектных систем и предложить их применение в качестве контрастного или узкополосного интерференционного фильтра.

Ключевые слова: фотонные кристаллы; интерференция света; многослойная система; матричный метод

У сучасній оптиці велику роль відіграють шаруватоперіодичні середовища - так звані фотонні кристали [1]. Зміна параметрів шарів дає можливість управляти властивостями фотонних кристалів, що відкриває широкі можливості для створення оптичних ізоляторів, фотоелектричних перетворювачів сонячного випромінювання та інших оптоелектронних пристроїв. Властивості таких середовищ обумовлені формуванням дозволених і заборонених зон для електромагнітного випромінювання. Порушення періодичності в фотонних кристалах приводить до виникнення «дефектних мод». Ця мода являє собою хвилю, електромагнітне поле якої локалізовано поблизу дефектного шару. Виявлено, що зі збільшенням товщини дефектного шару піки дефектних мод зміщуються в область низьких частот [2].

Вивчення спектрів відбиття і пропускання одновимірного фотонного кристала з дефектом з моношару наночастинок показало, що в залежності від послідовності шарів, що використовувались, в фотонному кристалі дефектна мода може придушуватися, коли моношар розташовується ближче до країв або, навпаки, до середини дефектного шару [3].

Нааявні на сьогоднішній день результати теоретичних досліджень дефектних мод в фотонних кристалах не надають повного опису даного ефекту. Однак, існує добре розроблена теорія багат шарових покриттів, в якій описується поведінка заборонених і дозволених зон (областей високого відбиття і високого пропускання) [4].

У тонких плівках це є добре відоме явище інтерференції. Дозволені і заборонені зони, що спостерігаються у фотонних кристалах, являють собою не що інше, як інтерференційні максимуми і мінімуми. Інтерференційні системи, що складаються з чергування плівок необхідної оптичної товщини з високим і низьким показниками заломлення, дозволяють зменшити відбиття світла у вузькій або широкій області спектра (покриття, що просвітлюють), підвищити відбиття падаючого світла на дільницях різної спектральної ширини (дзеркала),

виділити вузьку спектральну область монохроматичного світла (інтерференційні світлофільтри).

У даній роботі основна увага приділяється впливу дефектів, пов'язаних з порушенням періодичності шарів на кількість і розташування дозволених і заборонених зон в широкому спектральному діапазоні.

Найбільшого поширення останнім часом отримав матричний метод розрахунку оптичних характеристик і властивостей багат шарових покриттів [4]. При вивченні поширення плоскої монохроматичної хвилі в шаруватій структурі, останню зручно характеризувати унітарною 2×2 матрицею m (так званою характеристичною або матрицею інтерференції). Для одного шару завтовшки t_j з показником заломлення n_j характеристична матриця має вигляд:

$$m_j = \begin{pmatrix} \cos(\beta_j) & \frac{i}{u_j} \sin(\beta_j) \\ i u_j \sin(\beta_j) & \cos(\beta_j) \end{pmatrix},$$

де $\beta_j = 0,5\pi v g_j c_j$ – фазова товщина шару, $g_j = 4n_j t_j / \lambda_0$ – що виражена у одиницях чверті довжини хвилі λ_0 оптична товщина шару, $c_j = \cos(\theta_j)$. Кути заломлення θ_j в усіх середовищах пов'язані поміж собою та кутом падіння законом Снелліуса $n_j \sin(\theta_j) = \text{const}$.

Ефективні показники заломлення u_j дорівнюють $n_j c_j$ для S- та n_j / c_j для P- складової поляризації падаючого світла. Частота $n = \lambda_0 / l$, де l – поточна довжина хвилі.

У разі багат шарового покриття, яке складається з K тонких однорідних шарів, характеристична матриця буде мати вигляд:

$$A_{i,k} = \prod_{j=1}^K m_j.$$

Використовуючи ці матриці можна розраховувати амплітудні коефіцієнти відбиття та пропускання:

$$r = \frac{(A_{11} u_0 - A_{22} u) + i(u_0 u A_{12} - A_{21})}{(A_{11} u_0 + A_{22} u) + i(u_0 u A_{12} + A_{21})},$$

$$t = \frac{2u_0}{(A_{11}u_0 + A_{22}u) + i(u_0uA_{12} + A_{21})}$$

і відповідні енергетичні коефіцієнти:

$$R = |r|^2, \quad T = \frac{u}{u_0} |t|^2.$$

Для періодичних систем, що містять N періодів, наприклад $S_0N(ab)S$, матриця інтерференції може бути представлена через матрицю періоду

$M = m_a m_b$, тоді $A_{i,k} = M^N$ і виражена через поліноми Чебишева першого T_N і другого U_N роду

$$A_{11,22} = T_N \pm 0.5(M_{11} - M_{22})U_{N-1};$$

$$A_{12,21} = M_{12,21}U_{N-1}, \text{ де}$$

$$T_N = \cos[N \arccos(A)];$$

$$U_{N-1} = \frac{\sin[N \arccos(A)]}{\sin[\arccos(A)]}$$

з аргументом $A = 0.5(M_{11} + M_{22})$

В областях спектра, для яких $|A| > 1$, коефіцієнт відбиття з ростом числа періодів буде прагнути до одиниці. Це і є так звані області високого відбиття або зони загордження.

На графіках наведені спектральні залежності коефіцієнта відбиття $R(\nu)$, аргументу полінома Чебишева $A(\nu)$ (крапки) і модуля аргументу полінома Чебишева $|A(\nu)|$ у діапазоні від 0,9 до 1,1 (суцільні лінії). В усіх розрахунках шари a і b передбачалися розміром в одну чверть довжини хвилі ($g_j = 1$) з показниками заломлення $n_a = 2,2$ і $n_b = 1,32$. Середовища, що обрамляли багат шарову систему S_0 і S бралися з показниками заломлення $n_0 = n = 1$.

Для двох шарів $K = 2$ найпростішого періоду (ab) на нижній залежності видно можлива область високого відбиття (рис. 1). На рис. 2, де $K = 10$, $N = 5$ найпростішого

періоду (ab) , на залежності $R(\nu)$ явно проявилася область високого відбивання, але її ширина, див. $A(\nu)$ залишилася колишньою. На залежності $A(\nu)$ для симетричного періоду $(a2ba)$ $K = 3$ видно дві можливі області високого відбивання в областях ν 0,5 і 1,5 (рис. 3). Для такого ж симетричного періоду $(a2ba)$, але з числом шарів $K = 15$, $N = 5$, тобто система $[a2ba a2ba a2ba a2ba a2ba]$ на залежності $R(\nu)$ явно проявилися області високого відбивання в областях частот 0,5 і 1,5, але їх ширини залишилися колишніми (рис. 4).

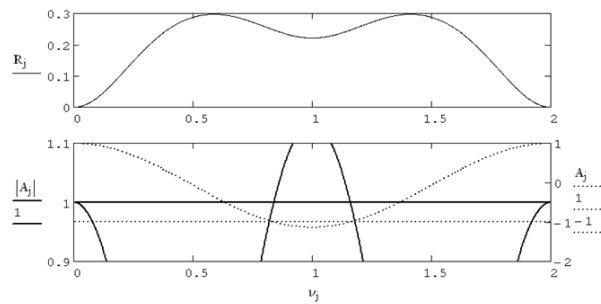


Рис. 1. Спектральні залежності коефіцієнта відбиття $R(\nu)$, аргументу поліному Чебишева $A(\nu)$ (крапки) та його модулю $|A(\nu)|$ (суцільні лінії). Кількість шарів $K=2$, найпростіший період (ab) .

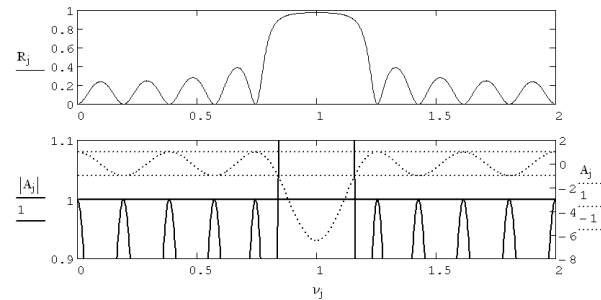


Рис. 2. Спектральні залежності коефіцієнта відбиття $R(\nu)$, аргументу поліному Чебишева $A(\nu)$ (крапки) та його модулю $|A(\nu)|$ (суцільні лінії). Кількість шарів $K=10$, $N=5$, найпростіший період (ab) .

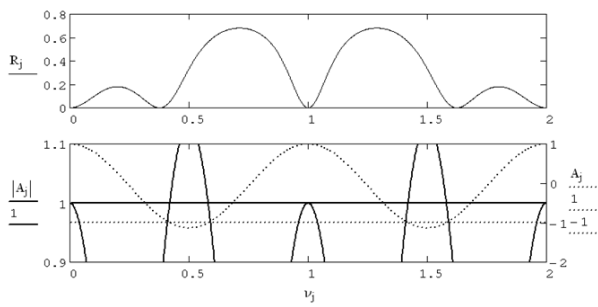


Рис. 3. Спектральні залежності коефіцієнта відбиття $R(\nu)$, аргументу поліному Чебишева $A(\nu)$ (крапки) та його модулю $|A(\nu)|$ (суцільні лінії). Кількість шарів $K=3$, $N=5$, найпростіший період (аb), симетричний період (a2ba).

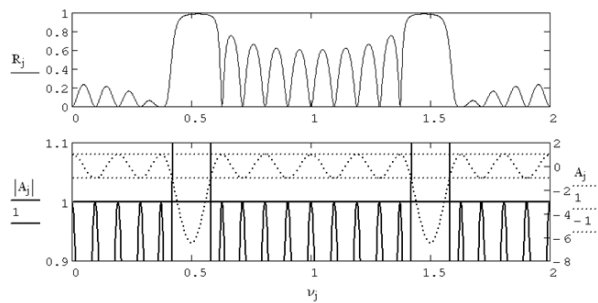


Рис. 4. Спектральні залежності коефіцієнта відбиття $R(\nu)$, аргументу поліному Чебишева $A(\nu)$ (крапки) та його модулю $|A(\nu)|$ (суцільні лінії). Кількість шарів $K=15$, $N=5$. Той же, що й на рис.3 симетричний період (a2ba), тобто система [a2ba a2ba a2ba a2ba a2ba a2ba]

Прояв дефектів, які пов'язані з порушенням періодичності шарів показано на рис. 5-7. Чвертьхвильова система «зі збоєм» ab2abab на залежностях $R(\nu)$ і $A(\nu)$ демонструє область пропускання при $\nu = 1$. Крім того, з залежності $A(\nu)$ слідує розташовані симетрично $\nu = 1$ по три додаткових області загородження. Для трьох періодів чвертьхвильової системи «зі збоєм» 3 (ab2abab) область пропускання при $\nu = 1$ на залежностях $R(\nu)$ і $A(\nu)$ може бути використана в якості так званого контрастного фільтра. При цьому на $A(\nu)$ явно проявляються розташовані симетрично $\nu = 1$ по три додаткових області загородження. На залежностях $R(\nu)$ і $A(\nu)$ симетричною чвертьхвильової системи «зі збоєм» 4(ab) a2ba4 4(ba) (рис. 7) видно досить вузька область пропускання при $\nu = 1$. Така сис-

тема зазвичай використовується в якості вузькосмугового інтерференційного фільтра. Крім того, з залежності $A(\nu)$ слідує розташовані симетрично $\nu = 1$ додаткові області загородження.

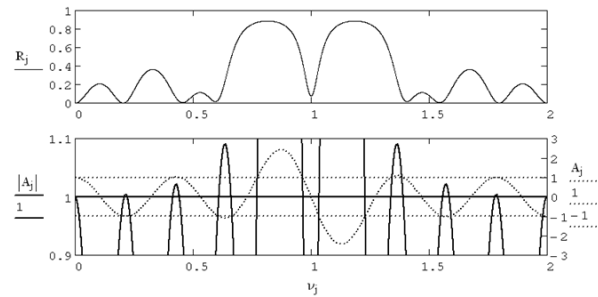


Рис. 5. Спектральні залежності коефіцієнта відбиття $R(\nu)$, аргументу поліному Чебишева $A(\nu)$ (крапки) та його модулю $|A(\nu)|$ (суцільні лінії). Чвертьхвильова система «зі збоєм» ab2abab.

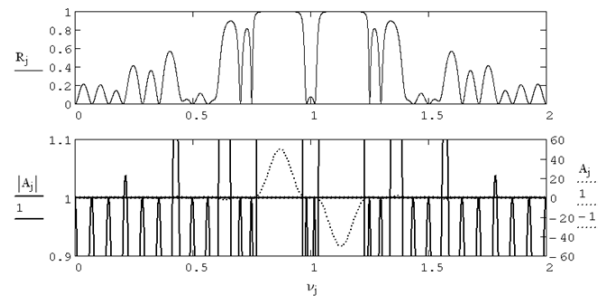


Рис. 6. Спектральні залежності коефіцієнта відбиття $R(\nu)$, аргументу поліному Чебишева $A(\nu)$ (крапки) та його модулю $|A(\nu)|$ (суцільні лінії). Три періоди чвертьхвильової системи «зі збоєм» 3(ab2abab) з рис. 5.

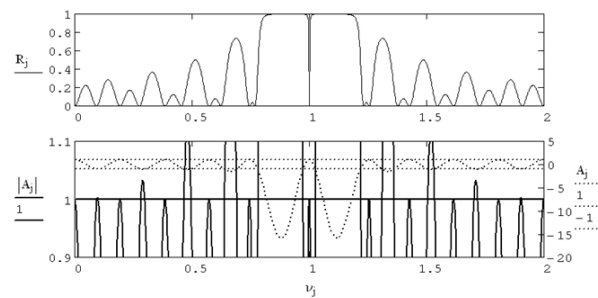


Рис. 7. Спектральні залежності коефіцієнта відбиття $R(\nu)$, аргументу поліному Чебишева $A(\nu)$ (крапки) та його модулю $|A(\nu)|$ (суцільні лінії). $K=19$. Симетрична чвертьхвильова система «зі збоєм» 4(ab) a2ba4 (ba).

Порівняльний аналіз наведених рисунків показує, що про структуру спектра відбиття (розташування і кількість зон загородження) для багат шарових систем з будь-яким числом періодів цілком можна судити за даними залежності $A(\nu)$ для одного періоду.

Таким чином, розрахунок оптичних характеристик багат шарових покриттів за допомогою матричного методу дозволяє визначити наявність зон загородження для періодичних та дефектних систем і запропонувати їх застосування в якості контрастного або вузько смугового інтерференційного фільтра

Список використаної літератури

[1]. G. S. Johnson and D. J. Joannopoulos, Photonic Crystals: The Road from Theory to Practice. Kluwer, Boston, (2002).

[2]. L. I. Ivzhenko, D. I. Yudina, S. I. Tarapov. Radiofizika ta elektronika. T.22. № 2. (2017).

[3]. S. G. Moiseev, V. A. Ostatochnikov. Izvestiya Samarskogo nauchnogo zentra Rosiyskoi akademii nauk, t. 14, №4(4), c. 1102-1106, (2012).

[4]. Macleod H. A. Thin-Film Optical Filters. Bristol: Adam Hilger Ltd., 332p (1986).

Стаття надійшла до редакції 21.06.2018 р.

УДК 666.1.056

DOI 10.18524/1815-7459.2018.3.142043

INTERFERENCE SYSTEMS AS PHOTONIC CRYSTALS

N. Dyakonenko¹, O. Ovcharenko²

¹ National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute"
dnina490@gmail.com

² V. N. Karazin Kharkiv National University
apomira20b@gmail.com

Summary

Abstract: Photonic crystals that are the artificially created multilayer structures, which dielectric permittivity and geometric dimensions vary with a period comparable with the wavelength, are becoming increasingly important in modern optics. Control of the properties of photonic crystals is possible by changing the parameters of the layers, first of all, by forming allowed and forbidden zones for electromagnetic radiation. The behavior of forbidden and allowed zones, which are the regions of good reflection and transmission, is determined by calculating the light interference in a given multilayer.

The developed calculation programs using the matrix method make it possible to obtain the given optical characteristics (reflection, transmission, etc.) for any multilayer coatings.

In this paper, the main attention is paid to the analysis of the effect of defects associated with the violation of the layer periodicity on the number and location of allowed and forbidden zones in a wide spectral range. Spectral dependences of the reflection coefficient $R(\nu)$, the argument $A(\nu)$ and argument module $|A(\nu)|$ of the Chebyshev polynomial are given. The carried out calculations were based on the assumption that the layers a and b were quarter-waves ($g_j = 1$) with refractive indices $n_a = 2.2$ and $n_b = 1.32$, while the framing media S_0 and S had refractive indices $n_0 = n = 1$.

Calculation of the multilayer coatings optical characteristics with the help of the matrix method made it possible to determine the presence of barrier zones for periodic and defective systems and to propose their application as a contrast or narrowband interference filter.

Keywords: photonic crystals; light interference; multilayer system; matrix method

УДК 666.1.056

DOI 10.18524/1815-7459.2018.3.142043

ІНТЕРЕНФЕРЕНЦІЙНІ СИСТЕМИ ЯК ФОТОННІ КРИСТАЛИ*Н. Л. Дьяконенко¹, О. П. Овчаренко²*¹ Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
dnina490@gmail.com² Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна
apomira20b@gmail.com**Реферат**

У сучасній оптиці велику роль відіграють так звані фотонні кристали - штучно створені багатошарові структури, в яких діелектрична проникність і геометричні розміри змінюються з періодом, який можна порівняти з довжиною хвилі. Зміна параметрів шарів дає можливість управляти властивостями фотонних кристалів. Властивості таких середовищ обумовлені формуванням дозволених та заборонених зон для електромагнітного випромінювання. Поведінка заборонених і дозволених зон (областей високого відбиття і високого пропускання) описується шляхом розрахунку інтерференції світла в заданій багатошаровій системі. Обчислення значно полегшуються завдяки розробленим програмам. Розрахунки, проведені за допомогою матричного методу, дозволяють отримати задані оптичні характеристики (коефіцієнти відбиття, пропускання і т. ін.) для будь-яких багатошарових покриттів.

У даній роботі основна увага приділяється впливу дефектів, пов'язаних з порушенням періодичності шарів на кількість і розташування дозволених і заборонених зон в широкому спектральному діапазоні. На графіках наведені спектральні залежності коефіцієнта відбиття $R(\nu)$, аргументу полінома Чебишева $A(\nu)$ і модуля аргументу полінома Чебишева $|A(\nu)|$. У всіх розрахунках шари a і b передбачалися розміром в одну чверть довжини хвилі ($g_j = 1$) с показниками заломлення $n_a = 2,2$ і $n_b = 1,32$. Середовища, що обрамляли багатошарову систему S_0 і S бралися з показниками заломлення $n_0 = n = 1$.

Розрахунок оптичних характеристик багатошарових покриттів за допомогою матричного методу дозволяє визначити наявність зон загородження для періодичних та дефектних систем і запропонувати їх застосування в якості контрастного або вузько смугового інтерференційного фільтра.

Ключові слова: фотонні кристали; інтерференція світла; багатошарова система; матричний метод

МАТЕРІАЛИ ДЛЯ СЕНСОРІВ

SENSOR MATERIALS

УДК 621.315.592

DOI 10.18524/1815-7459.2018.3.142044

ВПЛИВ ОДНОВІСНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ТА ГІДРОСТАТИЧНОГО ТИСКУ НА ВЛАСТИВОСТІ ТОНКИХ ШАРІВ InSb

А. О. Дружинін, І. Й. Мар'ямова, О. П. Кутраков, Н. С. Лях-Кагуй

Національний університет “Львівська політехніка”,
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, тел. (032)2582627,
druzh@polynet.lviv.ua

ВПЛИВ ОДНОВІСНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ТА ГІДРОСТАТИЧНОГО ТИСКУ НА ВЛАСТИВОСТІ ТОНКИХ ШАРІВ InSb

А. О. Дружинін, І. Й. Мар'ямова, О. П. Кутраков, Н. С. Лях-Кагуй

Анотація. Досліджено тензометричні характеристики тонких шарів антимоніду індію, як нелегованих, так і легованих із різною концентрацією домішки телуру в широкому діапазоні деформацій ($\varepsilon = \pm 1,3 \times 10^{-3}$ відн. од.) і температур ($- 180 \div + 100$) °С. Найвищі значення коефіцієнта тензочутливості були одержані для зразків InSb n-типу провідності, легованих телуrom до концентрації $(4 \div 7) \times 10^{16}$ см⁻³, на основі яких можуть бути створені чутливі елементи тензодатчиків. Також було вивчено вплив гідростатичного тиску до 5000 бар на тонкі шари InSb, як нелеговані, так і леговані телуrom і цинком. Визначені значення коефіцієнтів гідростатичного тиску для цих шарів та їх температурні залежності в інтервалі температур ($- 75 \div + 80$) °С. Найбільша чутливість до гідростатичного тиску виявлена в зразках InSb, легованих цинком ($K_{20^\circ\text{C}} \approx 46$). Дано рекомендації щодо застосування тонких шарів InSb як чутливих елементів датчиків тиску.

Ключові слова: тонкі шари антимоніду індію; тензорезистивні властивості; коефіцієнт тензочутливості, гідростатичний тиск

THE INFLUENCE OF UNIAXIAL STRAIN AND HYDROSTATIC PRESSURE ON PROPERTIES OF InSb THIN LAYERS

A. Druzhinin, I. Maryamova, A. Kutrakov, N. Liakh-Kaguy

Abstract. Piezoresistive characteristics of undoped and doped by tellurium with different concentration InSb thin layers were studied in wide range of strain ($\varepsilon = \pm 1.3 \times 10^{-3}$ rel. un.) and temperature ($-180 \div +100$) °C. The highest values of the gauge factor were obtained in n-type conductivity InSb thin layers doped by tellurium to concentration of $(4 \div 7) \times 10^{16}$ cm⁻³. Sensitive elements of strain gauges could be created on the basis of such layers. The influence of hydrostatic pressure up to 5000 bar on electrophysical properties of undoped and doped by tellurium and zinc InSb thin layers were also studied. The values of the hydrostatic pressure coefficients for these layers and their temperature dependences were determined in the temperature range ($-75 \div +80$) °C. The greatest sensitivity to hydrostatic pressure ($K_{20^\circ\text{C}} \approx 46$) was revealed in InSb samples doped with zinc. Recommendations for the use of InSb thin layers as sensitive elements of pressure sensors were given.

Keywords: indium antimonide thin layers; piezoresistive properties; gauge factor; hydrostatic pressure

ВЛИЯНИЕ ОДНООСНОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА СВОЙСТВА ТОНКИХ СЛОЕВ InSb

A. A. Дружинин, И. И. Марямова, А. П. Кутраков, Н. С. Лях-Кагуй

Аннотация. Исследовано тензометрические характеристики тонких слоев антимоноида индия, как нелегированных, так и легированных с разной концентрацией примеси теллура в широком диапазоне деформации ($\varepsilon = \pm 1,3 \times 10^{-3}$ відн. од.) и температур ($-180 \div +100$) °C. Высокие значения коэффициента тензочувствительности были получены для образцов InSb n-типа проводимости, легированных теллуром с концентрацией $(4 \div 7) \times 10^{16}$ см⁻³, на основе которых могут быть созданы чувствительные элементы тензодатчиков. Также было изучено влияние гидростатического давления до 5000 бар на электрофизические свойства тонких слоев InSb, как нелегированные, так и легированные теллуром и цинком. Определены значения коэффициентов гидростатического давления для этих слоев и их температурные зависимости в интервале температур ($-75 \div +80$) °C. Наибольшая чувствительность к гидростатическому давлению обнаружена в образцах InSb, легированных цинком ($K_{20^\circ\text{C}} \approx 46$). Даны рекомендации по применению тонких слоев InSb как чувствительных элементов датчиков давления.

Ключевые слова: тонкие слои антимоноида индия; тензорезистивные свойства; коэффициент тензочувствительности, гидростатическое давление

1. Вступ

На сьогодні кремній і германій є основними матеріалами для створення на їх основі сенсорів механічних величин, завдяки високій тензочутливості цих матеріалів у широкому інтервалі температур [1]. Слід зауважити, що також створені сенсори механічних величин на базі напівпровідникових ниткоподібних кристалів, зокрема таких як кремній і германій [2]. Багатьма дослідженнями п'єзорезистивних властивостей мікро- та нанокристалів кремнію і германію виявлено гігантські значення їх коефіцієнта тензочутливості за низьких температур [3-6]. Попередні роботи авторів [7, 8] довели, що ниткоподібні кристали Si, Ge і твердого розчину SiGe із концентрацією легуючої домішки в області переходу метал-діелектрик, є перспективними матеріалами для створення високочутливих сенсорів механічних величин, працездатних в області низьких температур. Як результат на основі цих кристалів були розроблені надчутливі сенсори механічних величин, працездатні при криогенних температурах [2]. Проте технічний прогрес в області науки і техніки вимагає пошуку нових напівпровідникових матеріалів, придатних для проектування чутливих елементів датчиків, дієздатних в складних умовах експлуатації. В цьому плані сполуки АЗВ5 представляють значний інтерес щодо вивчення їх електрофізичних властивостей, а також як багатобічній модельний матеріал для вивчення магніто- та п'єзорезистентних ефектів у широкому інтервалі температур [9-12]. Сполуки АЗВ5 також розглядаються як перспективні матеріали сенсорної електроніки. У попередніх роботах авторів [13, 14] вивчався вплив гідростатичного тиску на властивості мікрокристалів антимоніту галію n-типу. В результаті проведених досліджень було створено датчик гідростатичного тиску, дієздатний до 5000 бар.

Метою даної роботи є вивчення впливу одновісної деформації та гідростатичного тиску на тонкі шари антимоніду індію з різною концентрацією легуючої домішки на предмет їх використання для створення чут-

ливих елементів сенсорів деформації та гідростатичного тиску.

2. Методика експерименту

Об'єктом досліджень були тонкі шари антимоніду індію, для отримання яких використовувався метод направленої кристалізації розплаву, стиснутого між підкладками. В результаті отримано тонкі шари InSb товщиною $10 \div 30$ мкм. Розміри досліджуваних чутливих елементів становили: довжина $1 \div 2$ мм, ширина $100 \div 200$ мкм і товщина $10 \div 20$ мкм. Омичні контакти і струмовиводи до чутливих елементів створювались методом імпульсного мікрозварювання золотого мікродроту.

Досліджувались три групи зразків:

- нелеговані зразки InSb з концентрацією основних носіїв заряду $(2 \div 3) \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$;
- зразки InSb з концентрацією телуру $(4 \div 7) \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ - $1,5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$;
- зразки InSb леговані цинком з концентрацією $1 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Для вивчення впливу одновісної деформації чутливі елементи на основі тонких шарів InSb закріплювались на сталевій градувальній балці, яка піддавалась деформації $\epsilon = \pm 1,3 \times 10^{-3}$ відн. од. у широкому інтервалі температур ($-150 \div +100$) °С. Дослідження характеристик чутливих елементів на основі тонких шарів антимоніду індію при вивченні впливу гідростатичного тиску до 5000 бар, проводились у спеціальному посуді високого тиску, згідно методики, наведеній в роботі [13]. Струмовиводи чутливих елементів приварювались до герметичних клем в об'ємі поршня, після чого внутрішній об'єм сосуда під тиском заповнювали сумішшю гасу та трансформаторного масла. Опір зразків антимоніду індію вимірювався в інтервалі температур ($-75 \div +100$) °С і тиску від 0 до 5000 бар.

3. Експериментальні результати та їх обговорення

Властивості тонких шарів антимоніду індію n-типу провідності досліджувались в широкому інтервалі температур ($-180 \div +100$) °С. На

рис. 1 представлено температурні залежності опору, як нелегованих зразків, так і легованих телуrom до концентрації $4 \times 10^{16} \div 1.5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

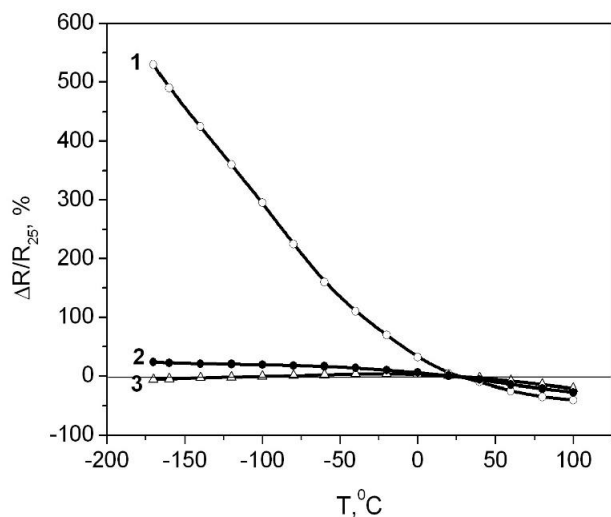


Рис. 1. Температурні залежності відносної зміни опору нелегованих тонких шарів InSb (1) і з концентрацією телуру: $(4 \div 7) \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (2); $(1 \div 1.5) \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (3).

Виявлено, що найменшу температурну залежність опору мають зразки InSb сильно леговані телуrom до концентрації $(1 \div 1.5) \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, для яких температурний коефіцієнт опору (ТКО) у досліджуваному інтервалі температур становить приблизно $0,18 \% \times \text{град}^{-1}$.

В результаті досліджень тензорезистивних властивостей тонких шарів InSb n-типу провідності в широкому діапазоні деформацій $\varepsilon = \pm 1,3 \times 10^{-3}$ відн. од. і температур $(-150 \div +100) \text{ }^\circ\text{C}$ виявлено лінійний характер залежності відносної зміни опору від деформації для всіх досліджуваних зразків (рис. 2). Розраховано значення коефіцієнта тензочутливості для цих зразків, температурні залежності яких наведено на рис. 3.

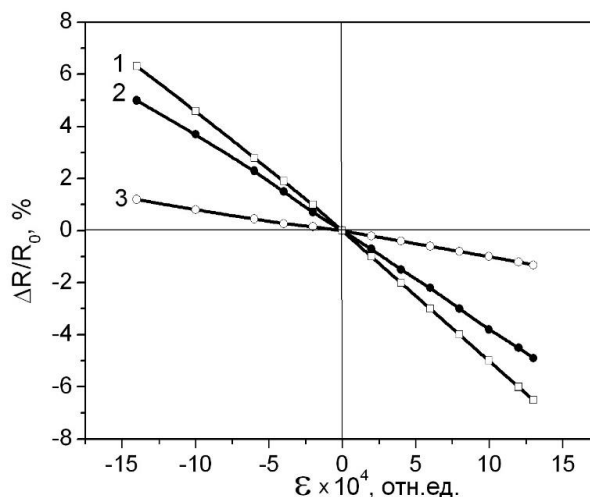


Рис. 2. Відносна зміна опору від деформації за температури $20 \text{ }^\circ\text{C}$ для нелегованих тонких шарів InSb (1) і з концентрацією телуру: $(4 \div 7) \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (2); $(1 \div 1.5) \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (3).

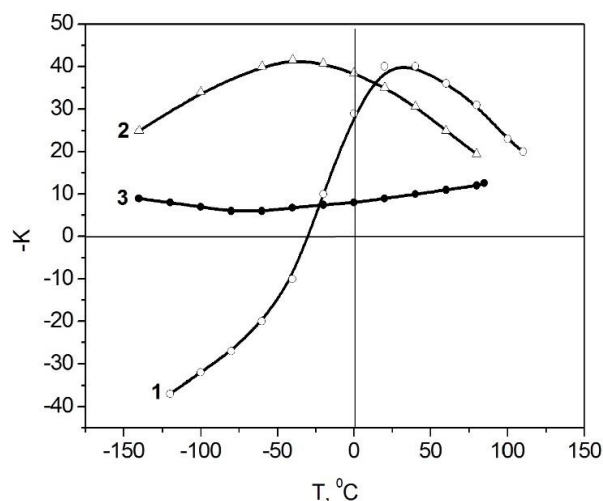


Рис. 3. Температурні залежності коефіцієнта тензочутливості нелегованих тонких шарів InSb (1) і з концентрацією телуру: $(4 \div 7) \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (2); $(1 \div 1.5) \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (3).

З підвищенням концентрації домішки телуру значення коефіцієнта тензочутливості зменшується за абсолютною величиною (рис. 3, криві 2 і 3). Для цих зразків на кривих температурної залежності коефіцієнта тензочутливості спостерігаються екстремуми в області температур $(-40 \div 0) \text{ }^\circ\text{C}$ і монотонна зміна коефіцієнта тензочутливості за абсолютною величиною по обидві сторони від виявленого екстремуму. Принципово відмінний характер має температурна залежність коефіцієнта тензочутливості для нелегова-

них тонких шарів InSb n-типу провідності (рис.3, крива 1). За температури $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ відбувається інверсія знака коефіцієнта тензочутливості, зумовлена переходом до власної електропровідності.

Таким чином, в результаті проведених досліджень встановлено, що зразки InSb з концентрацією основних носіїв заряду $(2\div 3)\times 10^{16}\text{ см}^{-3}$ мають найвищий коефіцієнт тензочутливості $K=-46$ за температури $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, але, оскільки він має сильну температурну залежність, чутливі елементи на основі такого матеріалу доцільно використовувати за кімнатної температури. Чутливі елементи на основі InSb з концентрацією телуру $(4\div 7)\times 10^{16}\text{ см}^{-3}$ з коефіцієнтом тензочутливості $K\approx -35$ можна використовувати для роботи у температурному інтервалі від $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Дослідження впливу гідростатичного тиску до 5000 бар, на властивості тонких шарів антимоніду індію, легованих домішками телуру та цинку, проводилось в інтервалі температур $(-75\div +100)\text{ }^{\circ}\text{C}$. На рис. 4 наведено залежності відносної зміни опору зразків InSb від гідростатичного тиску за кімнатної температури для нелегованих зразків і для легованих відповідними домішками. Як видно з рис. 4, ці залежності практично лінійні для всіх зразків у всьому досліджуваному діапазоні тиску. Значення коефіцієнтів гідростатичного тиску за температури $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, розраховані за результатами експериментальних даних для досліджуваних зразків становлять відповідно $(19,4\div 27,2)\times 10^{-5}\text{ бар}^{-1}$ для нелегованих зразків, $\sim 50\times 10^{-5}\text{ бар}^{-1}$ для легованих Zn до $1\times 10^{16}\text{ см}^{-3}$ і $(9,5\div 11,4)\times 10^{-5}\text{ бар}^{-1}$ для легованих телуром до $1\times 10^{17}\text{ см}^{-3}$.

Досліджено також температурні залежності коефіцієнта гідростатичного тиску в інтервалі температур від $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ для описаних вище трьох груп зразків InSb, результати яких наведені на рис. 5.

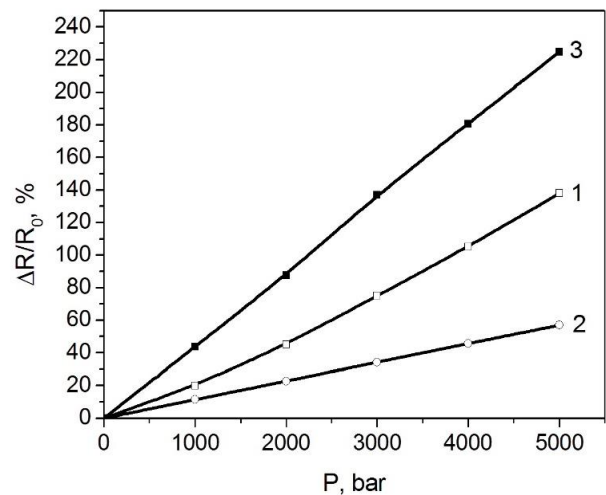


Рис. 4. Відносна зміна опору від гідростатичного тиску за температури $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ для нелегованих тонких шарів InSb з концентрацією носіїв $(2\div 3)\times 10^{16}\text{ см}^{-3}$ (1); з концентрацією телуру $1\times 10^{17}\text{ см}^{-3}$ (2) і цинку $1\times 10^{16}\text{ см}^{-3}$ (3).

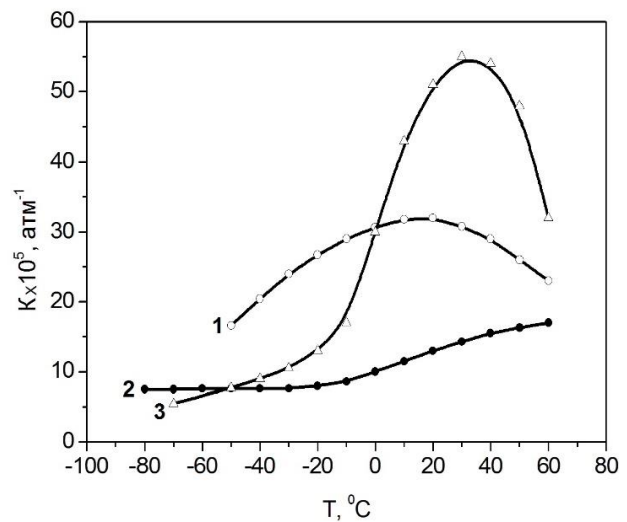


Рис. 5. Температурні залежності коефіцієнта гідростатичного тиску нелегованих тонких шарів InSb (1); з концентрацією телуру $1\times 10^{17}\text{ см}^{-3}$ (2) і цинку $1\times 10^{16}\text{ см}^{-3}$ (3).

З результатів проведених досліджень у кліматичному діапазоні температур $(-60\div +60)\text{ }^{\circ}\text{C}$ видно, що на кривій температурної залежності коефіцієнта гідростатичного тиску для нелегованих тонких шарів InSb n-типу провідності за температури, близької до кімнатної, спостерігається максимум (рис. 5, крива 1). Максимальне значення коефіцієнта гідростатичного тиску для цих зразків досягає $\sim 32\times 10^{-5}\text{ бар}^{-1}$.

Значно меншою чутливістю до гідростатичного тиску володіють тонкі шари InSb n-типу провідності, леговані телуrom до концентрації $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. З характеру одержаної температурної залежності коефіцієнта гідростатичного тиску (рис. 5, крива 2), видно що в інтервалі температур $(-75 \div -20) \text{ }^\circ\text{C}$ значення коефіцієнта гідростатичного тиску невелике і практично залишається незмінним, однак при підвищенні температури його значення монотонно зростають, досягаючи $(13,5 \div 16,5) \times 10^{-5} \text{ бар}^{-1}$ за температури $+60 \text{ }^\circ\text{C}$. Ці зразки мають слабку залежність опору від температури в кліматичному діапазоні температур.

Чутливі елементи на основі тонких шарів InSb p-типу, леговані цинком з концентрацією $1 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, мають найвищу чутливість до гідростатичного тиску. На кривій температурної залежності коефіцієнта гідростатичного тиску спостерігається чітко виражений максимум за температури $\sim +35 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 5, крива 3). Результат проведених досліджень доводить, що чутливі елементи на основі тонких шарів InSb легованих цинком доцільно використовувати для вимірювання тиску за фіксованих температур, або використовуючи спеціальні методи термокомпенсації.

ВИСНОВКИ

При дослідженнях температурних залежностей опору резисторів на основі тонких шарів InSb n-типу провідності, за температур $(-180 \div +120) \text{ }^\circ\text{C}$ виявлено, що найменша температурна залежність отримана для зразків легованих телуrom до концентрацій $(1 \div 1,5) \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Встановлено, що найвищий коефіцієнт тензочутливості $K \approx -46$ при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ мають нелеговані зразки InSb n-типу провідності з концентрацією основних носіїв заряду $(2 \div 3) \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Для створення тензорезисторів найбільш оптимальними характеристиками володіють тонкі шари InSb n-типу, леговані телуrom до концентрації $(4 \div 7) \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, які мають достатньо високі значення коефіцієнта тензочутливості ($K_{20^\circ\text{C}} \approx -35$) і відносно слабку його залежність від температури.

При дослідженні впливу гідростатичного тиску до 5000 бар на тонкі шари InSb виявлено лінійну залежність їх опору від тиску. Найбільшою чутливістю до гідростатичного тиску в області додатних температур характеризуються зразки InSb p-типу провідності, леговані цинком до $1 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ($K_{20^\circ\text{C}} \approx 46$). Такі шари можуть бути використані для створення високочутливих датчиків тиску, працездатних в інтервалі температур $0 \div +60 \text{ }^\circ\text{C}$. Для більш широкого інтервалу температур доцільно використовувати зразки InSb з концентрацією носіїв заряду $(2 \div 3) \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1]. П. І. Баранский, А. В. Федосов, Г. П. Гайдар. Фізичні властивості кристалів кремнію та германію в полях ефективного зовнішнього впливу. Надстир'я, Луцьк. 280 с. (2000).
- [2]. А. О. Дружинін, І. Й. Мар'ямова, О. П. Кутраков. Датчики механічних величин на основі ниткоподібних кристалів кремнію, германію та сполук A^3B^5 . Львівська Політехніка, Львів. 232 с. (2015).
- [3]. I. Maryamova, A. Druzhinin, E. Lavitska, I. Gortynska, and Y. Yatzuk. Low temperature semiconductor mechanical sensors // Sensors and Actuators A, 85, pp. 153-157 (2000).
- [4]. J. S. Milne, S. Arscott, C. Renner, and A. C. H. Rowe. On giant piezoresistance effects in silicon nanowires and microwires // Phys. Rev. Lett., 105, p. 226802 (2010).
- [5]. P. Neuzil, C. C. Wong, and J. Reboud. Electrically controlled giant piezoresistance in silicon nanowires // Nano Lett., 10, pp. 1248-1252 (2010).
- [6]. S. V. Luniov, O. V. Burban, P. F. Nazarchuk, A. I. Zimych Influence of electron-phonon interaction on piezoresistance of single crystals n-Ge // Journal of Advances in Physics, 7(3), pp. 1931-1938 (2015)
- [7]. A. A. Druzhinin, I.I. Maryamova, O.P. Kuttrakov, N.S. Liakh-Kaguy, T. Palewski. Strain induced effects in p-type silicon whiskers at low temperatures // Functional Materials, 19(3), pp. 325-329 (2012).

[8]. A.A. Druzhinin, I. P. Ostrovskii, Yu. N. Khooverko, N. S. Liakh-Kaguy, A. M. Vuytsyk. Low temperature characteristics of germanium whiskers // *Functional Materials*, 21(2), pp.130-136 (2014).

[9]. Luke Glenn Harris. Design and Fabrication of a Piezoresistive Tactile Sensor for Ergonomic Analyses. The University of Guelph, Ontario, Canada. 105 p. (2014)

[10]. A. Löffler, J. P. Reithmaier, A. Forchel, A. Sauerwald. Influence of the strain on the formation of GaInAs/GaAs quantum structures // *Journal of Crystal Growth*, 286(1), pp. 6-10

[11]. D. Kriegner, C. Panse, B. Mandl, K. A. Dick, M. Keplinger. Unit cell structure of crystal polytypes in InAs and InSb nanowires // *Nano Lett.*, 11(4), pp. 1483-1489 (2011).

[12]. P. Chang, X. Liu, L. Zeng, G. Du. Hole mobility in InSb-based devices: Dependence on surface orientation, body thickness, and strain // *Solid-State Electronics*, 113, pp. 68-72 (2015).

[13]. А. А. Дружинин, І. Й. Мар'ямова, А. П. Кутраков, Н. С. Лях-Кагуй. Датчики гидростатического давления на основе микрокристаллов антимонида галлия // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, № 4, сс. 19-23 (2015).

[14]. А. А. Дружинин, І. Й. Мар'ямова, О. П. Кутраков. GaSb whiskers in sensor electronics // *Functional Materials*, 23(2), pp. 206-211 (2016).

Стаття надійшла до редакції 16.07.2018 р.

UDC 621.315.592

DOI 10.18524/1815-7459.2018.3.142044

THE INFLUENCE OF UNIAXIAL STRAIN AND HYDROSTATIC PRESSURE ON PROPERTIES OF InSb THIN LAYERS

A. Druzhinin, I. Maryamova, A. Kutrakov, N. Liakh-Kaguy

Lviv Polytechnic National University

Summary

Aim of the work is to study the influence of uniaxial strain and hydrostatic pressure on the electrophysical properties in indium antimonide thin layers with different doping concentration for creation on their basis sensitive elements of mechanical sensors acting in the temperature range (- 60 ÷ + 60) °C.

Piezoresistive properties of undoped and doped by tellurium InSb thin layers were studied in wide range of strain ($\varepsilon = \pm 1.4 \times 10^{-3}$ rel. un.) The samples with current contacts were fixed on the steel calibration beam. The resistance of the indium antimonide thin layers was measured at the operated current 1 mA.

The lowest temperature dependence of resistors on the basis of n-type conductivity InSb thin layers was revealed on the temperature dependences in range (- 180 ÷ + 120)°C. The largest value of gauge factor $K \approx - 46$ at temperature 20°C were found in undoped samples of InSb with majority concentration $(2 \div 3) \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. The n-type InSb thin layers doped by tellurium to concentration of $(4 \div 7) \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ with sufficiently high value of gauge factor ($K_{20^\circ\text{C}} \approx - 35$) and relatively weak its dependence on temperature has the most optimal characteristics for the creation of strain gauges.

The linear dependence of the resistance to the pressure of the InSb thin layers was found in the study of the effect of hydrostatic pressure up to 5 000 bar. The p-type conductivity InSb samples doped with zinc to concentration $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ have the greatest sensitivity to hydrostatic pressure ($K_{20^\circ\text{C}} \approx 46$) at positive temperatures. These layers could be used to create high-sensitivity pressure sensors, capable of operating in the temperature range $(0 \div + 60)^\circ\text{C}$. InSb samples with a concentration of charge carriers $(2 \div 3) \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ should be used for a wider range of temperatures.

Keywords: indium antimonide thin layers; piezoresistive properties; gauge factor; hydrostatic pressure

УДК 621.315.592

DOI 10.18524/1815-7459.2018.3.142044

ВПЛИВ ОДНОВІСНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ТА ГІДРОСТАТИЧНОГО ТИСКУ НА ВЛАСТИВОСТІ ТОНКИХ ШАРІВ InSb

А. О. Дружинін, І. Й. Мар'ямова, О. П. Кутраков, Н. С. Лях-Кагуї

Національний університет “Львівська політехніка”

Реферат

Метою роботи є вивчення впливу одновісної деформації та гідростатичного тиску на електрофізичні властивості тонких шарів антимоніду індію з різною концентрацією легуючої домішки для створення на їх основі чутливих елементів сенсорів механічних величин, дієздатних в інтервалі температур $(- 60 \div + 60)^\circ\text{C}$.

У широкому діапазоні деформацій $\varepsilon = \pm 1.4 \times 10^{-3}$ відн. од. було досліджено п'єзореzystивні властивості нелегованих та легованих телуrom тонких шарів InSb n-типу провідності. Зразки із створеними струмовими контактами закріплювались на сталій калібрувальній балці. Опір тонких шарів антимоніду індію вимірювали при керуючому струмі 1 мА.

При дослідженнях температурних залежностей опору резисторів на основі тонких шарів InSb n-типу провідності, за температур $(- 180 \div + 120)^\circ\text{C}$ виявлено, що найменша температурна залежність отримана для зразків легованих телуrom до концентрацій $(1 \div 1,5) \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Встановлено, що найвищий коефіцієнт тензочутливості $K_{20^\circ\text{C}} \approx - 46$ при температурі 20°C мають нелеговані зразки InSb з концентрацією основних носіїв заряду $(2 \div 3) \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Для створення тензореzystорів найбільш оптимальними характеристиками володіють тонкі шари InSb n-типу, леговані телуrom до концентрації $(4 \div 7) \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, які мають достатньо високі значення коефіцієнта тензочутливості ($K_{20^\circ\text{C}} \approx - 35$) і відносно слабку його залежність від температури. Тонкі шари InSb n-типу, леговані телуrom до концентрації $(4 \div 7) \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, які мають достатньо високі значення коефіцієнта тензочутливості ($K_{20^\circ\text{C}} \approx - 35$) і відносно слабку його залежність від температури володіють найбільш оптимальними характеристиками для створення тензореzystорів.

При дослідженні впливу гідростатичного тиску до 5000 бар на тонкі шари InSb виявлено лінійну залежність їх опору від тиску. Найбільшою чутливістю до гідростатичного тиску в області додатних температур характеризуються зразки InSb p-типу провідності, леговані цинком до концентрації $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ($K_{20^\circ\text{C}} \approx 46$). Такі шари можуть бути використані для створення високочутливих датчиків тиску, працездатних в інтервалі температур $(0 \div + 60)^\circ\text{C}$. Для більш широкого інтервалу температур доцільно використовувати зразки InSb з концентрацією носіїв заряду $(2 \div 3) \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

Ключові слова: тонкі шари антимоніду індію; тензореzystивні властивості; коефіцієнт тензочутливості, гідростатичний тиск

МАТЕРІАЛИ ДЛЯ СЕНСОРІВ

SENSOR MATERIALS

PACS 73.63.Rt, 78.40.-q, 78.70.Dm, УДК 538.9

DOI 10.18524/1815-7459.2018.3.140397

ФОТОННІ ТА ЕЛЕКТРОННІ ВЛАСТИВОСТІ ЛАТЕРАЛЬНИХ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВІ ФУНКЦІОНАЛІЗОВАНОГО ГРАФЕНА ПІД ДІЄЮ СТАТИЧНОГО ТИСКУ

Р. М. Балабай, О. А. Коновал, А. Г. Соломенко

Криворізький державний педагогічний університет, пр. Гагаріна, 54, Кривий Ріг, 50086,
Україна; тел.: (0564)71-57-31, e-mail: balabai@i.ua, konovaloa@gmail.com,
solomenko.anastasiiia@gmail.com

ФОТОННІ ТА ЕЛЕКТРОННІ ВЛАСТИВОСТІ ЛАТЕРАЛЬНИХ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВІ ФУНКЦІОНАЛІЗОВАНОГО ГРАФЕНА ПІД ДІЄЮ СТАТИЧНОГО ТИСКУ

Р. М. Балабай, О. А. Коновал, А. Г. Соломенко

Анотація. Методами функціоналу електронної густини та псевдопотенціалу із перших принципів отримані просторові розподіли густини валентних електронів, розподіли електронних станів у валентній зоні та зонах провідності, діелектричні матриці та макроскопічні відносні проникності латеральних гетероструктур на основі функціоналізованого графена як фотонного кристалу під дією статичного тиску.

Ключові слова: латеральна гетероструктура, функціоналізований графен, функціонал електронної густини, псевдопотенціал із перших принципів, електронна заборонена зона, спектр поглинання, статичний тиск

PHOTONIC AND ELECTRONIC PROPERTIES OF LATERAL HETEROSTRUCTURES BASED ON FUNCTIONALIZED GRAPHENE UNDER ACTION OF STATIC PRESSURE

R. Balabai, O. Konoval, A. Solomenko

Abstract. Within the framework of the methods of the electron density functional and the ab initio pseudopotential, the spatial distributions of the valence electron density, the distribution of electron states by energies in the valence and conduction bands, dielectric matrices and the macroscopic relative permeability of lateral heterostructures based on functionalized graphene as a photonic crystal depending on the action of static pressure were obtained.

Keywords: lateral heterostructure, functionalized graphene, the electron density functional, ab initio pseudopotential, electronic band gap, absorption spectrum, static pressure

ФОТОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА ЛАТЕРАЛЬНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННОГО ГРАФЕНА ПОД ДЕЙСТВИЕМ СТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Р. М. Балабай, А. А. Коновал, А. Г. Соломенко

Аннотация. Методами функционала электронной плотности и псевдопотенциала из первых принципов получены пространственные распределения плотности валентных электронов, распределения электронных состояний в валентной зоне и зонах проводимости, диэлектрические матрицы и макроскопические относительные проницаемости латеральных гетероструктур на основе функционализированного графена как фотонного кристалла под действием статического давления.

Ключевые слова: латеральная гетероструктура, функционализированный графен, функционал электронной плотности, псевдопотенциал из первых принципов, электронная запрещенная зона, спектр поглощения, статическое давление

1. ВСТУП

Графен широко використовується як активний, так і неактивний матеріал для датчиків тиску. У проектуванні п'єзоелектричного датчика графен може бути використаний як електродний матеріал для підтримки п'єзоелектричних матеріалів, а також добавок до п'єзоелектричних полімерів, для посилення п'єзоелектричності. Здатність різко змінювати опір робить графен ідеальним активним матеріалом у багатьох конструкціях датчика п'єзореzystивного типу. Графен

може також використовуватися як активний, так і неактивний матеріал в ємнісних датчиках тиску, які мають високу електропровідність, чутливість та велику площу поверхні [1]. Автори роботи [2] повідомляють про нелінійність прогину і велику амплітудну вібрацію графенових листів. Їх відхилення та основна частота є достатньо великими, тому вони перспективні у застосуванні для сенсорів високої чутливості та резонаторів. Порівняно з датчиками на основі кремнію [3], які мають типові лінійні розміри порядку сотні мікрон, розміри графен-сенсора досягають

кілька мікрон. Через їх меншу площу і меншу товщину нормалізація чутливості на порядок більша ніж для звичайних п'єзорезистивних датчиків тиску на основі Si. Їх прозорість, гнучкість та п'єзорезистентність є вагомими перевагами у використанні. Основною проблемою при проектуванні прозорих датчиків тиску, як свідчать автори [4], є ідеальне поєднання високої оптичної прозорості та чутливості високого тиску. Урахування цих вимог, зазвичай, досягається компромісом між прозорістю та використанням візерункової діелектричної поверхні, що підвищує чутливість до тиску, але зменшує прозорість. У роботі [5] розглядаються дві можливі конфігурації розміщення нітриду бора і графену для створення датчиків тиску атомного масштабу. Автори [6] повідомляють про сенсорний елемент тиску на основі гетероструктури нітрид бора/графен/нітрид бора. Шари нітриду бора використовувались для захисту графенового шару від окислення та забруднення. Автори [7] пропонують композитний датчик тиску сендвіч-типу на основі карбонової нанотрубки та графену. У статті [8] розглядається інтегрований на мікрофлюїдну еластичну трубку лист графена, який, завдяки зміні свого електричного опору, забезпечує вимірювання тиску. Повідомляється також [9] про створення датчика тиску і температури на основі інтерферометра Фабрі-П'єро, у складі якого є графенова плівка. Чутливість подібного сенсора становить 501,4 нм/кПа. У роботі [10] автори демонструють доцільність використання графена як стиснуто-плівкового датчика тиску, що складається з мембрани, яка покриває газову порожнину. Основною відмінністю від звичайних датчиків тиску є наявність відкритого каналу викиду, який підтримує середній тиск всередині порожнини, рівний тиску навколишнього середовища. Подібний датчик працює шляхом стискування газу в порожнині, що знаходиться під тиском навколишнього середовища. Автори [11] дослідили модель сенсорного емнісного датчика тиску, що складається з графен-полімерної гетероструктурної плівки, ламінованої на поверхню діоксиду кремнію кремнієвої пластини. Конструкція дозволяє

гнучкій графен-полімерній плівці частково нависати над підкладкою, при цьому тиск на мембрану призводить до відхилення, яке відновлюється навіть після перевищення робочого діапазону тиску на мембрану в 10 разів. Автори [12] повідомляють про високочутливий, надтонкий та прозорий датчик тиску на основі гофрованого графена, який має надвисоку експлуатаційну чутливість ($6,92 \text{ кПа}^{-1}$), що змінюється від характеристик, властивих ізоляторам, в неактивному стані до характеристик провідника під час стиснення. У роботі [13] демонструється гнучкий, ультрочутливий сенсор резистивного типу на основі графена. Завдяки великій відстані між графеновими шарами та унікальній V-подібній мікроструктурі, чутливість датчика тиску досягає $0,96 \text{ кПа}^{-1}$ при широкому діапазоні тиску (0-50 кПа). Датчики тиску є фундаментальними компонентами пристроїв електронної шкіри [14,15]. Автори [16] повідомляють про розроблені на основі графену тактильні сенсори та електронну шкіру, які можуть мати широке застосування в передовій робототехніці, моніторингу охорони здоров'я, штучному інтелекті, інтерфейсах людино-машин тощо.

На відміну від вже існуючих механізмів роботи датчиків тиску, пропонується нами модель являє собою принципово новий підхід у проектуванні подібних датчиків. Основним елементом є латеральна гетероструктура на основі функціоналізованого листа графена, який або розташований на твердій діелектричній підкладці у камері досліджуваного середовища, що створює вплив на одну поверхню листа графена, або вільно підвішений у камері в положенні, що створює на лист графена однакові впливи досліджуваного середовища на обидві поверхні листа. Наявні періодичні чергування ділянок чистого графена (C) та функціоналізованого графена (CH) [17], які мають різну діелектричну проникність, дають підстави розглядати таку структуру в якості фотонного кристалу (ФК) і досліджувати зміну його властивостей у залежності від тиску зовнішнього середовища. Методи розрахунку, що використовуються нами, які застосовують функціонал електронної густини, є повним універсальним

інструментом для вивчення фотонних кристалів. Для встановлення закономірностей зв'язку фотонних та електронних властивостей латеральних гетероструктур на основі функціоналізованого графена по відношенню до статичного тиску зовнішнього середовища, використовуючи авторський код [18], були отримані просторові розподіли густини валентних електронів, розподіли електронних станів у зонах валентній та провідності, діелектричні матриці та макроскопічні відносні проникності.

2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Традиційно, аналіз фотонних властивостей ФК робиться чисельними методами. Існує багато чисельних моделей проходження електромагнітних хвиль у ФК, основаних на таких методах, як Plane-Wave-Expansion-Method, Finite-Difference-Time-Domain-Method або методи власних мод. Основними серед них визнані: метод Пендри, що використовує умови квазіперіодичності поля у ФК, так, що для отримання коефіцієнтів у дисперсійному рівнянні досить вирішити рівняння Максвелла чисельно (наприклад, методом кінцевих різниць) в межах однієї комірки; метод Блоха-Флоке, що призводить до нескінченної системи дисперсійних рівнянь шляхом розкладання поля по просторовим гармонікам.

Реакція твердого тіла на зовнішнє збурююче електромагнітне поле, головним чином, є реакцією електронів, тому важливо, вивчаючи ФК, разом із діелектричними властивостями отримувати інформацію про властивості електронної підсистеми. Так, використані нами розрахункові методи, що застосовують функціонал електронної густини, є повноцінним універсальним інструментом дослідження ФК. У наших обчислювальних експериментах отримані просторові розподіли густини валентних електронів, електронні енергетичні спектри та діелектрична функція, що описує лінійний відклик твердого тіла на зовнішнє електричне поле, модельних ФК. Результати були одержані за допомогою авторського програмного коду [18, 19].

Основні стани електронно-ядерної системи виявлялися за допомогою самоузгодженого рішення рівнянь Кона-Шема. Електронні змінні визначалися при фіксованих атомних остовах. Слідуючи за Коном-Шемом [20, 21], електронна густина була записувалася в термінах зайнятих ортонормованих одночастинкових хвильових функцій:

$$n(\vec{r}) = \sum_i |\psi_i(\vec{r})|^2. \quad (1)$$

Точка на поверхні потенціальної енергії в наближенні Борна-Оппенгеймера визначалася мінімумом енергетичного функціоналу по відношенню до хвильових функцій:

$$E[\{\psi_i\}, \{R_j\}, \{\alpha_v\}] = \sum_i \int_{\Omega} d^3r \psi_i^*(\vec{r}) \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \right] \psi_i(\vec{r}) + U[\{n(\vec{r})\}, \{R_j\}, \{\alpha_v\}], \quad (2)$$

де $\{R_j\}$ – координати атомних остовів, $\{\alpha_v\}$ – усі можливі зовнішні впливи на систему.

У загальноприйнятому формулюванні мінімізація енергетичного функціоналу (2) по відношенню до одночастинкових орбіталей при накладених на них додаткових умовах ортонормування приводить до одночастинкових рівнянь Кона-Шема [21]:

$$\left\{ -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + \frac{\partial U}{\partial n(\vec{r})} \right\} \psi_i(\vec{r}) = \varepsilon_i \psi_i(\vec{r}). \quad (3)$$

При розв'язуванні цих рівнянь використовувався формалізм псевдопотенціалу, згідно з яким тверде тіло розглядається як сукупність валентних електронів та іонних остовів. У наближенні псевдопотенціалу оператор псевдопотенціалу V_{PS} , який описує взаємодію валентних електронів з остовом, малий, а відповідна псевдо-хвильова функція гладка. Псевдопотенціал повинен правильно представляти далекодіючу природу остова та давати змогу отримати рішення у вигляді псевдо-хвильових функцій, які співпадають з повною хвильовою функцією за межами радіуса іонного остова r_c . Крім того, бажано, щоб псевдопотенціал був переносимим, це означає, що один і той же псевдопотенціал може бути використаний при розрахунках в

різних хімічних оточеннях і давати результати обчислення з порівнянною точністю. Так, Бечелет, Хеменн і Шлітер запропонували аналітичний придатний вищезначеним умовам псевдопотенціал. Цей псевдопотенціал із перших принципів використовується нами [22, 23].

Повний кристалічний потенціал будується як сума іонних псевдопотенціалів, які не перекриваються і пов'язані з іонами (ядра й остовні електрони), розташованими на позиціях \vec{R}_S , які періодично повторюються для кристалів:

$$V_{cryst}(\vec{r}) \rightarrow V_{PS}(\vec{r}) = \sum_p \sum_S \hat{V}_S^{PS}(\vec{r} - \vec{p} - \vec{R}_S). \quad (4)$$

Для неперіодичних систем, таких як тонка плівка або кластер, проблема відсутності періодичності обходиться методом суперкомірки [24, 25]. В межах якого кластер, наприклад, періодично повторюється, але відстань між кожним кластером та його періодичним повтореннями настільки велика, що їх взаємодія нехтовна. Повсюдна періодичність кристалічної (або штучної) решітки створює періодичний потенціал і таким чином накладає таку ж періодичність на електронну густину (мається на увазі теорема Блоха). Потенціал Кона-Шема періодичної системи проявляє ту саму періодичність, що й решітка, а орбіталі Кона-Шема можуть бути записані в формі Блоха:

$$\psi(\vec{r}) = \psi_i(\vec{r}, \vec{k}) = \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r}) u_i(\vec{r}, \vec{k}), \quad (5)$$

де \vec{k} є вектором із першої зони Бриллюена. Індекс i перебігає усі можливі електронні стани. Функція $u_i(\vec{r}, \vec{k})$ має періодичність просторової решітки. Вона може бути розкладена в ряд за плоскими хвилями. Це обґрунтовує використання плоских хвиль як загальної бази, обраної нами, для розкладення періодичної частини орбіталей. Оскільки плоскі хвилі утворюють повний та ортонормований набір функцій, то використання їх для розкладення одночастинкових орбіталей має вигляд:

$$\psi_j(\vec{k}, \vec{r}) = \frac{1}{\sqrt{N_0} \sqrt{\Omega}} \sum_{\vec{G}} b_j(\vec{k} + \vec{G}) \exp(i(\vec{k} + \vec{G}) \cdot \vec{r}), \quad (6)$$

де \vec{G} є вектор оберненого простору, Ω - об'єм елементарних комірок, котрі заповнюють кристал або штучну суперрешітку у випадку неперіодичних об'єктів.

Рівняння (6) після Фур'є-перетворення має такий вигляд у оберненому просторі:

$$\sum_{\vec{G}} \left[\left\{ \frac{\hbar^2}{2m} (\vec{k} + \vec{G})^2 - \varepsilon_j \right\} \delta_{\vec{G}, \vec{G}'} + V_{KS}(\vec{k} + \vec{G}, \vec{k} + \vec{G}') \right] b_j(\vec{k} + \vec{G}) = 0, \quad (7)$$

де V_{KS} - потенціал Кона-Шема:

$$V_{KS}(\vec{k} + \vec{G}, \vec{k} + \vec{G}') = V_{PS}(\vec{k} + \vec{G}, \vec{k} + \vec{G}') + V_H(\vec{G}' - \vec{G}) + V_{XC}(\vec{G}' - \vec{G}). \quad (8)$$

V_{XC} є обмінно-кореляційним потенціалом, для його розрахунку ми використовували апроксимацію Сіперлі-Олде, параметризовану Педью та Зунге.

У загальному випадку вирази, що описують потенціали взаємодії, комплексні. Використання атомних базисів, що містять операцію інверсії в своїй групі точкової симетрії, призводить до того, що Фур'є-компоненти при розкладі всіх виразів є реальними.

Основною величиною в формалізмі функціоналу електронної густини є густина електронного заряду. Вона оцінюється на основі самоузгодженого рішення рівняння (7), яке повинно виконуватися в усіх точках неприводимої частини зони Бриллюена:

$$\rho(\vec{G}) = \frac{2}{N_T} \sum_k \sum_j \sum_{\alpha \in T} \sum_{\vec{G}'} b_j^*(\vec{k} + \vec{G}' + \alpha \vec{G}) b_j(\vec{k} + \vec{G}'), \quad (9)$$

де індекс j перебігає усі заняті стани, \vec{k} є вектором із першої зони Бриллюена, N_T є

число операцій α в точковій групі T атомного базису, множник 2 враховує виродженість за спіном.

Розрахункові зусилля можна скоротити, якщо використовувати метод спеціальних точок. Є різні підходи щодо вибору цих точок. Так, можна використовувати рівномірні або нерівномірні сітки Γ -точок, можна з прийнятною точністю замінити сумування за кінцевим числом спеціальних точок до однієї точки в зоні Бріллюена. Можна обмежитися лише Γ -точкою в зоні Бріллюена, особливо це стосується штучних періодичних.

Розподіл електронів по енергіям отримувався шляхом числового обчислення похідної $\lim_{\Delta E \rightarrow 0} \Delta N / \Delta E$, де ΔN – кількість дозволених станів, що припадають на проміжок енергії ΔE , із отриманого під час діагоналізації матриці Кона-Шема одночастинкового енергетичного спектра, кількість значень в якому контролюється розміром розкладу хвильової функції. Відповідно до ідеології функціонала електронної густини кількість зайнятих станів при $T = 0K$ визначалися половиною кількістю електронів у атомному базисі (у зв'язку з неврахуванням спіну електрона).

Лінійний відклик твердого тіла на збурення – електричне поле, фонони та інші – описується діелектричною матрицею. У наших обчислювальних експериментах статична діелектрична матриця кристалічної системи оцінювалася із електронної структури її основного стану (зайнятих і незайнятих станів). Діелектрична матриця $\epsilon_{\vec{G}, \vec{G}'}^{-1}(\vec{q}, \vec{\omega})$ представлялася в оберненому просторі і залежала від хвильового вектора \vec{q} та частоти коливань електромагнітного збурюючого поля $\vec{\omega}$ (\vec{G} – вектори оберненої решітки). Недіагональні елементи матриці $\epsilon_{\vec{G}, \vec{G}'}^{-1}$ визначають локальні ефекти поля. Макроскопічна діелектрична функція визначалася [26]:

$$\epsilon_M(\vec{q} + \vec{G}) = \frac{1}{\epsilon_{00}^{-1}(\vec{q})}. \quad (10)$$

Щоб отримати елементи матриці розв'язували рівняння в оберненому просторі:

$$\epsilon_{\vec{G}, \vec{G}'}^{-1}(\vec{q}) = \delta_{\vec{G}, \vec{G}'} + \frac{4\pi e^2}{|\vec{q} + \vec{G}|^2} \chi_{\vec{G}, \vec{G}'}(\vec{q}), \quad (11)$$

де поляризованість $\chi_{\vec{G}, \vec{G}'}(\vec{q})$ визначалася як

$$\chi_{\vec{G}, \vec{G}'}(\vec{q}) = \sum_{\vec{G}''} A_{\vec{G}, \vec{G}'}^{-1}(\vec{q}) \chi_{\vec{G}, \vec{G}'}^0(\vec{q}), \quad (12)$$

$$A_{\vec{G}, \vec{G}'}(\vec{q}) = \delta_{\vec{G}, \vec{G}'} - \chi_{\vec{G}, \vec{G}'}^0(\vec{q}) \frac{4\pi e^2}{|\vec{q} + \vec{G}|^2} - \sum_{\vec{G}''} \chi_{\vec{G}, \vec{G}'}^0(\vec{q}) K_{XC}(\vec{G}'' - \vec{G}'), \quad (13)$$

$$\chi_{\vec{G}, \vec{G}'}^0(\vec{q}) = \frac{4}{\Omega} \sum_{c, v, k} \frac{\langle v, \vec{k} | e^{-i(\vec{q} + \vec{G}) \cdot \vec{r}} | c, \vec{k} + \vec{q} \rangle \langle c, \vec{k} + \vec{q} | e^{i(\vec{q} + \vec{G}) \cdot \vec{r}} | v, \vec{k} \rangle}{\epsilon_{v, k} - \epsilon_{c, \vec{k} + \vec{q}}}, \quad (14)$$

де індекси c, v, k перебирали стани зон провідності, валентної та Бріллюена [26].

Обмінно-кореляційний внесок мав вид:

$$K_{XC}(\vec{r}, \vec{r}') = \frac{\partial^2 E_{XC}}{\partial \rho(\vec{r}) \partial \rho(\vec{r}')} = \frac{dV_{XC}}{d\rho} \Big|_{\rho(\vec{r})}(\vec{r} - \vec{r}'). \quad (15)$$

Отримана діелектрична матриця є ермітовою і завдяки наявності центру інверсії модельного кристалу є симетричною. Її діагоналізація призводить до отримання власних значень $\epsilon_n^r(\vec{q})$ та власних функцій $V_n^r(\vec{q} + \vec{G})$:

$$\sum_{\vec{G}'} \epsilon^{-1}(\vec{q} + \vec{G}, \vec{q} + \vec{G}') V_n^r(\vec{q} + \vec{G}') = \epsilon_n^r(\vec{q}) V_n^r(\vec{q} + \vec{G}). \quad (16)$$

Вектор \vec{q} знаходиться в межах зони Бріллюена, а власні значення $\epsilon_n^r(\vec{q})$ означають «діелектричну зонну структуру». Знання власних значень та власних функцій діелектричної матриці є важливим. Вони служать для візуалізації екранування в реальному просторі, передають інформацію про електронних відгук твердого тіла та дозволяють адекватно врахувати симетрію кристалу.

Повна енергія на одну елементарну комірку має вигляд [27]:

$$E_{tot}/\Omega = \sum_{\vec{k}, \vec{G}, \vec{J}} |\psi(\vec{k} + \vec{G})|^2 \frac{\hbar^2}{2m} (\vec{k} + \vec{G})^2 + \frac{1}{2} 4\pi e^2 \sum_{\vec{G}} \frac{|\rho(\vec{G})|^2}{G^2} + \sum_{\vec{G}} \epsilon_{XC}(\vec{G}) \rho^*(\vec{G}) + \sum_{\vec{k}, \vec{G}, \vec{G}', \vec{J}, \vec{J}'} S_s(\vec{G} - \vec{G}') \Delta V_{I, s}^{NJ}(\vec{k} + \vec{G}, \vec{k} + \vec{G}') \psi(\vec{k} + \vec{G}) \psi^*(\vec{k} + \vec{G}') + \sum_{\vec{G}, \vec{S}} S_s(\vec{G}) V_s^L(\vec{G}) \rho^*(\vec{G}) + \left\{ \sum_S \alpha_S \right\} \left[\Omega^{-1} \sum_S Z_S \right] + \Omega^{-1} \gamma_{Ewald}, \quad (17)$$

де \vec{k} має значення із першої ЗБ, \vec{G} – вектор

оберненої ґратки, $\psi_i(\vec{k} + \vec{G})$ – хвильова функція, i – позначає зайняті стани для певного \vec{k} , $\rho(\vec{G})$ є коефіцієнт з розкладу густини валентних електронів, s нумерує атоми в елементарній комірці, $S_s(\vec{G})$ є структурним фактором, V_s^L є локальний (l -незалежний) сферично симетричний псевдопотенціал, l – позначає квантове орбітальне число, $\Delta V_{l,s}^{NL}$ є нелокальна (l -залежна) добавка до V_s^L , Z_s – заряд іона, γ_{Ewald} – це енергія Маделунга точкових іонів в однорідному від’ємному фоні.

Сила, що діє на атом s є від’ємною похідною E_{tot} по базисному вектору $\vec{\tau}_s$. Вирази, що містять неявну похідну хвильової функції, дорівнюють нулю за теоремою Хелмана-Фейнмана. Тому розрахунок сил виконується за формулою [27]:

$$\vec{F}^s = \vec{F}_e^s + \vec{F}_c^s, \quad (18)$$

де складові електронної та іонної взаємодії відповідно:

$$\vec{F}_e^s = i\Omega_c \sum_{\vec{G}} \rho^*(\vec{G}) \vec{G} e^{-i\vec{G}\vec{\tau}_s} v_s(\vec{G}) - \sum_{i,\vec{G},\vec{G}'} n_i \psi_i^*(\vec{k}_i + \vec{G}') \psi_i(\vec{k}_i + \vec{G}) (\vec{G} - \vec{G}') e^{-i(\vec{G} - \vec{G}')\vec{\tau}_s} v_{s,i}(\vec{k}_i + \vec{G}, \vec{k}_i + \vec{G}'), \quad (19)$$

$$\vec{F}_c^s = 2Z_s \sum_{s' \neq s} Z_{s'} \sum_{\vec{G}} \frac{4\pi}{\Omega_c} \sum_{\vec{G}'} \left(\frac{\vec{G}}{|\vec{G}|^2} \sin(\vec{G}(\vec{\tau}_{s'} - \vec{\tau}_s)) e^{\frac{|\vec{G}|^2}{4\eta^2}} \right) + 2Z_s \sum_{s' \neq s} Z_{s'} \sum_{\vec{l}} \left(\frac{x \operatorname{erfc}(\eta|\vec{x}|)}{|\vec{x}|^3} + \frac{2\eta\vec{x}}{\sqrt{\pi}|\vec{x}|^2} e^{-|\vec{x}|^2} \right), \quad (20)$$

де $\vec{x} = \vec{l} + \vec{\tau}_s - \vec{\tau}_{s'}$, Ω_c – об’єм комірки на один атом, $\vec{\tau}_s$ – базисний вектор атома s у комірці, Z_s – заряд остова, \vec{l} – вектор решітки, сума по \vec{l} виключає доданок, у якому при $s \neq s'$ вектор $\vec{l} = 0$, η – параметр збіжності суми у функції Евальда erfc .

3. ОБ’ЄКТИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для дослідження фотонних та електронних властивостей латеральних гетеро-

структур на основі графена була розроблена модель суперрешітки, яка являє собою періодичне чергування ділянок чистого графена (С) та функціоналізованого графена (СН) (рис. 1). Примітивна комірка суперрешітки ромбічного типу мала такі параметри: $a = 9,96 \text{ \AA}$, $b = 8,82 \text{ \AA}$, $c = 5,29 \text{ \AA}$ і відтворювала при трансляції двовимірний фотонний кристал. Геометричні властивості ромбічної комірки такі, що зручно в екранних побудовах використовувати Декартову систему координат. Розмір примітивної комірки у напрямку \vec{Z} обирався так, щоб уникнути взаємодії атомних площин, що транслюються в цьому напрямку. Розміри примітивної комірки у напрямках \vec{X} та \vec{Y} обиралися такі, щоб при трансляції організувати нескінченний лист графена. Координати у площині $\vec{X}\vec{Y}$ атомів атомного базису, що відтворювали ділянки графену та графану, визначалися як середнє арифметичне відповідних структурних параметрів нескінченних листів графена та графану, а саме довжини зв’язку між атомами С. Атомний базис містив 48 атомів, з яких 32 атоми С та 16 атомів Н. Обчислення проводилося тільки для Γ -точки зони Бриллюена суперрешітки.

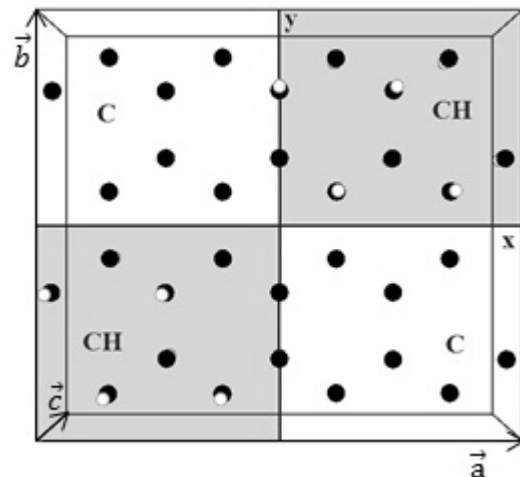


Рис. 1. Примітивна комірка суперрешітки з атомним базисом латеральної гетероструктури графен/графан - утворююча одиниця фотонного кристала.

Дослідження полягало у виявленні змін фотонних та електронних властивостей латеральної гетероструктури графен/графан під

дією статичного тиску зовнішнього середовища. Моделювання реакції атомів фотонного кристалу на дію тиску здійснювалось шляхом зміни координат атомного базису, що відбивало рівномірне стиснення ФК з обох поверхонь графен-графанового листа. Вважалося, що дія статичного тиску проявлялася тільки на положенні атомів гідрогену (Н), які є у складі графану (СН), тобто на їх відстань до графенового каркасу. Для порівняння було обрано п'ять ступенів стиснення: 1) без стиснення (0%) - відстань С-Н $a_{\text{сн}} = 1,12 \text{ \AA}$ (СН), 2) стиснення на 2,5%, відстань С-Н зменшена на 2,5% від $a_{\text{сн}}$ графана, 3) стиснення на 5%, 4) стиснення на 7,5%, 5) стиснення на 10%. Оцінка тиску зовнішнього середовища здійснювалась із розрахунку сил на основі формул (17-20), які діяли на атоми гідрогену зі сторони решта остовної та електронної підсистем. На підставі третього закону Ньютона очевидно вважати, що ці сили були реакцією рівною по модулю, але протилежною за напрямком на зовнішній механічний вплив статичного тиску. У результаті були отримані значення сил, що діють на кожен атом гідрогену (Н) при прикладанні відповідного тиску (Табл. 1), які потім були усереднені.

Для оцінки тиску зовнішнього середовища із отриманих значень сил віднімалися значення сил, що відповідали відсутності стиснення (Табл. 2). Перерахунок одиниць виміру тиску з а.о. в $\text{Н} \times \text{Å}$ здійснювався з використанням виразу $1 \text{ Н} \times \text{Å} = 1 \text{ а.о.} \times 2,29371 \times 10^7$, що був отриманий із співвідношень одиниць вимірювання фізичних величин.

Щодо електронних властивостей ФК на основі графена, на рис. 2 зображені карти просторового розподілу густини валентних електронів ФК при різних значеннях тиску зовнішнього середовища. Видно, зміна тиску призводить до перебудови електронних «хмар» ковалентних зв'язків С-Н, а саме до збільшення інтенсивності густини валентних електронів вздовж цих зв'язків.

Зміна ширини електронної забороненої зони ФК при різних значеннях тиску зовнішнього середовища приводиться на графіку рис 3, числові значення ширини електронної забороненої зони ФК при різних значеннях тиску наводяться в табл. 3. Суттєве зменшення ширини електронної забороненої зони ФК спостерігається при його стисненні під дією зовнішнього тиску більш ніж на 5%, що свідчить про посилення провідних властивостей ФК.

Таблиця 1.

Значення сил (в а.о.), що діють на кожен атом гідрогену (Н), при різних значеннях тиску зовнішнього середовища.

атом Н	0% стиснення	2,5% стиснення	5% стиснення	7,5% стиснення	10 % стиснення
1	1,672	1,741	1,815	1,894	1,979
2	1,647	1,719	1,794	1,876	1,963
3	1,622	1,695	1,773	1,856	1,945
4	1,673	1,743	1,816	1,895	1,98
5	1,647	1,718	1,794	1,875	1,963
6	1,673	1,742	1,816	1,895	1,98
7	1,674	1,743	1,817	1,896	1,981
8	1,622	1,695	1,773	1,856	1,945
усереднене значення	1,65	1,72	1,80	1,88	1,96

Таблиця 2.

Значення статичного тиску зовнішнього середовища в різних одиницях виміру.

№	Тиск, %	Тиск, а.о.	Тиск, Н·Å
1	0	0	0
2	2,5	0,07	$16,06 \cdot 10^5$
3	5	0,15	$34,41 \cdot 10^5$
4	7,5	0,23	$52,76 \cdot 10^5$
5	10	0,31	$71,11 \cdot 10^5$

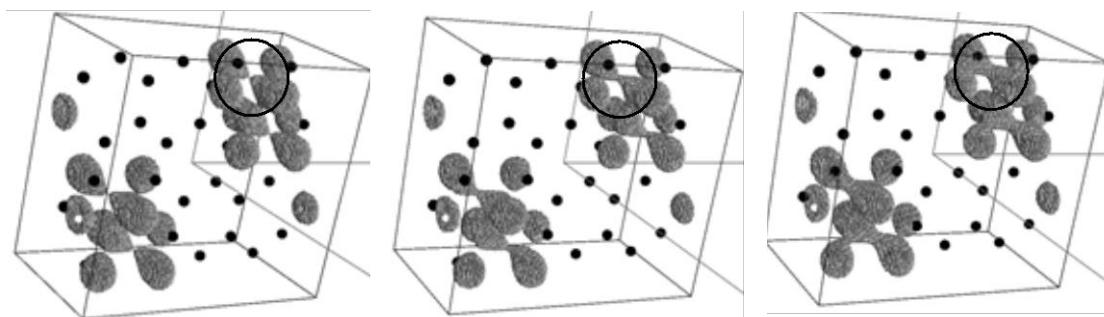


Рис. 2. Просторові розподіли густини валентних електронів ФК для ізозначень 0,6-0,5 від максимального при різних значеннях тиску: зліва - направо 0%, 5%, 10%.

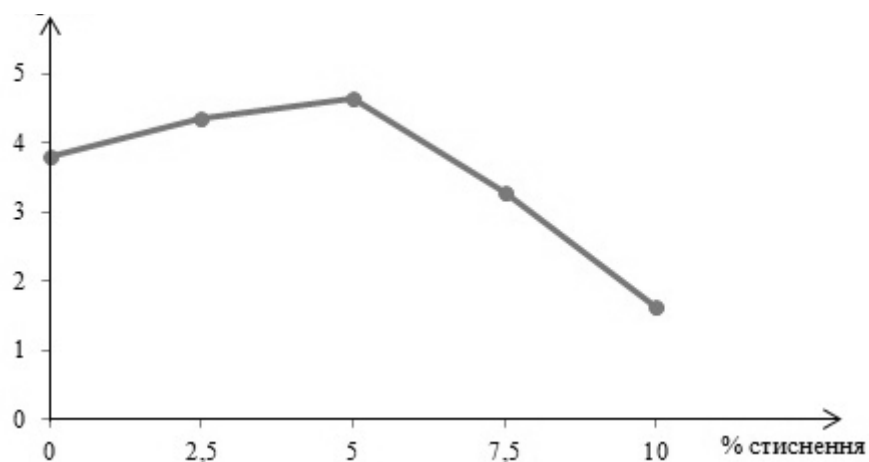


Рис. 3. Зміна ширини електронної забороненої зони при різних значеннях тиску зовнішнього середовища.

Таблиця 3.

Значення ширини електронної забороненої зони ФК при різних значеннях тиску зовнішнього середовища в різних одиницях виміру.

Стиснення, %	E_g , а.о.	E_g , eV
0	0,14	3,81
2,5	0,16	4,35
5	0,17	4,63
7,5	0,12	3,27
10	0,06	1,63

Щодо фотонних властивостей ФК, вони обговорюються у таблицях 4, 5 та рисунках 4-6. Так у таблиці 4 наведені макроскопічні діелектричні проникності ФК при різних значеннях тиску зовнішнього середовища, обчислені із діелектричної матриці, що отримана за формулами (10-16). Спостерігається анізотропія діелектричних властивостей ФК при різних напрямках вектора електричного поля збуджуючої електромагнітної хвилі (ЕМХ), що видно з таблиці 4. При направленні вектора електричного поля збуджуючої ЕМХ паралельно напрямкам вісі \vec{Y} та діагональному напрямку $[\vec{X} + \vec{Y}]$ (див. рис. 1) значення

макроскопічної діелектричної проникності близькі до одиниці, що співпадає з діелектричною проникністю вакууму і не передбачає заломлення електромагнітного променя при розповсюдженні вздовж цих напрямків ФК. Тоді як при направленні вектора електричного поля збуджуючої ЕМХ паралельно напрямку вісі \vec{X} – цей напрямок характерний тим, що він співпадає з більшою стороною прямокутника утворюючої одиниці ФК (див. рис. 1), - макроскопічна діелектрична проникність збільшується в 2,61 рази по відношенню до розповсюдження по іншим напрямкам.

Таблиця 4.

Макроскопічна діелектрична проникність ФК при різних значеннях тиску зовнішнього середовища.

Напрямки вектора електричного поля збуджуючої ЕМХ	Стиснення структури				
	0 %	2,5 %	5%	7,5 %	10%
$\vec{E} \parallel \vec{X}$	2,61	0,95	0,93	0,92	0,91
$\vec{E} \parallel \vec{Y}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\vec{E} \parallel [\vec{X} + \vec{Y}]$	0,96	0,97	0,97	0,98	1,00

Таблиця 5.

Довжини хвиль піків спектру поглинання ФК у залежності від напрямку вектора поперечної поляризації електричного поля збуджуючої ЕМХ при різних величинах стиснення ФК.

Стиснення, %	λ , нм при $\vec{E} \parallel \vec{X}$	λ , нм при $\vec{E} \parallel \vec{Y}$	λ , нм при $\vec{E} \parallel [\vec{X} + \vec{Y}]$
0	0,82	258,47	94,82
2,5	29,84	275,46	106,41
5	43,42	291,63	144,65
7,5	57,51	286,54	100,36
10	106,31	291,25	36,70

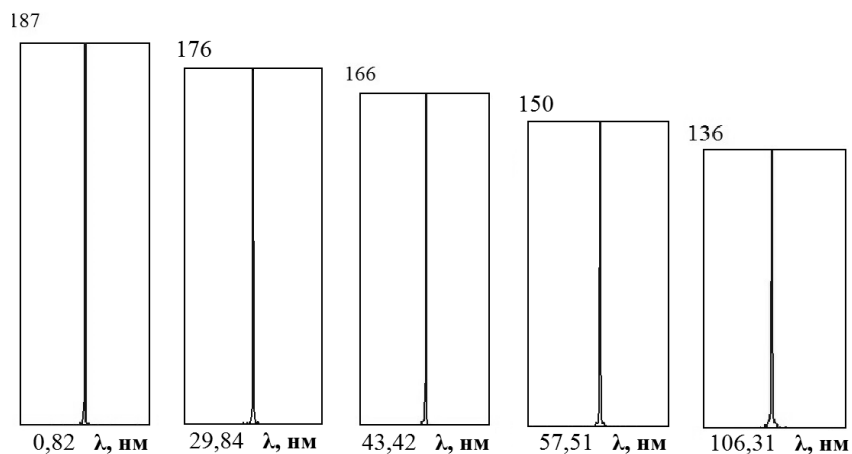


Рис. 4. Спектр поглинання ФК у напрямку збудуючої ЕМХ $\vec{E} \parallel \vec{X}$ при різних значеннях тиску зовнішнього середовища (зліва направо 0%, 2,5%, 5%, 7,5%, 10%, вертикальна вісь – інтенсивність поглинання).

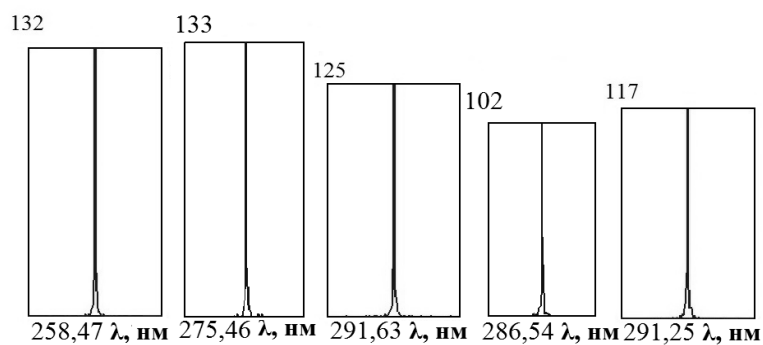


Рис. 5. Спектр поглинання ФК у напрямку збудуючої ЕМХ $\vec{E} \parallel \vec{X}$ при різних значеннях тиску зовнішнього середовища (зліва направо 0%, 2,5%, 5%, 7,5%, 10%, вертикальна вісь – інтенсивність поглинання).

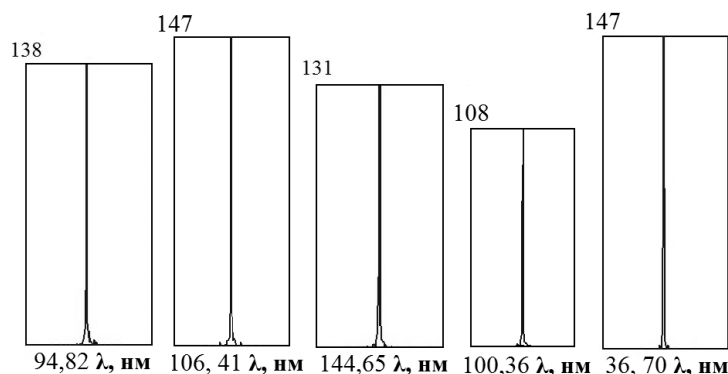


Рис. 6. Спектр поглинання ФК у напрямку збурюючої ЕМХ $\vec{E} \parallel \vec{X}$ при різних значеннях тиску зовнішнього середовища (зліва направо 0%, 2,5%, 5%, 7,5%, 10%, вертикальна вісь – інтенсивність поглинання).

Довжини хвиль електромагнітного випромінювання, що дозволені власними значеннями діелектричної матриці ФК, одержуються із розв'язку рівняння (16) при $\vec{q} \rightarrow 0$. У цій довгохвильовій границі вектор \vec{q} означає вектор поперечної поляризації електричного поля \vec{E} . На рис. 4 – рис. 6 та таблиці 5 приводяться власні значення діелектричних матриць ФК (спектр поглинання ФК) у залежності від напрямку вектора поперечної поляризації електричного поля збурюючої ЕМХ при різних значеннях тиску зовнішнього середовища. Власні значення діелектричної матриці були перераховані шляхом їх співставлення з електронним спектром у відповідні довжини хвиль. Так, у напрямку $\vec{E} \parallel \vec{X}$ за відсутності стиснення довжина хвилі піку в спектрі поглинання ФК становить 0,82 нм (ця довжина співпадає з порядком параметрів утворюючої одиниці ФК), що відповідає області м'якого рентгену. У напрямках $\vec{E} \parallel \vec{Y}$ та $\vec{E} \parallel [\vec{X} + \vec{Y}]$ при різних значеннях тиску довжини хвиль піків у спектрі поглинання ФК знаходяться в області ультрафіолетового випромінювання.

При збільшенні тиску зовнішнього середовища на ФК, піки в спектрі поглинання ФК, що відповідають напрямку вектора поперечної поляризації електричного поля збурюючої ЕМХ $\vec{E} \parallel \vec{X}$, зсуваються в бік збільшення

довжин хвиль, при цьому їх інтенсивність зменшується. Щодо реакції ФК на збільшення тиску в напрямках вектора поперечної поляризації електричного поля збурюючої ЕМХ $\vec{E} \parallel \vec{Y}$ та $\vec{E} \parallel [\vec{X} + \vec{Y}]$, то вона незначна та немонотонна, її не можна вважати детектуючою. Слід зауважити, що саме для напрямку $\vec{E} \parallel \vec{X}$ було зафіксовано значення діелектричної макроскопічної проникності, що значно відрізнялося від решта значень при інших напрямках.

Публікація заснована на дослідженні, наданому за підтримки Гранту Фонду фундаментальних досліджень (проект Ф76 / 70-2017).

4. ВИСНОВКИ

Методами функціоналу електронної густини та псевдопотенціалу з перших принципів, використовуючи авторський код, були отримані просторові розподіли густини валентних електронів, розподіли електронних станів у валентній зоні та зонах провідності, діелектричні матриці та макроскопічні відносні проникності латеральних гетероструктур на основі функціоналізованого графена як фотонного кристалу під дією статичного тиску.

Підвищення тиску посилює ковалентні С-Н зв'язки функціоналізованого графена,

що проявляється у збільшенні інтенсивності густини валентних електронів вздовж напрямків зв'язків.

Спостерігається збільшення ширини електронної забороненої зони латеральних гетероструктур на основі функціоналізованого графена як фотонного кристалу при його стисненні до 5 %. При подальшому стисненні (7,5% та 10%) ширина забороненої зони різко зменшується, що свідчить про посилення провідних властивостей гетероструктури.

Спектр поглинання гетероструктури на основі функціоналізованого графена як фотонного кристалу за відсутності стиснення для напрямку $\vec{E} \parallel \vec{X}$ вектора поперечної поляризації електричного поля збурюючої електромагнітної хвилі має пік для хвиль довжиною 0,82 нм, що відповідає області м'якого рентгену. Підвищення тиску зовнішнього середовища на поверхню гетероструктур призводить до зсуву піків їх спектрів поглинання в бік довших хвиль із зменшенням інтенсивності.

Для напрямків $\vec{E} \parallel \vec{Y}$ та $\vec{E} \parallel [\vec{X} + \vec{Y}]$ при різних значеннях тиску піки спектрів поглинання гетероструктур знаходяться в області ультрафіолетового випромінювання.

Максимальне значення діелектричної макроскопічної проникності гетероструктури на основі функціоналізованого графена як фотонного кристалу було зафіксовано для напрямку $\vec{E} \parallel \vec{X}$ вектора поперечної поляризації електричного поля збурюючої електромагнітної хвилі.

Латеральна гетероструктура на основі періодично функціоналізованого графена має властивості фотонного кристалу, котрі залежать від тиску зовнішнього середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1]. L. Zhang et al. Recent Advances in Graphene-Based Pressure Sensors // *Nano LIFE*: 6, Nos. 3 & 4, p. 1642005 (2016).

[2]. S. Jiang et al. Nanomechanics and vibration analysis of graphene sheets via a 2D plate model // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 47, p. 045104 (2014).

[3]. H. Zulfiqar et al. Mechanical and electromechanical properties of graphene and their potential application in MEMS. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 50, p. 05300 (2017).

[4]. H. Kim et. al. Transparent, Flexible, Conformal Capacitive Pressure Sensors with Nanoparticles // *Small*, p. 1703432 (2018).

[5]. Y. Xu et al. In-plane and tunneling pressure sensors based on graphene/hexagonal boron nitride heterostructures // *Appl. Phys. Lett.*: 99, p. 133109 (2011).

[6]. V. P. Pham et. al. Chlorine-trapped CVD bilayer graphene for resistive pressure sensor with high detection limit and high sensitivity // *2D Mater.*: 4, p. 025049 (2017).

[7]. A. Ali et al. Pressure Sensitive Sensors Based on Carbon Nanotubes, Graphene, and Its Composites // *Journal of Nanomaterials*, p. 9592610 (2018).

[8]. N. Inoue and H. Onoe. Graphene-based inline pressure sensor integrated with microfluidic elastic tube // *J. Micromech. Microeng.*: 28, p. 014001 (2018).

[9]. N. Dong et. al. Pressure and temperature sensor based on graphene diaphragm and fiber bragg gratings // *Phot. Tech. Let.*, pp. 1041-1135 (2017).

[10]. J. Robin et. al. Graphene Squeeze-Film Pressure Sensors // *alarX-iv*: 1510.06919v1(2015).

[11]. C. Berger et. al. Touch-mode capacitive pressure sensor with graphene-polymer heterostructure membranem // *2D Mater.*: 5, p. 015025 (2018).

[12]. W.Chen et. al. Structural Engineering for High Sensitivity, Ultrathin Pressure Sensors Based on Wrinkled Graphene and Anodic Aluminum Oxide Membrane // *ACS Appl. Mater.* (2017).

[13]. H. Tian et. al. A Graphene-Based Resistive Pressure Sensor with Record-High Sensitivity in a Wide Pressure Range // *Scientific Reports*, 5, p. 8603 (2015).

[14]. Q. Sun et. al. Transparent, Low-Power Pressure Sensor Matrix Based on Coplanar-Gate Graphene Transistors // *Adv. Mater.*, 26, pp. 4735–4740 (2014).

[15]. P. Cataldi et. al. Carbon Nanofiber versus Graphene-Based Stretchable Capacitive

Touch Sensors for Artificial Electronic Skin // Adv. Sci., 5, p. 1700587 (2018).

[16]. Sh. Chen et. al. Recent Developments in Graphene-Based Tactile Sensors and E-Skins // Adv. Mater. Technol., p. 1700248 (2017).

[17]. R. Balabai, A. Solomenko. Flexible 2D layered material junctions // Appl Nanosci (2018) DOI: 10.1007/s13204-018-0709-9.

[18]. Ab initio calculation, <http://sites.google.com/a/kdpu.edu.ua/calculationphysics> (2015).

[19]. R. M. Balabai et. al. Electron structure and dielectric matrix of the model photonic crystals formed by fibers: ab initio calculation // Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies: 13 (4), pp. 707-720 (2015).

[20]. P. Hohenberg, W. Kohn. Inhomogeneous electron gas // Physical review: 136 (3B), B864 (1964).

[21]. W. Kohn, L. Sham. Self-consistent equations including exchange and correlation effects // Physical review: 140 (4A), A1133 (1965).

[22]. D. Hamann, M. Schlüter, C. Chiang. Norm-conserving pseudopotentials // Physical Review Letters: 43 (20) p. 1494 (1979).

[23]. G. Bachelet, D. Hamann and M. Schlüter. Pseudopotentials that work: From H to Pu // Physical Review: B 26 (8), p. 4199 (1982).

[24]. J. Ihm, A. Zunger, M. Cohen. Momentum-space formalism for the total energy of solids // Journal of Physics C: Solid State Physics: 12 (21), p. 4409 (1979).

[25]. M. Payne, M. Teter, D. Allan et. al. Iterative minimization techniques for ab initio total-energy calculations: molecular dynamics and conjugate gradients // Reviews of modern physics: 64 (4), p. 1045 (1992).

[26]. M. Hybertsen, S. Louie. Ab initio static dielectric matrices from the density-functional approach. I. Formulation and application to semiconductors and insulators // Physical Review: 35 (11), p. 5585 (1987).

[27]. J. Ihm, A. Zunger, M. L. Cohen. Momentum – space formalism for the total energy of solids // J. Phys. C. Solid State Phys.: 12, pp.4409-4422 (1979).

Стаття надійшла до редакції 11.08.2018 р.

UDC 538.9

DOI 10.18524/1815-7459.2018.3.140397

PHOTONIC AND ELECTRONIC PROPERTIES OF LATERAL HETEROSTRUCTURES BASED ON FUNCTIONALIZED GRAPHENE UNDER ACTION OF STATIC PRESSURE

R. Balabai, O. Konoval, A. Solomenko

Kryvyi Rih State Pedagogical University, 54 Gagarina Ave., Kryvyi Rih, 50086, Ukraine; Phone: (0564)71-57-31, e-mail: balabai@i.ua, konovaloa@gmail.com, solomenko.anastasiia@gmail.com

Summary

The purpose of this work is to establish the laws of the connection of photonic and electronic properties of lateral heterostructures on the basis of functionalized graphene in relation to the static pressure of the external environment.

Methods of research. The electron density functional and the *ab initio* pseudopotential.

Results of research. Within the framework of the methods of the electron density functional and the *ab initio* pseudopotential, the spatial distributions of the valence electron density, the dis-

tribution of electron states by energies in the valence and conduction bands, dielectric matrices and the macroscopic relative permeability of lateral heterostructures on the basis of functionalized graphene in relation to the static pressure were obtained.

The increase in pressure enhances the covalent C-H bond of functionalized graphene, which manifests itself in increasing the intensity of the density of valence electrons along the bonding directions.

There is an increase in the width of the electronic bandgap of lateral heterostructures when they are compressed to 5%. With further compression (7.5% and 10%) the width of the band gap is sharply reduced, which indicates an increase in the conductive properties of the heterostructures.

The absorption spectrum of heterostructures in the absence of compression for the $E \parallel X$ direction of the vector of transverse polarization of the electric field of the perturbing electromagnetic wave has a peak for waves of length 0.82 nm, which corresponds to the area of soft x-ray. The increase in the environment pressure on the heterostructure surface leads to a shift of the absorption spectrum peaks toward longer waves with decreasing intensity.

For directions $E \parallel Y$ and $E \parallel [X + Y]$ at different pressure values, the peaks of absorption spectrum of heterostructures are in the region of ultraviolet radiation.

The maximum value of the dielectric macroscopic permeability of the heterostructure based on functionalized graphene as a photonic crystal was recorded for the $E \parallel X$ direction of the vector of transverse polarization of the electric field of the perturbing electromagnetic wave.

Conclusions. Lateral heterostructures on the basis of functionalized graphene has the properties of a photonic crystal, which depend on the environment pressure.

Keywords: lateral heterostructure, functionalized graphene, the electron density functional, *ab initio* pseudopotential, electronic band gap, absorption spectrum, static pressure

УДК 538.9

DOI 10.18524/1815-7459.2018.3.140397

ФОТОННІ ТА ЕЛЕКТРОННІ ВЛАСТИВОСТІ ЛАТЕРАЛЬНИХ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВІ ФУНКЦІОНАЛІЗОВАНОГО ГРАФЕНА ПІД ДІЄЮ СТАТИЧНОГО ТИСКУ

Р. М. Балабай, О. А. Коновал, А. Г. Соломенко

Криворізький державний педагогічний університет, пр. Гагаріна, 54, Кривий Ріг, 50086,
Україна; тел.: (0564)71-57-31, e-mail: balabai@i.ua, konovaloa@gmail.com,
solomenko.anastasiia@gmail.com

Реферат

Мета роботи. Встановити закономірності зв'язку фотонних та електронних властивостей латеральних гетероструктур на основі функціоналізованого графена по відношенню до статичного тиску зовнішнього середовища.

Методи дослідження. Функціонал електронної густини та псевдопотенціал із перших принципів.

Результати дослідження. Методами функціоналу електронної густини та псевдопотенціалу з перших принципів, використовуючи авторський код, були отримані просторові розпо-

діли густини валентних електронів, розподіли електронних станів у валентній зоні та зонах провідності, діелектричні матриці та макроскопічні відносні проникності латеральних гетероструктур на основі функціоналізованого графена як фотонного кристалу під дією статичного тиску.

Підвищення тиску посилює ковалентні С-Н зв'язки функціоналізованого графена, що проявляється у збільшенні інтенсивності густини валентних електронів вздовж напрямків зв'язків.

Спостерігається збільшення ширини електронної забороненої зони латеральних гетероструктур при їх стисненні до 5 %. При подальшому стисненні (7,5% та 10%) ширина забороненої зони різко зменшується, що свідчить про посилення провідних властивостей гетероструктур.

Спектр поглинання гетероструктур на основі функціоналізованого графена як фотонного кристалу за відсутності стиснення для напрямку $\vec{E} \parallel \vec{X}$ вектора поперечної поляризації електричного поля збудованої електромагнітної хвилі має пік для хвиль довжиною 0,82 нм, що відповідає області м'якого рентгену. Підвищення тиску зовнішнього середовища на поверхню гетероструктур призводить до зсуву піків їх спектрів поглинання в бік довших хвиль із зменшенням інтенсивності.

Для напрямків $\vec{E} \parallel \vec{Y}$ та $\vec{E} \parallel [\vec{X} + \vec{Y}]$ при різних значеннях тиску піки спектрів поглинання гетероструктур знаходяться в області ультрафіолетового випромінювання.

Максимальне значення діелектричної макроскопічної проникності гетероструктури на основі функціоналізованого графена як фотонного кристалу було зафіксовано для напрямку $\vec{E} \parallel \vec{X}$ вектора поперечної поляризації електричного поля збудованої електромагнітної хвилі.

Висновки. Латеральна гетероструктура на основі періодично функціоналізованого графена має властивості фотонного кристалу, котрі залежать від тиску зовнішнього середовища.

Ключові слова: латеральна гетероструктура, функціоналізований графен, функціонал електронної густини, псевдопотенціал із перших принципів, електронна заборонена зона, спектр поглинання, статичний тиск

СЕНСОРИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ

SENSORS AND INFORMATION SYSTEMS

УДК 004.8

DOI 10.18524/1815-7459.2018.3.142045

ОБРОБКА ДАНИХ СИСТЕМИ ЦИФРОВИХ СЕНСОРІВ ТЕМПЕРАТУРИ З МЕТОЮ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОВИТРАТ «РОЗУМНОГО» БУДИНКУ

Л. С. Монастирський, Я. В. Бойко, О. І. Петришин, В. М. Лозинський

Кафедра радіоелектронних і комп'ютерних систем, факультет електроніки та комп'ютерних технологій, Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. Драгоманова, 50, м. Львів,
oleg.lpml@gmail.com

ОБРОБКА ДАНИХ СИСТЕМИ ЦИФРОВИХ СЕНСОРІВ ТЕМПЕРАТУРИ З МЕТОЮ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОВИТРАТ «РОЗУМНОГО» БУДИНКУ

Л. С. Монастирський, Я. В. Бойко, О. І. Петришин, В. М. Лозинський

Анотація. На основі оптимізаційної обробки даних системи цифрових сенсорів температури з метою зменшення енерговитрат «розумного» будинку запропоновано просту модель енергоощадного замиського будиночка. Модель базується на чисельній оптимізації режимів його функціонування. Розглянуто систему з одним тепловим джерелом (нагрівачем) зі змінною потужністю та з моніторингом зовнішньої та внутрішньої температури в будиночку в часі. Враховано денний та нічний тарифи оплати за електроенергію. На основі цих даних із застосуванням пакету Python розраховано часові діаграми оптимального за оплатою та комфортом нагріву замиського будиночка для режимів відсутності мешканців та для режиму їх постійного проживання. Приведено код програми розрахунку.

Ключові слова: «розумний» будинок, енергоменеджмент, математична оптимізація

DATA PROCESSING SYSTEM OF DIGITAL TEMPERATURE SENSORS IN ORDER TO OPTIMIZE ENERGY COSTS OF SMART HOME

L. Monastyrskii, Ya. Boyko, O. Petryshyn, V. Lozynskii

Abstract. The aim of this work is the development of heat regime management of smart home, which satisfies conditions of comfort and economy. The investigation deals with the problem of minimization of payment of consumed energy for heating of smart home. Saving is possible due to the different power supply tariffs. Cheaper payment was implemented with the use of optimization time diagram of discrete inclusion of heater in different cost of energy tariffs. It was installed values of minimum E_{min} and maximum E_{max} energy possible for house in condition of permanent inclusion of heater. Time step of introduced energy was equal to one hour.

The model of smart house represents system of linear algebraic equations, solution of such give set possible chart options of discrete inclusions of heater. From a set of option was selected the case that answers minimum of payment of heating. It was created the calculation program by Python with using library Pyomo.

The code of program is given in the appendix.

Keywords: smart house, energy management, mathematical optimization

ОБРАБОТКА ДАННЫХ СИСТЕМЫ ЦИФРОВЫХ СЕНСОРОВ ТЕМПЕРАТУРЫ С ЦЕЛЬЮ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОЗАТРАТ «УМНОГО» ДОМА

Л. С. Монастырский, Я. В. Бойко, О. И. Петришин, В. М. Лозинский

Аннотация. На основе оптимизационной обработки данных системы цифровых сенсоров температуры с целью уменьшения энергозатрат «умного» дома предложено простую модель энергосберегающего загородного дома. Модель базируется на численной оптимизации режимов его функционирования. Рассмотрена система с одним тепловым источником (нагревателем) с переменной мощностью и мониторингом внешней и внутренней температуры в домике во времени. Учтены дневной и ночной тарифы оплаты за электроэнергию. На основе этих данных с применением пакета Pyomo рассчитаны временные диаграммы оптимального по оплате и комфорту нагрева загородного дома для режимов отсутствия жителей и для режима их постоянного проживания. Приведен код программы расчета.

Ключевые слова: "умный" дом, энергоменеджмент, математическая оптимизация

Економити електроенергію сьогодні стає дедалі необхіднішою тенденцією, яка допомагає захистити довкілля та заощадити кошти. В останні роки людям вдалося істотно зменшити рівень споживання енергії та ресурсів побутовими приладами [1,2]. Виявляється, що 50% ресурсів спожитих в приватних домогосподарствах припадають на побутові прилади. Якби всі будинки були устатковані сучасними водо- та енергозберігаючими приладами, можна було б зекономити значну частину електроенергії. Тому інженери компаній працюють над розробкою нових енергозберігаючих технологій в побутових приладах, зменшуючи при цьому негативний екологічний вплив і не заощаджуючи на комфорті.

Важливою функцією менеджменту енергетичної системи «розумного» будинку є її оптимізація. Результати оптимізації дають можливість забезпечити одночасно як комфортні умови проживання людей так і мінімізувати грошові кошти, що витрачаються на енергозабезпечення «розумного» будинку. Сучасні «розумні» будинки можуть проводити енергетичний менеджмент в режимі реального часу при умові застосування адекватних математичних моделей та їх розрахунків, тобто розв'язку задач оптимізації як по зоні температурного комфорту, так і по мінімізації грошових витрат.

Запропонована нами модель передбачає наявність одного нагрівника з регульованою потужністю ($q_{min} \div q_{max}$) з двома тарифами на оплату, нічним і денним, які відрізняються в 2 рази.

Передбачається створення комфортних умов в будинку ($T_1 = T_{min1} \div T_{max1}$) при присутності людей, та $T_2 = (T_{min2} \div T_{max2})$ при відсутності людей в будинку. Передбачено врахування добових змін зовнішньої температури, які задаються щогодини. В роботі враховують тепловтрати, які пропорційні площі конструкції, різниці температур між внутрішнім і зовнішнім повітрям, а також залежність теплових властивостей об'єму повітря і стін, стелі та підлоги будинку: $q_k = q_b - q_e$, де q_b – потужність нагріву батареї, q_k – потужність, що залишилася в кімнаті, q_e

– втрати. Енерговтрати $q_e = S \Delta T/R$, де S – площа конструкції, ΔT – різниця температур всередині та ззовні будинку, R – тепловий опір конструкції.

Виходячи з умов теплового балансу можна розрахувати діаграму нагріву батареї ($q(t)$) при якій забезпечуються задані (комфортні) температурні умови і одночасно оптимізуються (мінімізуються за оплатою) витрати на опалення в умовах активного проживання (1) та відсутності людей в будинку (2). Зовнішні добові температури змінювались від -25°C до $+3^\circ\text{C}$ тепла (рис.1в). Температури змінювались в діапазонах $T_1 = 20 \div 22,5^\circ\text{C}$, $T_2 = 8 \div 10^\circ\text{C}$, відповідно, для робочого та чергового режимів опалення будинку.

Зокрема, в робочому режимі будинку для забезпечення передбачених умов батарея була включена на потужність ~ 20 Вт з 6 до 7 год ранку (Рис. 1а). Тож всередині будинку з 0 до 7 год. температура незначно опуститься, а з 7 до 8 год. підніметься до T_{max} ($22,5^\circ\text{C}$), а далі плавно опуститься до T_{min} (20°C) (рис. 1б).

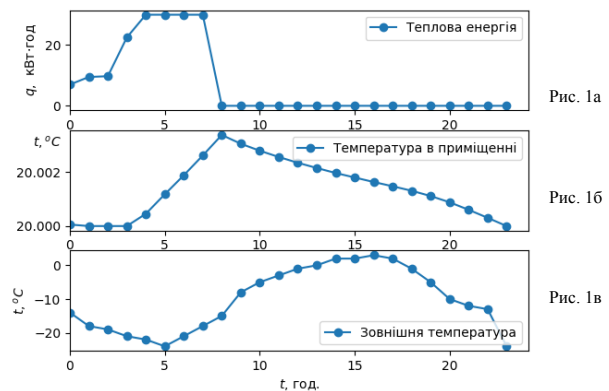


Рис. 1а. Часова діаграма потужності q_b нагрівального елемента в умовах постійного проживання людей.

Рис. 1б. Часовий розподіл температури в будинку, $^\circ\text{C}$.

Рис. 1в. Погодинна температура зовнішнього середовища «розумного» будинку в робочому режимі, $^\circ\text{C}$.

Розрахунки для умов чергового режиму функціонування «розумного» будинку ($8 \div 10^\circ\text{C}$) показали необхідність включення батареї на потужність 12 Вт з 0 до 7 год.,

(при цьому температура в домі росте з $8,0$ до $8,25^{\circ}\text{C}$), а далі - виключення батареї до 21 год. і включення на невелику (2 Вт) потужність на 1 год. о 23 год., щоб температура в домі не впала нижче 8°C (рис. 2а).

При малих значеннях теплопровідності K ($\sim 0,05$) температура в будинку з часом повільно падає і щоб зменшити темп її падіння в інтервалі 6–7 год. ранку включається нагрів, який і забезпечує в будинку температуру, близьку до 8°C до 24 год.

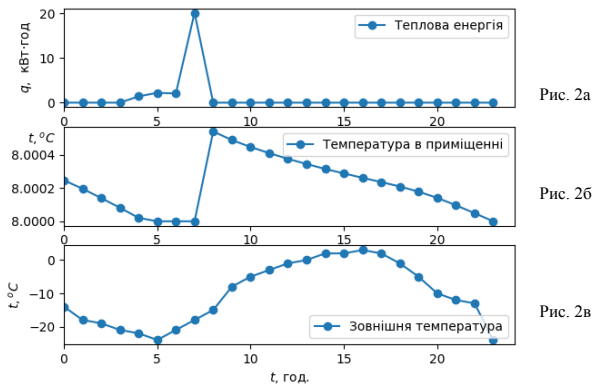


Рис.2а. Розрахунок часової залежності потужності нагріву q_6 «розумного» будинку для чергового режиму функціонування.

Рис. 2б. Розподіл температури всередині будинку в умовах чергового режиму, $^{\circ}\text{C}$.

Рис. 2в. Погодинна температура зовнішнього середовища «розумного» будинку $^{\circ}\text{C}$.

При великих значеннях теплопровідності стін K ($\sim 0,5$) температура в будинку з 0 до 9 год. росте в околі 8°C , а далі до 24 год. повертається до рівня 8°C . Якщо темп падіння температури зашвидкий, то включається невеликий додатковий нагрів в останні години (рис.3).

Таким чином, при кращому утепленні стін і зменшенні втрат тепла через зовнішні конструкції будинку в умовах меншої їх теплопровідності, тривалість включення нагріву є меншою, ніж в протилежному випадку.

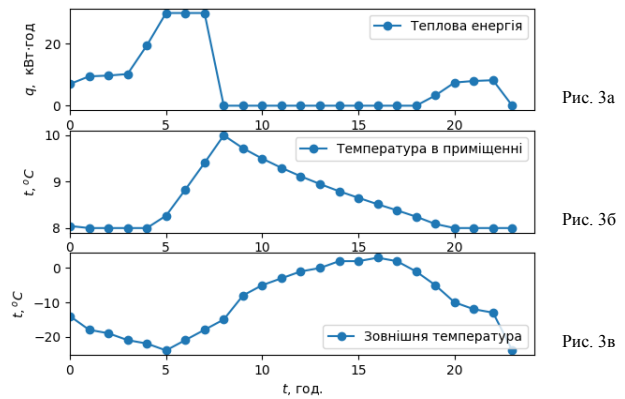


Рис. 3а. Діаграма потужності нагрівника q_6 при високій теплопровідності стін ($K=0,5$).

Рис. 3б. Температурна діаграма всередині «розумного» будинку при високій теплопровідності стін ($K = 0,5$).

Рис. 3в. Погодинна температура зовнішнього середовища «розумного» будинку $^{\circ}\text{C}$.

Висновки

На основі оптимізаційної обробки даних системи цифрових сенсорів температури з метою оптимізації енерговитрат «розумного» будинку запропонована проста модель здешевлення енергозатрат «розумного» будинку, який може працювати як в «робочому» режимі так і в «черговому» режимах (при відсутності людей). Таке функціонування характерне для замських будинків в умовах робочих днів (черговий режим) та святкових (вихідних) днів – робочий режим.

Модель враховує добові зміни зовнішніх температур, а також подвійний тариф на оплату електроенергії. Оптимізовані часові розподіли введеної потужності та температури в будинку при умові мінімальної оплати за електроенергію.

Показано вплив зовнішніх температур та теплофізичних параметрів конструкцій будинку на тепловий баланс, зокрема величин теплоємності та теплопровідності елементів конструкцій «розумного» будинку. При проектуванні реальних систем енергоощаднос-

ті заміського будиночка можна застосувати мікрокомп'ютер типу Raspberry Pi, а також мікроконтролери Arduino, цифрові датчики температури та вологості, радіочастотні модулі зв'язку.

Список використаної літератури

[1]. A. R. Boynuegri, B. Yagciterin, M. Bay-sal. Energy Management Algorithm for Smart House wint Renewable Energy Sources.4 th Internanational Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives., pp.1753-1758, Istambul, 2013.

[2]. Pipattanasomporn M., Kuzlu M., Rahman S. An Algorithm for Intelligent Home Energy Management and Demand Response Analysis, Smart Grid, IEEE Transactions on, vol.3, no.4, pp.2166 - 2173, Dec. 2012.

Стаття надійшла до редакції 15.05.2018 р.

Додаток

```

# One
import math as m
from pyomo.environ import *

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

model = ConcreteModel(name="One")

opt = SolverFactory('glpk')
#opt = SolverFactory('ipopt')
#opt.options['max_iter'] = 10000

#cva =1.23 # kJ/m^3 K
#Va = 50
#cvb = 1.34e3
#Vb = 10.0
#C = cva*Va + cvb*Vb

#k = 0.56 # W/mK
#l = 0.5
#K = k*l
    
```

```

cva = 1.23 # kJ/m^3 K
Va = 150
cvb = 1.34e3
Vb = 20.0
C = cva*Va + cvb*Vb

k = 0.1 # W/mK
l = 0.5
K = k*l

model.t = [i for i in range(24)]

model.P = [1,1,1,1,1,1,1,1,1,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,1]
#model.P = dict(zip(model.t, p))

# 0 1 2 3 4 5
6 7 8 9 10 11 12 13 14
15 16 17 18 19 20 21 22 23
#Text = [-1, -2, -4, -4, -5, -5, -6, -4, -3, -1, 0, 3, 8, 10, 22, 25, 26, 20, 17, 15, 10, 5, 3, 2]
#Text = [-1, -2, -4, -4, -5, -5, -6, -4, -3, -1, 0, 3, 8, 10, 12, 12, 13, 12, 10, 9, 0, 2, 2, 1]
Text = [-14, -18, -19, -21, -22, -24, -21, -18, -15, -8, -5, -3, -1, 0, 2, 2, 3, 2, -1, -5, -10, -12, -13, -24]

Tmin =20.0
Tmax =22.5
qmax = 30
Tbeg =20.0
qbeg = 10.0

model.q = Var(model.t, initialize=qbeg, bounds = (0.0,qmax))
model.T = Var(model.t, initialize=Tbeg, bounds = (Tmin, Tmax))

def obj_rule(model):
    return
    
```

```

sum([model.P[i]*model.q[i] for i
in model.t])

model.o = Objective(rule=obj_
rule, sense=minimize)

eps = 1e-6
def cntrl(model, i):
    if i!=0:
        return (C*(model.T[i]
- model.T[i-1]) == (model.q[i-1]
+ K*(Text[i-1] - model.T[i-1])))
    else:
        return (C*(model.T[i] -
Tbeg) == (model.q[0] + K*(Text[i]
- Tbeg)))

def cntrn(model, i):
    if i!=0:
        return abs( C*(model.T[i]
- model.T[i-1]) - (model.q[i-1]
+ K*(Text[i-1] - model.T[i-1])))
<=eps
    else:
        return abs( C*(model.T[i]
- Tbeg) - (qbeg + K*(Text[i] -
Tbeg))) <=eps

def cntr(model, i):
    if i!=0:
        dif = C*(model.T[i] -
model.T[i-1]) - (model.q[i-1] +
K*(Text[i-1] - model.T[i-1]))
        else:
            dif = C*(model.T[i]
- Tbeg) - (qbeg + K*(Text[i] -
Tbeg))
        if dif >= 0.0:
            return dif <= eps
        else:
            return -dif <= eps

    #return C*(model.T[i] -
model.T[i-1]) == model.q[i-1] +
K*(Text[i-1] - model.T[i-1])
    #a[i] * model.y[i] >= b[i]
    model.constr
Constraint(model.t, rule=cntr)
#####
#####
#####
results = opt.solve(model,
tee=True)
results.write()
model.solutions.load_
from(results)

tml = []
ql = []
Tl = []

for v in model.component_
objects(Var, active=True):
    print ("Variable",v)
    #print (type(v))
    varobject = getattr(model,
str(v))
    for index in varobject:
        if str(v) == 'q':
            tml.append(index)
            ql.append(varobject[index].
value)
        else:
            Tl.append(varobject[index].
value)
            print (" ",index,
varobject[index].value)

print(tml, ql, Tl)

ta = np.array(tml)
qa = np.array(ql)
Ta = np.array(Tl)

fig = plt.figure()

plt.subplot(3, 1, 1)
plt.plot(ta, qa, '-o')

plt.subplot(3, 1, 2)
plt.plot(ta, Ta, '-o')

plt.subplot(3, 1, 3)
plt.plot(ta, np.array(Text),
'-o')

fig.savefig('t3.png')

```

DATA PROCESSING SYSTEM OF DIGITAL TEMPERATURE SENSORS IN ORDER TO OPTIMIZE ENERGY COSTS OF SMART HOME

L. Monastyrskii, Ya. Boyko, O. Petryshyn, V. Lozynskii

Chair of Radioelectronic and Computer Systems,
Department of Electronics and Computer Technologies,
Ivan Franko National University of Lviv
50 Dragomanova Str., Lviv 79005, Ukraine
oleg.lpml@gmail.com

Summary

The purpose of the work was to create a mathematical model of energy management of the «smart» house and to optimize the calculation of such a model based on experimental data arrays of digital temperature sensors both inside and outside the house. The initial conditions should ensure comfortable conditions in the house (the temperature does not exceed the specified interval) minimize payment for the consumed electricity, taking into account the existence of daily and night rates. At the same time, hourly changes in the outside temperature of the building and the value of the thermal and physical parameters of the building structures were taken into account.

In the process of calculations the thermal balance equation with the optimization of energy consumption through the Pyomo package was solved. The objects of modeling were devices of universal heating, ventilation and air conditioning (HVAC). The GNU Linear Programming Kit (GLPK) package was used as a solver. GLPK implements the Karush-Kuhn-Tucker optimal conditions in the process of solving optimization problems of linear programming.

As a result of calculations it was obtained the time (daily) diagrams of heater capacity, which provide comfortable living conditions and the minimum payment for the consumed electricity. Such time charts can be used for the programming of autonomous heating and air conditioning systems, the algorithm of which will be determined by the averaged data of the temperature indices of the environment, and the adjustment of operating modes will be carried out only at significant deviations from the predicted values. Such an approach provides for simplification of the life-support systems management algorithm in complex systems of a «smart» house. Another scenario of using the results can be the periodic recalculation of the operating modes of devices based on continuous monitoring of temperature indices. In the proposed model, it is possible to integrate algorithms of intellectual data analysis, in particular, forecasting on the basis of neural networks technologies.

The program for forming a model in terms of the Pyomo package created by the Python language is given.

Keywords: smart house, energy management, mathematical optimization

УДК 004.8

DOI 10.18524/1815-7459.2018.3.142045

ОБРОБКА ДАНИХ СИСТЕМИ ЦИФРОВИХ СЕНСОРІВ ТЕМПЕРАТУРИ З МЕТОЮ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОВИТРАТ «РОЗУМНОГО» БУДИНКУ

Л. С. Монастирський, Я. В. Бойко, О. І. Петришин, В. М. Лозинський

Кафедра радіоелектронних і комп'ютерних систем, факультет електроніки та комп'ютерних технологій, Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. Драгоманова, 50, м. Львів,
oleg.lpml@gmail.com

Реферат

Метою роботи було створення математичної моделі енергоменеджменту «розумного» будинку та проведення оптимізаційного розрахунку такої моделі на основі експериментальних масивів даних цифрових датчиків температури як всередині, так і ззовні будинку. Вихідними умовами було забезпечення комфортних умов в будинку (температура не виходить за заданий інтервал) та мінімізації оплати за спожиту електроенергію, враховуючи існування денного та нічного тарифів. При цьому враховувались погодинні дані зміни зовнішньої температури будинку та значення теплофізичних параметрів конструкцій будинку.

У процесі розрахунків розв'язували рівняння теплового балансу з оптимізацією енергозатрат з допомогою пакету Pyomo. Об'єктом моделювання були універсальні прилади нагрівання, вентиляції та кондиціонування повітря (HVAC). В якості солвера було використано пакет GNU Linear Programming Kit (GLPK). GLPK реалізує оптимальні умови Karush-Kuhn-Tucker в процесі розв'язку оптимізаційних задач лінійного програмування.

У результаті розрахунків отримано часові (добові) діаграми потужностей нагрівників, які забезпечують комфортні умови проживання та мінімальну оплату за витрачену електроенергію. Такі часові діаграми можуть бути використані для програмування автономних систем опалення та кондиціонування, алгоритм функціонування яких буде визначатися усередненими даними температурних показників зовнішнього середовища, а коректування режимів роботи здійснюватиметься лише за значних відхилень від прогнозованих значень. Такий підхід забезпечує спрощення алгоритму керування системами життєзабезпечення в складних системах «розумного» будинку. Інший сценарій використання результатів може полягати в періодичному перерахунку режимів роботи пристроїв на основі неперервного моніторингу температурних показників. У запропоновані моделі можна легко інтегрувати алгоритми інтелектуального аналізу даних, зокрема, прогнозування на основі нейромережних технологій.

Приводиться програма формування моделі в термінах пакету Pyomo, створена мовою Python.

Ключові слова: «розумний» будинок, енергоменеджмент, математична оптимізація

СЕНСОРИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ

SENSORS AND INFORMATION SYSTEMS

PACS 93.85.+q

DOI 10.18524/1815-7459.2018.3.142046

EXPANDING THE BANDWIDTH OF A SEISMIC SENSOR

V. Zhukovskiy¹, A. Gokhman¹, and L. Vilinska²

¹ South Ukrainian National Pedagogical University, Odessa, 65020, Ukraine

²Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa, 65029, Ukraine

EXPANDING THE BANDWIDTH OF A SEISMIC SENSOR

V. Zhukovskiy, A. Gokhman, and L. Vilinska

Abstract. If we reduce technologically the frequency of natural oscillations of the pendulum of a seismic sensor below 1 Hz, then its performance characteristics become unacceptable. It is shown that by adjusting of the transfer function of the seismic sensor by the transfer functions of the typical dynamic units, a horizontal platform can be obtained in the low frequency region of the amplitude-frequency characteristic. An equation of a proportional-integral-differential controller in a discrete form is proposed in which a feedback signal is calculated using the STM32 microcontroller. Application of the modern microcontrollers to generate a feedback signal allows to flexibly adjust the frequency response of a seismic sensor by directly selecting weight factors, as well as making it remotely tuned. Such a solution combined with the proposed optical method of converting mechanical vibrations into electric allows achieving a high degree of miniaturization of the oscillatory system and obtaining a high level of signal-to-noise ratio of the hardware part.

Keywords: seismic sensor, transfer function, bandwidth, signal / noise ratio

РОЗШИРЕННЯ СМУГИ ПРОПУСКАННЯ СЕЙСМІЧНОГО СЕНСОРА

В. К. Жуковський, О. Р. Гохман, Л. М. Вілінська

Анотація. Технологічне зниження частоти власних коливань інертної маси сейсмічного сенсора нижче 1 Гц призводить до неприпустимого зниження експлуатаційних якостей приладу. У даній роботі показано, що коректуючи передавальну функцію сейсмічного сенсора передавальними функціями типових динамічних ланок, в низькочастотній області амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) можна отримати горизонтальну ланку. Авторами пропонується рівняння пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора в дискретному вигляді, по якому за допомогою мікроконтролера STM32 розраховується сигнал зворотного зв'язку. Використання сучасних мікроконтролерів для генерації сигналу зворотного зв'язку дозволяє гнучко коригувати АЧХ сейсмічного сенсора за рахунок безпосереднього підбору вагових коефіцієнтів, а також дистанційно його налагоджувати. Таке рішення в поєднанні з запропонованим оптичним способом перетворення механічних коливань в електричні дозволяє домогтися високого ступеню мініатюризації коливальні системи і отримати високий рівень співвідношення сигнал/шум апаратної частини.

Ключові слова: сейсмічний сенсор, передавальна функція, смуга пропускання, співвідношення сигнал / шум

РАСШИРЕНИЕ ПОЛОСЫ ПРОПУСКАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО СЕНСОРА

В. К. Жуковский, А. Р. Гохман, Л. Н. Вилинская

Аннотация. Технологическое снижение частоты собственных колебаний инертной массы сейсмического сенсора ниже 1 Гц приводит к недопустимому снижению эксплуатационных качеств прибора. В данной работе показано, что корректируя передаточную функцию сейсмического сенсора передаточными функциями типовых динамических звеньев, в низкочастотной области амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) можно получить горизонтальную площадку. Авторами предлагается уравнение пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора в дискретном виде, по которому при помощи микроконтроллера STM32 рассчитывается сигнал обратной связи. Использование современных микроконтроллеров для генерации сигнала обратной связи позволяет гибко корректировать АЧХ сейсмического сенсора за счет непосредственного подбора весовых коэффициентов, а также производить его удаленную настройку. Такое решение в сочетании с предложенным оптическим способом преобразования механических колебаний в электрические позволяет добиться высокой степени миниатюризации колебательной системы и получить высокий уровень соотношения сигнал/шум апаратной части.

Ключевые слова: сейсмический сенсор, передаточная функция, полоса пропускания, соотношение сигнал / шум

Introduction

The development of broadband low-frequency seismic sensors is limited by a problem in providing low natural frequency of the moving mass. If the natural frequency is below 1 Hz it is necessary to use a pendulum locking mechanism for moving the device. Additionally the temperature instability in the pendulum positioning increases, the overall mechanical reliability of the seismometer decreases. Presently, natural frequency of 1 Hz is the lower limit value for seismic sensors because its subsequent reduction yields unacceptable reduction in device performance.

The present study is focused on the approaches to expand the seismometer bandwidth, and examines the ways to improve its performance.

Device Operation Principle

The operation principle of any seismometer from the most ancient to the most modern is similar [1-4]. The main element of the device is a mass pendulum suspended on the bottom part of the device. Ideally, the pendulum should have no mechanical or electromagnetic connections with the housing. However, it is unrealizable in the Earth’s gravity conditions. The housing of the seismometer is rigidly connected with the soil, and therefore begins to move due the ground motion, and due to the mass inertia properties the pendulum should not move.

In seismic sensors are often used pendulums with swing center being in rest or delay relative to the earth surface movement. The rest degree of the seismometer swing center characterizes its performance and is determined by the ratio of the ground motions period T_G to that of the seismometer pendulum natural oscillations T_0 . If $T_G / T_0 \ll 1$, the swing center almost does not move and the vibrations are reproduced accurately; if T_G / T_0 is close to 1, the vibrations may be distorted due to resonance; if $T_G / T_0 \gg 1$, when the soil moves very slow, the inertia properties are not evident and the swing center moves almost as a single unit with the ground and does not measure the ground motion.

All characteristics of a seismometer can be derived from the equations of motion of its mechanical parts [1]:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\varepsilon \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = -K \frac{d^2\xi}{dt^2}, \quad (1)$$

where x is the recorded seismogram, ξ - ground displacement, ε - damping constant, $\omega_0 = 2\pi / T_0$, T_0 - the pendulum natural vibrations period, K - coefficient depending on the structural properties of the seismometer (normal gain).

If the ground motion is a harmonic function $\xi = \xi_0 \cos \omega t$, then the solution of equation (1) has the following form:

$$x = \bar{x} + x_0(\omega) \cos(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

where \bar{x} characterizes the natural vibrations of the pendulum, x_0 - oscillation amplitude in the recording device. It should be noted that parameter \bar{x} depends on the time and at $\varepsilon \geq 1$ \bar{x} it tends rapidly to zero and therefore can be neglected in equation (2). The seismometer sensitivity can be characterized by the frequency dependence of the vibration amplitude:

$$x_0(\omega) = \xi_0 \frac{\omega^2 K}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\varepsilon^2 \omega^2}}. \quad (3)$$

The curve $x_0(\omega) / \xi_0$ (Fig. 1) is called the amplitude-frequency characteristic (AFC) of the seismometer.

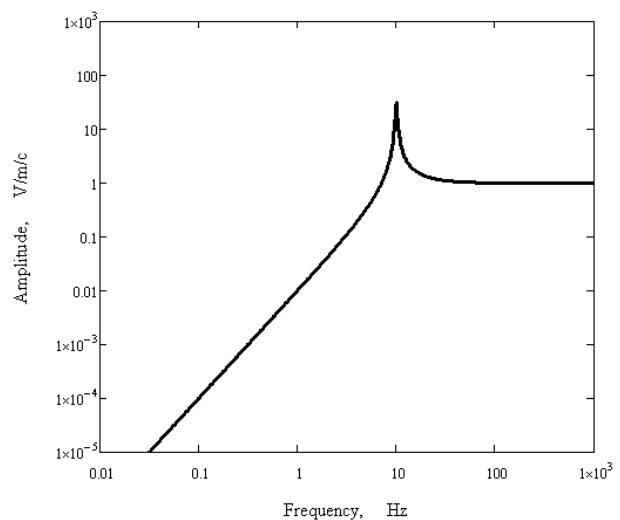


Fig. 1. shows that the seismometer sensitivity decreases exponentially for frequency values below the resonance one.

A universal method to decrease the lower limit of the seismometer transmission is to using a reverse filter [5]. For simplicity reasons control theory can be used. To expand the seismometer bandwidth the transfer function (3) should be adjusted by transfer functions of typical dynamic links [6]:

$x_p(\omega) = P$ - transfer function of the proportional gain,

$x_i(\omega) = I / x_0(\omega)$ - transfer function of the integrator,

$x_d(\omega) = D x_0(\omega)$ - transfer function of the differentiator,

P, I, D - weighting coefficients.

The adjusted transfer function $X(\omega)$ is:

$$X(\omega) = x_0(\omega) + x_p(\omega) + x_i(\omega) + x_d(\omega). \quad (4)$$

The AFC of the corrected seismometer transfer function is presented in Fig.2 [5].

By changing the coefficients of the typical dynamic links it is possible to obtain the desired transfer function of the seismometer.

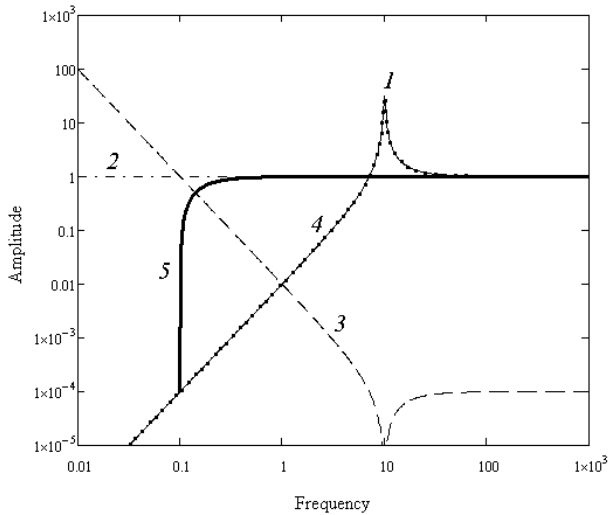


Fig. 2. The AFC 1 – of inertial mass 2 - of proportional gain, 3 - of integrator, 4- of differentiating link (the corresponding line in the figure coincides with 1) 5 - of seismometer.

Fig. 3 is a block diagram of a wideband feedback seismometer, which comprises a proportional, integral and differential regulation unit.

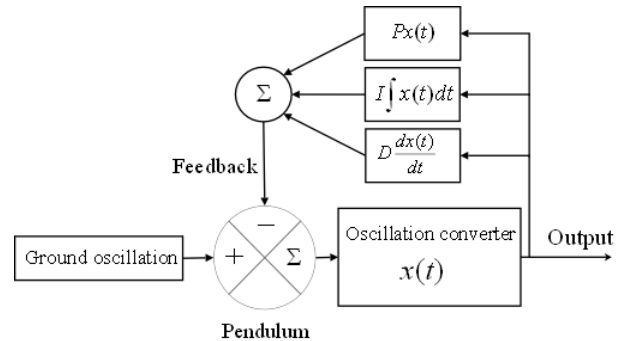


Fig. 3. Block diagram of a broadband seismometer.

A regulator, comprising the above mentioned units is called PID regulator. The feedback control equation in this case takes the following form:

$$U(t) = Px(t) + I \int_0^t x(t) dt + D \frac{dx(t)}{dt}. \quad (5)$$

Parameter K in equations (1) and (3) could depend on frequency. For example, electromotive force of induction is a function of frequency and goes to zero at low frequencies for converting the electrodynamic method. Therefore for design of low-frequency seismic sensors in the following ways can be used to exclude such effect:

- varying the capacity by changing the distance between the plates;
- varying the coil's inductance by adding a core;
- changing the photocurrent conduction at photodiode illumination.

Note that optical recording method of vibration is most protected from interference. This method has a proven itself in atomic force microscopy. Successful results of using laser interferometric seismic sensors are known [7, 8]. These seismic sensors have high sensitivity and are relatively simple, but their drawback is a laser which has a short lifetime (about 10000 hours) and requires complex temperature stabilization. High power consumption of seismic sensors cause's additional problems in case of autonomous power supply. Converters using

optocouplers (light emitting diode / photodiode) are less sensitive to swings of the pendulum. Moreover, their lifetime is 10 times longer; they are more economical and require no additional circuitry of the temperature and the current stabilization. Signal / noise ratio in optical transducer is much higher than that of the capacitive and inductive.

A method for calculating the integrator and differentiator to adjust the frequency response of seismic sensors assembled on analog chips is proposed [5]. However, modern microcontrollers allow avoiding the analog control by adjusting the frequency response coefficients directly in equation (5), which in discrete representation looks as follows:

$$U(t) = Px(t) + I \sum_i \left[\frac{x(t_i) + x(t_{i-1})}{2} \right] \Delta t + D[x(t + \Delta t) - x(t - \Delta t)] / 2\Delta t, \quad (6)$$

where Δt – time between subsequent measurements.

The operating principle of the digital seismometer (Fig. 4) is that the transmitter signal by analog-to-digital converter (ADC) is digitized and the control signal is calculated according to Eq. (6). Control signal generator with a pulse width modulation (PWM) is applied directly to an electromagnetic feedback coil.

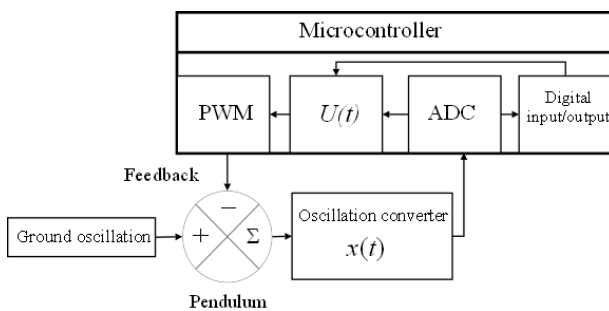


Fig. 4. Block diagram of a digital seismometer.

The digital input / output interface allows setting the seismometer by entering weighting coefficients and receiving a digital signal for data recording and visualization.

Obviously, this approach significantly simplifies the calibration procedure and allows remote configuration of the seismometer distantly using digital communications and the Internet.

Discussion

There are many reasons to create over miniature digital broadband seismic sensors. Just based on ARM micro STM32F3 line it is possible to create a digital seismometer with a 90 dB dynamic range. When used with optical mapping technique, requiring no powerful magnet and a coil, such a device may be less than a matchbox, along with batteries and wireless digital communication means.

This miniaturization of devices allows solving a number of problems, like:

- decreasing the measurement equipment cost due to lower material consumption;
- reducing the cost of installing seismic sensors by stowing smaller diameter wells;
- delivery of equipment to remote places by unmanned aerial vehicles;
- creating systems for seismic spectrum images recognition, etc.

Conclusions

The most effective way to expand the range of seismic sensors is the method of adjusting the frequency response by the feedback.

Using an optical method for converting seismic signals into mechanical allows high degree of oscillating system miniaturization and enables to get the highest level of signal / noise ratio of hardware.

The use of modern microcontroller to generate the feedback signal allows higher flexibility in adjusting the frequency response of a seismometer by a more convenient selection of weights and enables to perform remote configuration.

The work was carried out within the framework of the state budget topic on the order of the Ministry of Education and Science of Ukraine

Bibliography

- [1]. Berlage Jr., H. P., 1932. Seismometer, vol. 4 of Handbuch der Geophysik (ed. B. Gutenberg), chap. 4, pp. 299 - 526. Gebrueder

Borntraeger Verlag, Berlin.

[2]. A. V. Rykov. K probleme nablyudenij kolebanij Zemli. Apparatura, metody i rezul'taty sejsmometricheskikh nablyudenij. M., "Nauka", Sb. "Sejsmicheskie pribory", vyp. 12, 1979 g.

[3]. Wieland E., Streckeisen G. The leaf-spring seismometer – design and performance // Bull. Seismol. Soc. Amer., 1982. Vol. 72. P.2349-2367.

[4]. Wielandt, E., 1983. Design principles of electronic inertial seismometers. In Earthquakes: Observation, Theory and Interpretation, pp. 354-365. LXXXV Corso, Soc. Italiana di Fisica, Bologna.

[5]. Havskov J., Alguacil G. Instrumentation in Earthquake Seismology / Modern Ap-

proaches in Geophysics. Springer Academic Publishers. 2002. P. 313.

[6]. Senigov P. N. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: Konspekt lekcij. – Chelyabinsk: YUUrGU, 2000 - 93s.

[7]. V. K. Zhukovskiy, E. V. Karyagin, A. Yu. Popov. Application of an electrooptical converter of mechanical vibrations with a holographic optical element in seismometry // Technical Physics, 2010, Volume 55, Number 4, pages. 532-536.

[8]. M. A. Zumberge, J. Berger, E. Wielandt Optical Seismometer. Pub. No.: US 2012/0247213 A1, Pub. Date: Oct. 4, 2012.

Стаття надійшла до редакції 12.06.2018 р.

PACS 93.85.+q

DOI 10.18524/1815-7459.2018.3.142046

EXPANDING THE BANDWIDTH OF A SEISMIC SENSOR

V. Zhukovskiy¹, A. Gokhman¹, and L. Vilinska²

¹ South Ukrainian National Pedagogical University, Odessa, 65020, Ukraine

² Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa, 65029, Ukraine

Summary

Sensitivity of seismic sensors to oscillations, whose frequency is lower than the frequency of natural oscillations of its inert mass, decreases exponentially. The technological reduction of the natural frequency below 1 Hz results in an unacceptable decrease of the device performance characteristics.

The main goal of this work was to investigate the possibility of improving the amplitude-frequency response (AFC) of sensor by introducing of a special type of feedback.

Experimental and theoretical methods of investigation were used. By selecting typical dynamic interrelations and weights in the MATCAD environment, an equation was obtained that provides the generation of a feedback signal. For the experimental model of an optical seismic sensor, whose natural oscillation frequency is about 10 Hz, the input signal was added with this signal.

Results of the study. It is found that solving of a feedback equation using a microcontroller and mixing this signal by means of pulse width modulation with an input signal provides the substantially simplify of the technology of manufacturing of seismic sensors.

Conclusions. By combining a direct solution of the equation to generate a feedback signal with an optical method of converting mechanical oscillations to electrical ones, seismic sensors with a high degree of miniaturization can be obtained by eliminating massive inductors and permanent magnets. Miniaturization of devices allows solving a set of problems:

- Reduction of the measuring equipment due to the lower consumption of materials;
- Reducing the cost of installing seismic sensors due to the smaller diameter of the filling wells;
- Delivery of equipment to hard-to-reach places by unmanned aerial vehicles;
- The creation of reconnaissance and signal systems with the recognition of seismic images from the spectrum of seismic vibrations, etc.

Keywords: seismic sensor, transfer function, bandwidth, signal-to-noise ratio

PACS 93.85.+q

DOI 10.18524/1815-7459.2018.3.142046

РОЗШИРЕННЯ СМУГИ ПРОПУСКАННЯ СЕЙСМІЧНОГО СЕНСОРА

В. К. Жуковський¹, О. Р. Гохман¹, Л. М. Вілінська²

¹ Південноукраїнський національний педагогічний університет ім. К. Д. Ушинського, Одеса, 65020, Україна

² Одеська державна академія будівництва і архітектури, Одеса, 65029, Україна

Реферат

Чутливість сейсмічних сенсорів до коливань, частота яких нижче частоти власних коливань його інертної маси, експоненціально зменшується. Технологічне зменшення власної частоти нижче 1 Гц призводить до неприпустимого зниження експлуатаційних характеристик приладу.

Метою даної роботи було дослідження можливості поліпшення амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) сенсора за рахунок введення зворотного зв'язку спеціального вигляду.

Застосовувалися експериментально-теоретичні *методи дослідження*. Шляхом підбору типових динамічних ланок та вагових коефіцієнтів в середовищі MATCAD, отримано рівняння, яке дозволяє генерувати сигнал зворотного зв'язку. Для експериментальної моделі оптичного сейсмічного сенсора, у якого частота власних коливань близько 10 Гц, вхідний сигнал складався з цим сигналом.

Результати дослідження. Показано, що рішення рівняння зворотного зв'язку за допомогою мікроконтролера і змішування цього сигналу, за допомогою широтноімпульсної модуляції, з вхідним сигналом дозволяє істотно спростити технологію виготовлення сейсмічних сенсорів.

Висновки. Поєднуючи підхід безпосереднього вирішення рівняння для генерації сигналу зворотного зв'язку з оптичним способом перетворення механічних коливань в електричні можна отримати сейсмічні сенсори з високим ступенем мініатюризації за рахунок відмови від масивних котушок індуктивності і постійних магнітів. Мініатюризація приладів дозволяє вирішити цілий ряд проблем:

- здешевлення вимірювального обладнання за рахунок меншої витрати матеріалів;
- зменшення витрат на установку сейсмічних сенсорів за рахунок меншого діаметра закладних свердловин;
- доставка обладнання до важкодоступних місць безпілотними літальними апаратами;
- створення розвідувально-сигнальних систем з розпізнаванням сейсмічних образів по спектру сейсмічних коливань і т. п.

Ключові слова: сейсмічний сенсор, передавальна функція, смуга пропускання, співвідношення сигнал / шум

**ВАЛЕНТИНУ АНДРІЙОВИЧУ
СМИНТИНІ – 70!**

*8 вересня 2018 р. виповнюється 70 років від дня народження зав. кафедрою експериментальної фізики Одеського національного університету імені І. І. Мечникова, керівника фізико-технічного центру НАН України та МОН України, радника ректора ОНУ імені І. І. Мечникова, доктора фізико-математичних наук, професора, заслуженого діяча науки і техніки України, лауреата Державної премії України в галузі науки і техніки
СМИНТИНИ ВАЛЕНТИНА АНДРІЙОВИЧА*



По закінченню з відзнакою фізичного факультету і аспірантури Одеського державного університету імені І. І. Мечникова В. А. Сминтина з 1974 р. до теперішнього часу постійно працює там науковим співробітником, заступником декана фізичного факультету з наукової роботи, проректором (1992-1995) та ректором (1995-2010). Під його керівництвом ОНУ здобуває статус національного (2000 р.), нагороджений Почесною Грамотою Кабінету Міністрів України (2000 р.) та посів перше місце у рейтингу класичних університетів (2005 р.).

В. А. Сминтина – відомий і авторитетний фізик, праці якого визнані в Україні та за її межами. Він є автором 15 наукових монографій (6 без співавторів), понад 300 статей у

провідних закордонних виданнях (30 без співавторів), 38 авторських свідоцтв та патентів (7 без співавторів) та 15 підручників (7 без співавторів), рекомендованих МОН України. Всього наукових публікацій понад 700.

Основні наукові результати отримані В. А. Сминтиною в області фізики поверхневих явищ та сенсорики при дослідженні поверхні плівок, шарів, складних макро-, мікро- та нанопоруватих структур і квантових точок напівпровідників. Він розв'язав принципово важливу фізичну проблему цілеспрямованого впливу на адсорбційні властивості поверхні; розвинув теорію універсального визначення адсорбційної чутливості матеріалів, методів її прогнозування і формування. Вперше запропонував метод елементної діагностики складу поверхні, який базується на результатах взаємодії між біографічними та адсорбованими атомами поверхні. Виявив новий тип неоднорідності на поверхні – хемосорбційно-електричний домен, який відповідає за комплекс вперше ним вивчених поверхневих явищ: хемосорбційно стимульовані коливання струму, від'ємний диференційний опір та насичення ВАХ, сенсibilізація та десенсibilізація поверхні як наслідок хемосорбційної генерації і розпаду центрів фоточутливості. Вперше встановив фізичний механізм невідтворюваності властивостей поверхні плівок A_2B_6 , розробив й впровадив методику управління їх адсорбційними властивостями, розкрив фізичні закономірності немонотонної пошарової зміни хімічного складу їх поверхні, зробив вагомий внесок у розвиток фізичних основ процесів формування кластерних та сіткових структур нестехіометричних поверхневих атомів, запропонував експрес-методи встановлення природи як центрів адсорбції, так й адсорбованих частинок на поверхні. Ним створено і передано замовникам серію нових адсорбційно чутливих елементів. Цей комплекс робіт, разом з іншими, відзначений у 2007 р. Державною премією України з науки і техніки.

В результаті досліджень явищ на поверхні та на межі розділу під керівництвом

В. А. Сминтини отримані принципово нові наукові результати стосовно поверхневих ефектів, встановлені фізичні механізми направлено формування функціональних параметрів поверхні епітаксціальних структур мікро- і наногетеропереходів, квантових точок в їх складі; створені нові гетеросистеми реєстрації зображення; розвинуто теорію переносу заряду в неідеальних гетероструктурах.

В результаті аналізу й моделювання поверхневих електронно-молекулярних, електрофізичних процесів під керівництвом В. А. Сминтини створені нові мікроелектронні сенсори для інтелектуальних систем контролю фізичних, хімічних, біологічних та екологічних об'єктів.

В області нанобіофізики складних структур і систем В. А. Сминтиною отримані вагомні наукові результати, що є значним внеском у розвиток досліджень нанобіофізичних сенсорів, наногетеропереходів, наноламінітів, нанострижнів, нанодротів та інших структур. У створених за новою розробленою під його керівництвом технологією нанобіофізичних сенсорах встановлено механізм взаємодії квантових точок CdS з біологічною матрицею, в якій вони виконують роль трансдюсера неелектричного сигналу у фотолюмінісцентне випромінювання, визначена роль нанооболонки ZnS на нанокристалах CdS та встановлено її значення у формуванні їх сенсорних властивостей у складі наногетеропереходу ZnS-CdS. Квантові точки CdS та нанооболонка ZnS виготовлені за розробленою під його керівництвом новітньою технологією.

Під керівництвом В. А. Сминтини розроблена нова технологічна платформа та на її основі виготовлені нанобіофізичні сенсорні складні структури на базі наноламінітів (atomic layer deposition), нанострижнів, нанодротів, інших наноматеріалів у вигляді складних композицій AlZnO-TiO₂ та інших оксидів металів. Ним визначені фізичні механізми чутливості складних структур до біологічних об'єктів, зокрема, до лейкозу ВРХ та сальмонели, встановлена природа центрів чутливості створених під його керівництвом нанобіофізичних сенсорів до біологічних субстанцій

як в області екситонної, так й дефектної люмінесценції базових наноструктур. Методами XPS, SEM, AFM та іншими засобами прямих досліджень морфології та елементного складу поверхні нанобіофізичних сенсорів визначено характерні особливості технологічної платформи для їх створення.

За допомогою нового розробленого під керівництвом В. А. Сминтини методу неелектролітичного травлення Si створені оригінальні нано- та мезопоруваті біофізичні сенсори, чутливість яких до біологічних об'єктів підвищена нанесенням на поверхню та в пори Si (10-15 нм) методом atomic layer deposition наночастинок TiO₂.

Методом поверхневого плазмонного резонансу (ППР) визначені адсорбційно чутливі властивості наночастинок SnO₂ та квантових точок Ag. За допомогою ППР встановлені оптимальні розміри квантових точок Ag, які успішно застосовані як складові антисептика та як фактор стимулювання загоєння пошкодженої шкіри.

Найважливіші результати захищені у 10 докторських та багатьох кандидатських дисертаціях, отримали нагороди на міжнародних та вітчизняних виставках, відзначені трьома Державними Преміями України в галузі науки і техніки (2007, 2009 та 2011 рр.).

В. А. Сминтина є визнаним керівником наукової школи з фізики поверхні напівпровідників, яка визначає стан даної галузі на Півдні України і впливає на її розвиток в Україні. Він ефективно керує створеним ним фізико-технічним центром НАН України та МОН України, є головою спеціалізованої ради по захисту докторських дисертацій, заступником голови Наукової Ради з фізики напівпровідників при Президії НАНУ, був віце-президентом Українського Фізичного Товариства, членом Комітету з Державних премій України, заступником Голови Південного наукового центру НАНУ. Завдяки його зусиллям в останні роки Одеський науковий регіон став одним з відомих наукових центрів в галузі фізики, зокрема, фізики наноструктур.

Він головний редактор журналів «Фотоелектроніка», «Сенсорна електроніка та мікро-

системні технології» (входять до наукометричної бази «Index Copernicus») та організатор Всеукраїнського з'їзду «Фізика в Україні», I і III Всеукраїнських конференцій з фізики напівпровідників, восьми Міжнародних конференцій «Сенсорна електроніка та мікросистемні технології», конгресів EUROSENSOR.

В. А. Сминтина створив науково-дослідну лабораторію сенсорної електроніки, відкрив навчально-науковий центр медичної та біологічної фізики, фізико-технічний центр подвійного підпорядкування НАНУ та МОН України, якими успішно керує.

В. А. Сминтина – єдиний від України постійний член відбіркового комітету EUROSENSOR, член Європейського фізичного товариства та Оптичного Товариства Америки, керівник та учасник наукових програм в національних центрах досліджень Італії, Франції, Німеччини, Фінляндії, Португалії та ін., в деяких з них започатку-

вав нові напрямки досліджень в галузі фізики поверхневих явищ. Він ефективно керує роботою українських груп у європейських науково-дослідних програмах FP-6, FP-7.

В. А. Сминтина на високому науковому рівні читає розроблені ним новітні спекурси «Поверхневі явища у напівпровідниках», «Фізико-хімічні явища на поверхні твердих тіл» й «Фотоелектричні процеси у напівпровідниках» та фундаментальні курси «Оптика», «Фізика атома» та «Фізика сенсорів» ефективно керує підготовкою магістрів, аспірантів, докторів філософії і докторантів з фізики поверхні та експериментальної фізики, як запрошений професор читає курси лекцій за кордоном.

Діяльність В. А. Сминтини у галузі науки та освіти відзначена багатьма державними нагородами. Він – заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, кавалер ордену «За заслуги» III ступеня, його нагороджено також Почесними Грамотами Верховної Ради України та Кабінету Міністрів України, Почесними відзнаками НАН України «За наукові досягнення» та «За підготовку наукової зміни», відзнаками МОН України. Валентин Андрійович Сминтина також відзначений нагородами 7 країн світу.

То ж вітаємо Вас, вельмишановний Валентине Андрійовичу з Ювілеєм і зичимо міцного здоров'я, благополуччя, наснаги і подальших творчих успіхів!

Редакція

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 жаргон-

них висловів.

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

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

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

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

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

Рукописи надсилати за адресою:

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

Телефон / факс +38(048) 723-34-61,

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

http://semst.onu.edu.ua

Здійснюється анонімне рецензування рукописів статей.

Правила підготовки рукопису:

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

Авторське право переходить Видавцю.

Титульний аркуш:

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

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

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

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

5. Анотація: до 1000 символів.

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

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

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

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

(чітко сформульована), методи дослідження, результати дослідження (стисло), узагальнення або висновки. Після тексту реферату з абзацу розміщуються ключові слова.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Кожен рисунок повинен бути надрукова-

ний на окремому аркуші і мати розмір, що не перевищує 160x200 мм. Для тексту на рисунках використовуйте шрифт 10pt. Одиниці виміру повинні бути позначені після коми (не в круглих дужках). Усі рисунки повинні бути пронумеровані в порядку їх появи в тексті, з частинами позначеними як (а), (б), і т.д. Розміщення номерів рисунків і напису усередині малюнків не дозволяються. Зі зворотної сторони, напишіть олівцем назву, прізвище(а) автора(-ів), номер малюнка і позначте верх стрілкою.

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

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

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

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

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

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

Відхилені статті не повертаються.

INFORMATION FOR AUTHORS

THE REQUIREMENTS ON PAPERS PREPARATION

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

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

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

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

and conclusions providing the received results essence and their novelty understanding. The authors should avoid the new terms and narrow-profile jargon phrase unreasonable introduction.

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

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

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

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

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

Manuscripts should be sent to:

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

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

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

http://semst.onu.edu.ua

Manuscripts of articles anonymous reviewing is carried out

The manuscript preparation rules:

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

Copyright transfer to the Publisher.

Title Page:

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

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

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

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

5. Abstract: up to 1000 characters.

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

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

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

7. To each copy of the article abstracts in Ukrainian / Russian (depending on language of the original all authors of article), 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 example:

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

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

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

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

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

Each figure should be printed on a separate page and have a size not exceeding 160x200 mm. For text inside figures, use 10pt. Measurement units should be indicated after a comma (not in blankets). All figures are to be numbered in order of its appearance in the text, with sections denoted as (a), (b), etc. Placing the figure numbers and captions inside figures is not allowed. On the backside, write with a pencil the paper title, author(s) name(s) and figure number, and mark the topside with an arrow.

Photographs should be submitted as original prints. Color printing is possible if its cost is covered by the authors or their sponsors.

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

Authors bear full responsibility for irreproachable language make out of the text, es-

pecially 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.

Комп'ютерне верстання – О. І. Карлічук

Підп. до друку 18.09.2018. Формат 60×84/8.
Ум.-друк. арк. 11,39. Тираж 300 пр. Зам. № 1797.

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

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

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