

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

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

SENSOR ELECTRONICS AND MICROSYSTEM TECHNOLOGIES 2017 — VOL. 14, № 2

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 KB № 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 «Dжерело»
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 № 10,*
27, June, 2017

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

СЕНСОРА ЕЛЕКТРОНІКА І МІКРОСИСТЕМНІ ТЕХНОЛОГІЇ 2017 — Т. 14, № 2

Науково-технічний журнал

Заснований 13.11.2003 року.
Виходить 4 рази на рік

УДК 681.586

Засновник Одеський національний
університет імені І. І. Мечникова

За підтримки Українського фізичного товариства
Свідоцтво про державну реєстрацію KB № 8131

Журнал входить до переліку фахових видань
БАК 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 № 10 від 27.06.2017 р.

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

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 (Moscow, Russia)

Yu. O. Gunchenko (Odessa, Ukraine)

A. D'Amico (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)

V. P. Kozemyako (Vinnitsa, Ukraine)

I. A. Kravchenko (Odessa, Ukraine)

E. D. Krushkin (Il'yichevsk, 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)

Редакційна колегія

Головний редактор – **В. А. Сминтина**

Заступник головного редактора – **Я. І. Лепіх**

А. П. Балабан (Одеса, Україна)

відповідальний секретар

О. Є. Беляєв (Київ, Україна)

І. В. Блонський (Київ, Україна)

В. Г. Вербицький (Київ, Україна)

Б. М. Галкін (Одеса, Україна)

Ю. В. Гуляєв (Москва, Росія)

Ю. О. Гунченко (Одеса, Україна)

А. Д'Аміко (Рим, Італія)

Н. Джаффрезік Рене (Ліон, Франція)

С. В. Дзядевич (Київ, Україна)

Г. В. Єльська (Київ, Україна)

В. О. Іваниця (Одеса, Україна)

О. М. Калашніков (Ноттінгем, Велика Британія)

В. П. Кожемяко (Вінниця, Україна)

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. Неізнестний (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)

Науковий редактор випуску

та відповідальний за випуск – **Я. І. Лепіх**

ЗМІСТ

CONTENS

Physical, chemical and other phenomena, as the bases of sensors

Фізичні, хімічні та інші явища, на основі яких можуть бути створені сенсори

V. M. Loktev

THE BASIC SCIENTIFIC ACHIEVEMENTS OF INSTITUTES OF PHYSICS AND ASTRONOMY DEPARTMENT OF NAS OF UKRAINE FOR 2016. THE PLACE AND THE ROLE OF A SCIENCE IN A MODERN SOCIETY AND PROBLEMS OF THE ACADEMY OF SCIENCES REORGANIZATION 5

B. M. Локтєв

ОСНОВНІ НАУКОВІ ДОСЯГНЕННЯ ІНСТИТУТІВ ВІДДІЛЕННЯ ФІЗИКИ І АСТРОНОМІЇ НАН УКРАЇНИ ЗА 2016 Р. МІСЦЕ І РОЛЬ НАУКИ В СУЧАСНОМУ СУСПІЛЬСТВІ І ПРОБЛЕМИ РЕОРГАНІЗАЦІЇ АКАДЕМІЇ НАУК

Yu. O. Kruglyak, M. V. Strikha

MEASURING OF CONDUCTIVITY AND ANALYSIS OF ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF TRANSISTORS WITHIN GENERALIZED MODEL OF ELECTRON TRANSPORT..... 27

Ю. О. Кругляк, М. В. Стріха

ВИМІРЮВАННЯ ПРОВІДНОСТІ Й АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРІВ У РАМКАХ УЗАГАЛЬНЕНОЇ МОДЕЛІ ТРАНСПОРТУ ЕЛЕКТРОНІВ

Ya. M. Olikh, Ya. I. Lepikh

ACOUSTOSTIMULATED "QUASI-CAVITATION" OF VACANCY DEFECTS

IN SEMICONDUCTORS AT THEIR HIGH-ENERGETIC IRRADIATION..... 46

Я. М. Оліх, Я. І. Леніх

АКУСТОСТИМУЛЬОВАНА "КВАЗІКАВІТАЦІЯ" ВАКАНСІЙНИХ ДЕФЕКТІВ У НАПІВПРОВІДНИКАХ ПРИ ЇХ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНОМУ ОПРОМІНЕННІ

Optical and optoelectronic and radiation sensors

Оптичні, оптоелектронні і радіаційні сенсори

V. I. Santoniy, I. A. Ivanchenko, L. M. Budiyanskaya

RESEARCH OF AEROSOL FORMATION INFLUENCE ON OPTICAL LOCATIONAL DEVICES OPERATION 55

B. I. Сантоній, І. О. Іванченко, Л. М. Будіянська

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ АЕРОЗОЛЬНИХ УТВОРЕНЬ НА РОБОТУ ОПТИКО-ЛОКАЦІЙНИХ ПРИСТРОЇВ

Acoustoelectronic sensors

Акустоелектронні сенсори

M. Ya. Seneta, R. M. Peleshchak

INFLUENCE OF ADATOMS DIPOLE-DIPOLE INTERACTION ON THE DISPERSION LAW AND ACOUSTIC PHONON MODE WIDTH OF QUASI-RAYLEIGH WAVE 64

М. Я. Сенета, Р. М. Пелещак

ВПЛИВ ДИПОЛЬ-ДИПОЛЬНОЇ ВЗАЄМОДІЇ АДАТОМІВ НА ЗАКОН ДИСПЕРСІЇ ТА ШИРИНУ АКУСТИЧНОЇ ФОНОННОЇ МОДИ КВАЗІРЕЛЕЄВСЬКОЇ ХВИЛІ

Biosensors

Біосенсори

O. O. Soldatkin, V. O. Prilipko, M. A. Kuibida, I. I. Khomenko, A. P. Soldatkin, S. V. Dzyadevych

DEVELOPMENT OF NEW BIOSENSOR
FOR ARGININE DETERMINATION IN
PHARMACEUTICALS 74

*O. O. Солдаткін, В. О. Приліпко, М. А. Куйбіда,
І. І. Хоменко, О. П. Солдаткін, С. В. Дзядевич*

РОЗРОБКА НОВОГО БІОСЕНСОРА
ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ АРГІНІНУ В
ФАРМАЦЕВТИЧНИХ ПРЕПАРАТАХ

М. В. Стріха. Рецензія

на книгу Джіно Сегре

«Звичайні генії: як два диваки творили
сучасну науку».

Перекл. з англ. О. Гординчук,
Г. Лелів. – Київ, К.І.С., 2017. – 392 с..... 88

Персоналії. До 70-річчя члена-
кореспондента НАН України
Олександра Євгеновича Беляєва..... 91

Інформація для авторів. Вимоги до
оформлення статей у журнал..... 93

Information for contributors. The
requirements on papers preparation..... 96

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 <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.2.106602>

ОСНОВНІ НАУКОВІ ДОСЯГНЕННЯ ІНСТИТУТІВ ВІДДІЛЕННЯ ФІЗИКИ І АСТРОНОМІЇ НАН УКРАЇНИ ЗА 2016 р. МІСЦЕ І РОЛЬ НАУКИ В СУЧАСНОМУ СУСПІЛЬСТВІ І ПРОБЛЕМИ РЕОРГАНІЗАЦІЇ АКАДЕМІЇ НАУК

В. М. Локтєв

ВФА НАН України, e-mail: vfa@nas.gov.ua

ОСНОВНІ НАУКОВІ ДОСЯГНЕННЯ ІНСТИТУТІВ ВІДДІЛЕННЯ ФІЗИКИ І АСТРОНОМІЇ НАН УКРАЇНИ ЗА 2016 р. МІСЦЕ І РОЛЬ НАУКИ В СУЧАСНОМУ СУСПІЛЬСТВІ І ПРОБЛЕМИ РЕОРГАНІЗАЦІЇ АКАДЕМІЇ НАУК

В. М. Локтєв

Анотація. У статті аналізуються результати наукової діяльності інститутів, що входять до складу Відділення фізики і астрономії (ВФА) Національної академії наук України, в світлі світового наукового процесу.

Значна увага приділяється аналізу різного роду проблем діяльності ВФА і Академії в цілому.

Зазначається, що умови наукової діяльності в державі не дають можливості використати все ще існуючий науковий потенціал для більш успішного її розвитку. Пропонується як дискусійні шляхи і заходи організаційного плану різного управлінського рівня які могли б суттєво змінити стан справ у розвитку пріоритетних напрямів науки і використанні науки для ефективного розвитку економіки.

Ключові слова: фізика, фундаментальні дослідження, Академія наук, реорганізація

**THE BASIC SCIENTIFIC ACHIEVEMENTS OF INSTITUTES OF PHYSICS AND
ASTRONOMY DEPARTMENT OF NAS OF UKRAINE FOR 2016.
THE PLACE AND THE ROLE OF A SCIENCE IN A MODERN SOCIETY AND
PROBLEMS OF THE ACADEMY OF SCIENCES REORGANIZATION**

V. M. Loktev

Abstract. In the article results of scientific activity of institutes which are the part of physics and astronomy Department (PhAD) of a National academy of sciences of Ukraine are analyzed, in view of global scientific process.

The significant attention is paid to the analysis of a different sort of problems of PhAD activity and Academy integrally. It is marked, that conditions of scientific activity in the state do not give an opportunity to use still existing scientific potential for its more successful development. As the debatable ways and actions of the organizational plan of a different administrative level, which could essentially change a state of affairs in development of priority science directions and the use of a science for effective development of economy are offered.

Keywords: physics, fundamental researches, the Academy of sciences, reorganization

**ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ ИНСТИТУТОВ ОТДЕЛЕНИЯ ФИЗИКИ И
АСТРОНОМИИ НАН УКРАИНЫ ЗА 2016 г.
МЕСТО И РОЛЬ НАУКИ В СОВРЕМЕННОМ ОБЩЕСТВЕ И ПРОБЛЕМЫ
РЕОРГАНИЗАЦИИ АКАДЕМИИ НАУК**

В. М. Локтев

Аннотация. В статье анализируются результаты научной деятельности институтов, которые входят в состав Отделения физики и астрономии (ОФА) Национальной академии наук Украины, в свете мирового научного процесса.

Значительное внимание отводится анализу разного рода проблем деятельности ОФА и Академии в целом.

Отмечается, что условия научной деятельности в государстве не дают возможности использовать все-ещё существующий научный потенциал для более успешного ее развития. Предлагаются как дискуссионные пути и мероприятия организационного плана разного управленческого уровня, которые могли бы существенно изменить состояние дел в развитии приоритетных направлений науки и использование науки для эффективного развития экономики.

Ключевые слова: физика, фундаментальные исследования, Академия наук, реорганизация

Найважливіші, з нашої точки зору, наукові досягнення підрозділів ВФА, як зазвичай, будуть викладатися у послідовності розташування їх у Довіднику НАН України і базуватимуться на матеріалах, що надали інститути. В Інституті фізики М. В. Бондарем у співпраці з науковцями із США та КНР зроблено внесок у розв'язок проблеми отримання якісних зображень біологічних об'єктів або їхніх окремих елементів, що важливо з точки зору вивчення їхнього функціонування.

Для цього досліджені стаціонарні та часові спектрально-люмінесцентні властивості певної і досить складної органічної молекули бордіпіррометину. Вона відрізняється тим, що має велику ймовірність двофотонного поглинання, високу інтенсивність випромінювання незалежно від способу накачки – шляхом одно- чи двофотонних переходів – та підвищену фотостабільність, що дозволяє її використання у флуоресцентній мікроскопії.

В результаті, вдалося розробити новий органічний суперлюмінесцентний зонд з високою роздільною здатністю для відтворення структури біооб'єктів (рис. 1).

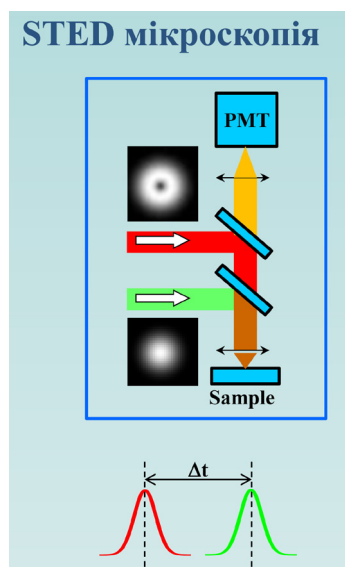


Рис. 1. Суперлюмінесцентний зонд з ефективним двофотонним поглинанням (переріз $\approx 400 \text{ GM}$), високим квантовим виходом флуоресценції (≈ 0.7) та підвищеною фотостабільністю (квантовий вихід фоторозкладу $\approx 10^{-7}$) із надвисокою роздільною здатністю (STED мікроскопії).

Як стверджують автори, на основі фундаментальних досліджень нелінійних оптичних ефектів, притаманних молекулярним комплексам, закладені основи для створення нових приладів, що дають можливість наочно, майже on-line, спостерігати швидкі та надшвидкі процеси, які мають місце у біологічно важливих молекулах.

Найважливішим своїм досягненням за 2015 р. Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова вважає створення і запуск установки, яка об'єднує комплекс методів сучасної нанозондової діагностики фізичних, головним чином, електрофізичних, властивостей поверхонь. Йдеться про електросилову атомну спектроскопію, Кельвін-зонд, а також провідну і ємнісну мікроскопії (рис. 2). Фактично створено інструментарій для супроводу фундаментальних і прикладних досліджень наноструктур та наноструктурованих матеріалів металічного, діелектричного і напівпровідникового характеру.

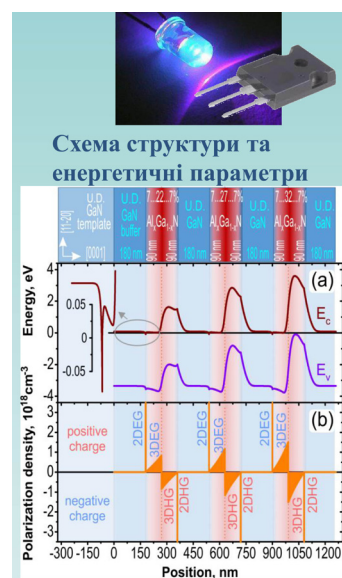


Рис. 2. Зондова мікроскопія для електрофізичної діагностики напівпровідникових наноструктур.

Треба наголосити, що автори під керівництвом П. М. Литвина досліджували конкретно п'єзополаризаційні ефекти в гетероструктурах типу $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$, для чого і потрібні всі ці методи, аби визначити параметри спонтанної п'єзополаризації, що виникають через дефор-

маційні поля, якими, як відомо, можна керувати. Це робилося з метою підбору структур, де електричні поля, що впливають на зонну структуру, локалізовані у певних шарах. Вони ж сприяють чи заважають локалізації носіїв, тобто обумовлюють рівень так званого п'єзолегування. Зі сказаного випливає принципова можливість робити рп-переходи без використання легуючих елементів та отримання матеріалів з покращеними властивостями для різних приладів, що використовують нові підходи.

В Інституті металофізики ім. Г. В. Курдюмова експериментаторами А. О. Краковним, І. В. Короташем на чолі з Е. М. Руденком разом з теоретиком М. О. Білоголовським розглянуті і виміряні деякі ефекти, які стосуються спітронних властивостей металів і сплавів, тобто наряду, що наразі є одним з найпопулярніших у сучасній фізиці твердого тіла, а точніше – мікроелектроніці. Це означає, що сучасна електронна техніка потребує створення нових, що відповідають поставленим задачам.

Одна з основних задач спітроніки – отримання функціональних матеріалів – металів і сплавів або їхніх композицій, у тому числі з діелектриками і напівпровідниками, з високим ступенем спінової поляризації вільних носіїв.

У даному дослідженні вивчалися композитні матеріали, що складаються з нормального феромагнітного металу, роль якого грав нікель, і надпровідника, коли струм протікає з одного в інший (рис. 3).

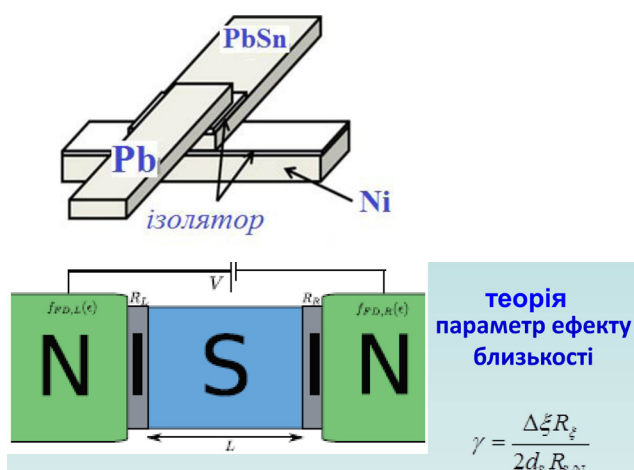


Рис. 3. Аномальний ефект близькості в гетероструктурах Ni/Pb₂Sn-I-Pb.

Як відомо, у таких випадках джерелом незвичайної поведінки є так зване андрєєвське відбиття на межі двох фаз, коли в одному напрямі йде носій, а відбивається дірка або навпаки, причому їхні спіни однозначно зв'язані. Тим самим, у надпровіднику зберігається загальна кількість синглетних куперівських пар, в які об'єднуються електрони з протилежно направленими спінами. Якщо на границі розмістити феромагнетик, а в ньому густина носіїв з різними спінами не однакова, то тим самим можна впливати на проходження струму, бо до різниці цих густин чутливе саме андрєєвське відбиття. Більше того, якщо в ідеалі домогтися 100- відсоткової спінової поляризації у феромагнетик, то можна повністю придушити таке відбиття, або фактично припинити надпровідний транспорт.

У підсумку, вдалося встановити, як змінюється товщина надпровідної області у феромагнітному металі з ростом товщини останнього, яка стає значно більшою за кореляційну довжину, що автори пояснюють виникненням конденсату з новими парами, а саме: триплетними. Причому всі спостереження знайшли задовільний теоретичний опис.

В Інституті теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова кращим у 2016 році визнано результат, отриманий В. І. Засенком, О. М. Черняком і А. Г. Загороднім, який стосується важливої задачі послідовного статистичного опису дифузії в умовах, коли вона спричинюється не парною взаємодією частинок, а їхньою взаємодією з колективними, в тому числі, випадковими збуреннями середовища, роль якого у даному випадку може відігравати плазма, атмосфера, океан тощо (рис. 4).

При цьому при виконанні певних умов на таке розсіяння, викликане згаданою взаємодією, може виникнути так звана аномальна дифузія, швидкість якої уповільнюється за рахунок процесів захоплення частинок у неоднорідному квазістатичному для відносно повільних збурень потенціалі. Зокрема, випадкове електричне поле, в якому дифундують заряджені частинки, часто виникає навіть у лабораторних умовах. Зауважу, що опис аномальної дифузії раніше теж виконувався, але в рамках феноме-

нологічних підходів, а названі автори поставили задачу її вивчення на базі мікроскопічних рівнянь, що, безумовно, є кроком вперед.

Ключовим елементом розв'язку став запропонований метод замикання рівняння для кореляційних функцій, перевагами якого є те, що він не призводить до деякої їхньої нефізичної поведінки на великих часах, простота та відсутність потреби у додаткових підгінних параметрах.



Рис. 4. Фотохромно-чутливий до випромінювання у середній та далекій інфрачервоній областях спектра (більше 4 мкм) плівковий композитний матеріал.

У Головній астрономічній обсерваторії вперше, як зазначається, у світовій практиці визначені розміри та швидкості турбулентних елементів в атмосфері Сонця, а також величина напруженості магнітного поля.

Позаатмосферні спостереження виконувалися спектрополяриметром, що працював на станції Sunrize, дані якої аналізувалися Р. І. Кости́ком і О. В. Хоменко. Використовуючи унікальні властивості нового інтерференційного фільтру, встановленого на німецькому баштовому телескопі, який розташований на іспанському острові Тенерифе, вони розрахували напруженість магнітного поля в активній ділянці Сонячної поверхні. Причому винайшли тип хвиль, які за теорією розповсюджуватися не повинні.

З іншого боку, їм вдалося підтвердити теоретичне передбачення, що кут між напрямками магнітного поля і сили тяжіння такий, що з фотосфери до хромосфери можуть проникати п'ятихвилинні коливання швидкості, які, власне, є переносниками енергії між ними, чим підвищують яскравість деяких ділянок на Сонці, які виявились гарячішими за оточуюче середовище.

В Інституті магнетизму В. Ф. Лосем розглянуто важливу з точки зору застосувань задачу про рух частинки, що взаємодіє з полем деформацій. Фактично йому вперше вдалося отримати розв'язок еволюційних рівнянь на всіх масштабах часу.

Треба зауважити, що ця задача далеко не нова, а про рух, наприклад, полярона ми дещо дізнаємось ще під час навчання в університеті. Справа у тому, що послідовне отримання кінетичних, тобто необоротних, рівнянь, виходячи з оборотної мікроскопічної динаміки багаточастинкової системи, залишається актуальною проблемою статистичної фізики. Традиційно для цього використовується декілька припущень. Головне - факторизація початкового стану системи, яка знаходить своє втілення у наближенні хаотичних фаз, або принципі згасання початкових кореляцій Боголюбова. В основі цих наближень лежить математичне припущення, що на великих минулих масштабах часу початкові кореляції відсутні, і саме це дає можливість отримувати кінетичні рівняння.

Залишається, правда «маленьке» фізичне питання – факторизований початковий стан жодним чином не можна приготувати, бо взаємодія існує завжди. Саме Лосю вдалося обійти це припущення і отримати еволюційне рівняння, яке є справедливим на будь-якому масштабі часу.

Цікаво, що сам Віктор Федорович лише отримував і розв'язував рівняння, не зробивши спробу порівняти їх з експериментом. Але це зробили інші, і нещодавно у Phys.Rev.E з'явилася робота, цитату з якої я навожу: «на відміну від відомих результатів Фейнмана із застосуванням інтегрування по траєкторіях, а також Каданова у наближенні часу релаксації, які не узгоджуються з вимірюваннями низькотемпературної рухомості полярону, її добре описує лише формула Лося». Це дуже приємне визнання для автора, а для нас воно додатково свідчить про рівень результатів української фізики, які не тільки відомі, а й є корисними для інших дослідників і досліджень.

В Інституті прикладних проблем фізики і біофізики В. О. Соколовим і В. М. Сушієм продовжено минулорічні оптичні дослідження

плівкових матеріалів, які можуть застосовуватися для створення інфрачервоних приймачів.

У спеціально створеній плівковій полімерній матриці, що містила метало-комплекси кобальту та міді у певному співвідношенні, виявлено світлопоглинання ІЧ діапазону, яке досить сильно залежить від температури. Осцилограма, що відображає ослаблення та відновлення потужності пробного лазерного випромінювання показує, що на початку експозиції сигнал змінюється лінійно з потужністю. Виміряні часи відновлення чутливості, які становлять секунди.

В МЦ “Інститут прикладної оптики”, як і в попередні роки, вивчалися явища, що супроводжують процеси розпізнавання образів. При цьому на основі висловленої ідеї П. В. Єжова, О. П. Остроуха та О. В. Кузьменка разом з південно-корейським вченим Джин-Таєм Кімом з Чосунського університету (місто Кванджу), була розроблена і втілена у життя процедура відновлення зображення, коли розпізнаванню підлягає не сам об’єкт, а деяка записана фазова структура, яка однозначно з ним пов’язана.

Вони запропонували і перевірили на практиці швидкісний алгоритм такого розпізнавання. Для цього було створене відповідне обладнання, яке дозволяє розраховувати і вимірювати ітераційні Фур’є перетворення, які імітують або кодують той чи інший об’єкт, тобто розв’язали проблему відновлення образу, що й є або розпізнаванням.

У Фізико-технічному інституті низьких температур ім. В. Є. Веркіна експериментально виявлено нове явище – гігантський магніто-п’єзоелектричний ефект, який полягає у дуже великому (більше, ніж у два рази) зростанні п’єзомагнітного модуля в антиферомагнітній фазі рідкісноземельних легкоплощинних фероборатах у порівнянні з його величиною у немагнітній фазі і який зменшується аж до зникнення прикладеним зовнішнім магнітним полем.

Експеримент та його феноменологічний опис досить складні, і я не зупинятимусь на деталях, але важливо, що В. Д. Філю із співробітниками дійсно вдалося шляхом дослідження нерезонансної акусто-електричної трансфор-

мації однієї з граней зразка, який орієнтувався у п’єзоактивному напрямку, створювалася часово-залежна деформація, завдяки чому виникало електричне поле. Воно реєструвалося, причому головний, або швидкий сигнал, який породжується саме поляризаційною компонентою, може бути виділений.

Автори зробили відповідний розрахунок ефекту, виходячи з того, що у магнітно-впорядкованому стані виникає додаткова деформація, яка залежить від напрямку антиферомагнітного вектору в легкій площині і дає внесок у пружну енергію. Зовнішнє магнітне поле може змінювати цей напрямок, за рахунок чого можна здійснювати вплив і на п’єзоелектричний модуль. Викликає подив тільки величина ефекту, і якби не досить мала температура Неся у цих сполуках, відкритий ефект, напевно, міг би застосовуватися.

В Інституті радіофізики і електроніки ім. О. Я. Усикова була розв’язана фундаментальна задача з орієнтацією на конкретну мету, а саме: створити антену з вертикальною поляризацією випромінювання, яке у перпендикулярній площині має ізотропну діаграму спрямованості, а у вертикальній – якомога мінімальні пелюстки.

Така задача перед радіофізиками була поставлена медиками. Ця антена та замовлена її діаграма спрямованості (рис. 5), створена О. Є. Свеженцевим у співавторстві з американськими, китайськими та німецькими фахівцями, з чого ми можемо зробити висновок, що вона, як мінімум, є затребуваною і актуальною.

У Радіоастрономічному інституті у звітному році найважливішою визнано роботу С. В. Степіна і О. О. Коноваленка, пов’язану з відкриттям рекомбінаційних ліній поглинання високозбуджених атомів водню у холодній міжзоряній плазмі. Мова йде про стани з головними квантовими числами 700. Приємно, що це перше спостереження здійснено на українському інструменті - найбільшому у світі радіотелескопі декаметрових хвиль – УТР-2. При цьому досягнута рекордна чутливість, що сягає 10^{-5} .

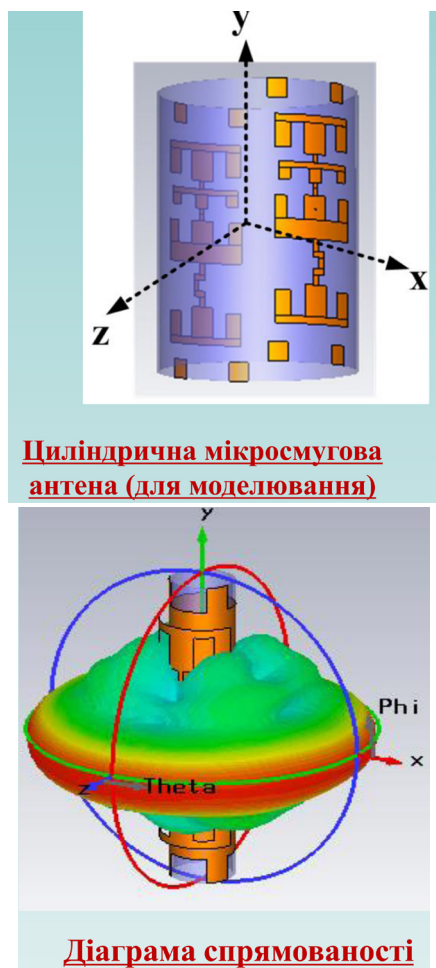


Рис. 5. Широкопasmовова циліндрична антена з ізотропною у горизонтальній площині діаграмою спрямованості.

Висновок наступний: завдяки надійному детектуванню ліній водню, а також раніше відкритих ліній вуглецю, з'являються нові незалежні можливості для вивчення холодної, у тому числі частково-іонізованої, міжзоряної плазми, що важливо для астрофізики, яка вивчає походження і еволюцію Всесвіту.

В Інституті іоносфери у міжнародній співпраці виконувалися дослідження варіацій концентрації термосферного водню. Виявилося, що у зовнішній іоносфері та плазмосфері його вміст аномально високий, що доведено спостереженнями по всій земній кулі за допомогою супутникових систем в період мінімуму сонячної активності.

Фактично було проведене чисельне моделювання процесів, що відбуваються у цих навукоземних поясах, причому використовува-

лися дані щодо висот максимальної іонізації та значень температури електронів, отримані в Інституті іоносфери за допомогою харківського радара некогерентного розсіювання, що усунуло деякі неоднозначності значень параметрів, притаманні іншим моделям.

Головним колектив авторів, очолюваний І. Ф. Домніним, вважає результат, яким теоретично отримано і дано фізичне пояснення зафіксованому дуже високому значенню концентрації електронів, що пов'язано з присутністю в тих же областях аномально великої кількості нейтрального водню, який, на їх думку, є першопричиною посилення потоків плазми між плазмосферою та іоносферою.

У Донецькому фізико-технічному інституті ім. О. О. Галкіна співробітниками відділу фізичного матеріалознавства під керівництвом Т. Є. Константінової створена і запущена пілотна лінія з виробництва оксидних нанопоршків. Її особливістю є те, що вона характеризується удосконаленою системою очистки вихідних хімічних складових, і те, що вона зібрана на площах Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, в якому цей відділ де-факто перебуває.

Ця пілотна лінія спирається на такі технологічні ноу-хау, які дозволяють при виготовленні порошків забезпечувати необхідні властивості поверхні кожної наночастинки, більше того, модифікувати її. Є можливості для створення багатокомпонентних порошків. Закладені в технологію прийоми були перевірені у Польщі шляхом атестації отриманих порошків.

Інститут виграв і виконує два гранти програми Горизонт-2020 Європейського союзу.

В Інституті фізики гірничих процесів Л. І. Стефановичем, Е. П. Фельдманом і А. К. Кириловим проведені теоретичні розрахунки масопереносу флюїдів у вугільних пластах, схильних до метанових викидів, яка спирається на фрактальне рівняння дифузії. Необхідність застосування саме такого рівняння впливала з двох виконаних в інституті серій досліджень – спектроскопічних, та сорбційних, спрямованих на визначення характеру розподілу пор у вугільній речовині. В цілому, розвинута теорія має досить загальний харак-

тер, дозволяє зв'язати між собою ряд важливих вимірюваних параметрів пористої речовини, по якій здійснюється процес дифузії.

В Інституті фізики конденсованих систем А. М. Швайкою разом з німецькими колегами теоретично досліджені можливості резонансного непружного розсіювання рентгенівських променів стосовно прямого визначення сили електрон-пружної взаємодії та її залежності від імпульсу передачі. Якщо зробити відповідні вимірювання, то вони б доповнили дані фотоелектронної емісії з кутовим розділенням та розсіювання нейтронів, тобто методів, які досліджують окремо електронні і пружні кристалічні збудження.

В роботі, про яку йдеться, досліджені прояви і внески фононних мод різної симетрії у переріз розсіювання рентгенівських променів на структурах типу купратних ВТНП сполук з урахуванням їхніх базових елементів - шарів CuO , іонів O^{2-} та різних електронних станів - електронних і діркових - в рамках так званої п'ятизонної моделі. Повний переріз містить внески від неперервних смуг квазічастинкових збуджень, а також однофононні - акустичні та оптичні внески від коливань зв'язків Cu-O та O-O , включаючи коливання апікального кисню. В цілому, розрахунки дають загальну картину прояву різних фононних мод у формі ліній розсіювання, дозволяють визначити їхню температурну залежність та встановити зв'язок фононів із зарядовими флуктуаціями на різних іонах, що складає потенційно нову методику для вивчення деталей електрон-фононної взаємодії у системах з сильною електронною кореляцією.

В Інституті електронної фізики Г. М. Гомонай, Ю. І. Гутичем та О. І. Гомонаєм здійснені дослідження енергетичної залежності ефективного перерізу збудження резонансної лінії $X=143.4$ нм певної оболонки іону свинцю Pb^{2+} , який збуджувався електронним пучком.

Цими вимірюваннями виявлено нову структуру, яку пояснено внеском високо-збуджених атомарних свинцевих станів, який складає до 25%. Отриманий спектр дозволив визначити переріз цього процесу.

Вперше встановлені невідомі раніше числові дані стосовно цієї лінії та механізму її збудження і формування. По-друге, вперше ви-

значено переріз електронного збудження однозарядного іону свинцю - елементу IV-ої групи Таблиці Менделєєва. Нарешті, подібні результати можуть знайти попит при моделюванні астрофізичної плазми, оскільки експериментальні дані, які видають космічні дослідження останнього часу, свідчать на користь досить високої розповсюдженості у галактичному просторі саме свинцю, а досліджена в лабораторних умовах лінія $X=143.4$ нм виявлена також у спектрах кількох зірок нашої Галактики і, що теж цікаво, у міжзоряному просторі.

Отже, ми маємо визнати актуальність, важливість і оригінальність виконаних інститутом досліджень.

На цьому фактично огляд основних конкретних наукових результатів відділення вичерпана. Проте слід додати інформацію де-що загального характеру. Зокрема, про такий приємний факт: роботи наших теоретиків лягли в основу нових програм вимірювань на деяких детекторах Великого адронного колайдеру в ЦЕРНі після того, як він вийшов на повну потужність.

Як ви пам'ятаєте, кілька років тому фізики України, були серед великого колективу авторів знакової публікації, присвяченої першим успішним вимірюванням на цьому найбільшому в світі прискорювачі.

Ми маємо підстави пишатися також подальшим розвитком ГРІД-структури і тим самим обчислювальних можливостей наших установ. З того, що вдалося показати вище, як на мене, видно, що загалом у нас певні досягнення, безумовно, є. Частіше з'являються статті у престижних журналах. Тим не менш, наше відставання у забезпеченні експериментальною технікою дається взнаки, що стало загальною проблемою, коли мова йде про вимірювання, які не усюди і не усім вдається вести за сучасними нормами, тому частину вимірювань за нашими ідеями наші колеги вимушені робити за кордоном. Причини відомі і нічого нового тут сказати неможливо. Водночас, не можу не відзначити, що у ряді напрямів представники наших інститутів, як показано вище, знаходяться серед чільних світових дослідників. Це, безумовно, тішить.

І все ж за традицією дозвольте для порівняння назвати результати, які за рейтингами різних агенцій і журналів, насамперед, «*Science*», визнані цього року за найважливіші у світі. Причому тенденція останніх років називати десятку, в якій 7-8 – це щось з наук про життя або медицини, у цьому році сильно порушена і її замінив єдиний результат - відкриття гравітаційних хвиль.

Нагадаю, що ці хвилі як поширення у просторі зі швидкістю світла коливань метрики простору-часу, які 101 рік тому були передбачені Айнштайном, шукали вже понад 40 років, і серед шукачів були наші співвітчизники, про що я згадував торік.

І ось, очікувана визначна подія не очікувано для переважної маси науковців і, звісно, суспільства сталася 11 лютого 2016 року і розцінена як *неперевершений* прорив року, який знаменує народження нової науки – гравітаційної спектроскопії. Сам Айнштайн розглядав виникнення гравітаційних збуджень як наслідок зміни кривизни простору під дією обертального руху масивних тіл. Сигнал у вигляді сплеску був зареєстрований двома тотожними установками, розташованими у різних американських штатах - Вашингтоні та Луїзіані. Його пояснили зіткненням двох чорних дір, що оберталися навколо одна одної. Відстань до них оцінюється у 1 млрд. 300 млн. світлових років. Цікаво зауважити, що оцінки Айнштайна давали настільки слабку інтенсивність, що сам він ніколи не був упевнений, що остання може бути взагалі виміряна. Тоді він не знав про існування нейтронних зірок та чорних дір і робив обчислення на прикладі зір.

Для детектування використовувалися інтерферометри з довжиною труби 4 км і радіусом 1 м з практично ідеальним вакуумом, між дзеркалами яких бігає лазерний промінь. Ця установка фіксує зміни відстані у трубах порядку 10^{-19} м, що складає 10 діаметру протона, а зафіксувала зсуви порядку 10 м. Важливо, що таку оцінку передбачала й теорія, яка розраховувала наслідки проходження гравітаційної хвилі, що поширюються від певного джерела, і вона ж підтвердилось вимірюванням. Це триумф і фізики, і фізиків. Він ще раз переконливо

продемонстрував надзвичайну потужність науки: передбачали явище і воно спостережене. Причому розраховували дуже складний нелінійний процес злиття чорних дір, який відбувається в умовах величезного викривлення простору. І все виявилось правильним!

Повертаючись до всесвітніх досягнень, то, як я згадував вже не раз, останні роки верх беруть результати наук про життя, але цього року їх не було, бо все просто меркло на фоні гравітаційних хвиль.

Втім, це ні про що не говорить, бо, хочемо ми чи ні, науки про життя займають все більше місця у загальному обсязі світових наукових пошуків. Мені важко їх оцінювати, тому я відібрав лише кілька фізичних результатів, які привернули певну увагу:

Спостережена найближча до нас екзопланета, яка пригідна до життя. Вона обертається навколо зорі Проксима Центавра, на її поверхні є вода, а зараз почалися пошуки ознак атмосфери. Температура поверхні $30-40^{\circ}\text{C}$, а якщо б атмосфери не було, то температура мала б бути десь на 10°C нижче. Проте рівень ультрафіолетового опромінення там на два порядки більший за земний. Як відмічають автори, поки що йдуть інтенсивні спостереження, бо ще три-чотири роки тому жодний астроном не міг уявити, що екзопланета може бути так близько до Землі. Відстань до неї «всього» 4.2 світлових роки. Вже висловлені думки, що ближче до Сонячної системи нічого нема і бути не може.

Вперше виміряно спектр антиводню, на що пішло біля 20 років неперервної роботи. Вважається, що це досягнення відкриває нову сторінку у вивченні антиматерії. Якщо спектр водню вивчений краще за будь-який, то антиводню, навпаки, дуже погано. Тим важливіше, що з тією точністю, яка могла бути досягнута, жодної різниці у їхніх спектрах не виявлено. Щоб уявити, про що мова, наведу такі цифри: у накопичувачі антипротонів утримуються приблизно 10^5 цих частинок, які змішують з позитронами. Це робиться через уповільнення пучків вихідних частинок, що летять з прискорювача. З них за допомогою дуже складних і унікальних магнітних керуючих систем виділяються потрібні, які потрапляють і захоплю-

ються пасткою, в результаті чого утворюється приблизно 25000 антиатомів, що живуть певний час, коли вдається провести спектральні вимірювання.

Досягнуто новий стан водню, який раніше ніколи не спостерігався - це суміш впорядкованих атомів з вільними молекулами. Впорядкування має вигляд стільників, шари яких перемішуються з окремими молекулами H_2 . Не знаю чому, такий стан названо новим агрегатним станом, додатковим до відомих газового, рідкого і кристалічного. Він виникає при тиску приблизно 2 млн. атмосфер. Крім того, багатоатомні стільникові кластери співіснують з молекулярним станом, де молекули жодним чином не об'єднуються. Цікаво, що у 2007 році була теоретична робота, де саме така структура передбачалася і тепер дістала підтвердження, хоча самі автори обережні і говорять про необхідність подальших досліджень.

Нарешті, у січні ц.р. знову «вибухнув» водень – «бомбою» стала стаття двох американських експериментаторів з Гарварду, які повідомили, що ними вперше отримано металічний водень - тобто досягнута мета кількох поколінь дослідників. Про це повідомили багато ЗМІ та інтернет-сайтів. По-перше, ця речовина дуже цікава як фізичний об'єкт, оскільки її структура визначається атомарним, а не молекулярним воднем, по-друге, вона за припущенням складає ядро багатьох планет, по-третє, за розрахунками такий водень має бути кімнато-температурним надпровідником. Все це обумовило багаторічний інтерес до отримання металічного водню, причому такі заяви вже лунали, але не підтверджувалися. На цю тему можна зробити цікаву доповідь, а я обмежусь лише тим, що Р. Діасу і І. Сільвері вдалося наочно продемонструвати появу в околі тиску в 5 млн. атмосфер шматка чорного кристалу, поведінка якого співпадала з такою, яку мав би демонструвати метал. Додам тільки, що деякі конкуруючі групи висловили сумніви, щось сталося з експериментальною установкою, але преса і журнал «*Science*» наполягають на металічності. Слово надпровідність при цьому автори статті не вживають.

На цьому хотів би закінчити з фізикою, як такою поза-як подібна інформація, хоча і цікава

для порівняння, без історичної перспективи або безпосереднього з'ясування реальних умов праці, не має великого сенсу. Якщо говорити про фізику, то в останнє десятиліття такими залишаються фізика високих енергій, астрофізика, нанофізика, особливо вуглецева, яка у світовій тематиці займає приблизно 20% всіх публікацій з фізики. І знову для співставлення буквально два слова з цього приводу: на другому місці з 17% напівпровідникові наноструктури і на третьому з 7% – нанофотоніка, під якою розуміють фотонні кристали, лазери на квантових точках, плазмоніку та метаматеріали.

Звичайно, у нашій ситуації вкрай обмеженої державної підтримки ми практично не можемо конкурувати з розвинутими країнами по усьому дослідницькому фронту і маємо визначати пріоритети, але можна стверджувати, що наші фахівці у названих напрямках, попри відомі труднощі, зберігають певні позиції, утримувати які втім дедалі важче.

Наступну частину звіту, почну з цитати:

«...люди, если не знают, то, во всяком случае, чувствуют, что самая верная их защитница – культура, а самый опасный враг – бескультурие».

Увы, это известно и людям, далеким от культуры, которые умеют все обращать себе на пользу, даже культуру...»

Ці слова належать видатному поету Борису Леонідовичу Пастернаку. Він, зрозуміло, вважав головним завданням інтелігенції захищати народ через культуру. Мені ж здалося, що якщо в цих словах зробити єдине виправлення, замінивши слова «культура» на слово, яке, певною мірою теж становить частину загальної культури, а саме: «наука», фраза не тільки не втратить свого значення, а й набуде важливого сьогодні звучання, і під таким кутом зору, що наука має бути і є захисником Батьківщини, а не її нахлібником, я представлю наступну частину свого викладу.

Моє головне завдання звітувати про роботу Бюро відділення, в якій основною ланкою є організаційна і допоміжна. Бюро розв'язувало багато задач, головним чином, організаційно-інформаційних, але одна завжди була і є осно-

вною – це сприяння діяльності установ відділення у проведенні фундаментальних і прикладних досліджень, про результати яких, я, власне, і говорив. Проте почну з питання, яким відділення не з своєї ініціативи, а тому що було необхідно, активно або цілеспрямовано займалося - і яке ще, можливо, займатиме певний час – це переміщення двох з трьох установ ВФА з Донбасу в інші міста. Я не можу сказати, що ця проблема вирішена або навіть полегшена для тих, зізнаюсь відверто, не дуже численних наших колег, які не змирилися з подіями на Сході України і фактично самотужки передислокувалися у нові місця роботи і проживання - Дніпро, Київ, Харків, але, можу чесно стверджувати, ми робили усе від нас залежне, щоб їм хоч чимось допомогти.

Тому хочу вибачитися перед рештою співробітників – мені не завжди вистачало вміння і твердості переконати вище керівництво академії у плачевному стані переважної більшості наших інститутів, які впродовж звітного року були вимушені через вкрай обмежене бюджетне фінансування працювати чотири, а деінде й три дні на тиждень.

Що стосується так би мовити загальної характеристики діяльності установ ВФА, то кілька останніх років для неї я використовував список 100 найбільш відомих українських науковців, який, на щастя, готувався не мною, спирався на базу даних *Scopus* і з якого я вибирав співробітників наших установ. Це ж стосувалося і списку 50-ти академічних установ. Тепер такої можливості нема, бо проект, який підтримувався Національною бібліотекою ім. В. І. Вернадського, був припинений як такий, що свою місію виконав. Нових даних нема і за базою *Web of Science*, які кілька років поспіль оприлюднював Український науковий клуб, проте ми пам'ятаємо, що наші інститути, принаймні, їх більшість, ніколи не опускалися нижче 20-25 місця і завжди перебували серед найкращих установ академії, а їх, як ви знаєте, більше, ніж півтори сотні.

Оскільки поточних цифрових показників у необхідному обсязі нема, далі робота наших інститутів аналізуватиметься, виходячи з їх звітів. Як правило, вони доволі райдужні і

формально справляють непогане враження. В принципі, це не дивно, тому що у будь-якому нашому інституті знайдеться кілька потужних публікацій або один-два-три дійсно непоганих результати за рік. Але чи віддзеркалюють вони середній рівень нашої діяльності за так званим гамбурзьким рахунком? Хоча, мабуть, їх треба вважати такими, якщо чесно взяти до уваги жахливі умови, в яких ми живемо і працюємо, що вже потрапило на екрани ТБ.

Тому і з цього приводу, а також із загальних міркувань виникає важливе питання: чи варто відверто говорити про роботу наших інститутів? Це не проста розмова, але ми мусимо її колись розпочати і, напевно, такий час наблизився, а, може, ми мали б це зробити значно раніше, причому провести її самі, а не чекати, коли до неї запросять.

Хоча б тому, що тепер керівництво держави і МОН вимагають від нас, мається на увазі академія в цілому та її відділення, реформування, яке обізвали гучним терміном *оптимізація*. Ця часто вживана на всіх рівнях лексика мені здається надуманою, незрозумілою, але зручною для «верхів», бо за нею можна мати на увазі все, що завгодно. Ніяких пояснень, крім загальних закидів ніхто не дає. Головні ж зводяться до таких:

- низька ефективність використання бюджетних коштів;
- відсутність незалежного аудиту;
- значний відтік молоді, який вимагає змін організаційної структури;
- необхідність покращання управління власністю.

Називаю ті, що я чув з різних уст і що стимулювало прийняття нового Закону. За академією, звісно, залишилося виконання її прямих обов'язків – наукові дослідження, а от їх практичне застосування розглядаються як вимога.

Що сказати? Ну, хоча б наступне: неможливо в принципі коректно визначити ефективність роботи академії у відсутності попиту в державі на наукові результати, а от попит на знання – прерогатива або навіть одне з головних призначень держави, якщо вона дійсно дбає про технологічний і людський розвиток.

А що ж маємо насправді? Без будь-якого так званого незалежного аудиту прийнято без-

апеляційне рішення здійснити оптимізацію фактично у примусовому порядку, для чого винайшли найжорстокіший і найболючіший спосіб - фатальне скорочення і без того мізерного фінансування та тверду вимогу привести у відповідність з ним чисельність співробітників. Я не стверджую, що в інститутах нема баласту, обсяг якого, між іншим, ніхто не визначав, але зараз мова не про нього, а про видуману кимсь «методу» – ось вам гроші, а ви як хочте підлаштовуйтеся під них. Крім того, скорочуватись мають всі інститути незалежно від якості їх роботи, з чим погодитись теж ніяк не можна.

Якщо робити все, як приписано, то при наявному бюджеті та за умови різкого підвищення всіх комунальних тарифів, нам прийшлося би скоротити не менше третини нашого наукового персоналу, що дійсно викликає супротив, бо за всіма основними наукометричними вимірюваннями фізики не тільки не останні, а, як зазначалося, посідають чільні місця. Тим не менш, деякі наші інститути – можу навести Інститут магнетизму, Інститут металофізики і Інститут теоретичної фізики скоротили, використовуючи власні досить жорсткі критерії, чверть і більше своїх штатних працівників.

Середнє скорочення по Відділенню склало приблизно 14%, а в названих установах – від 24 до 36%. Водночас, є інститути – їх три, які не скоротили жодного співробітника у порівнянні з роком тому. Коли ж прийшов бюджет-2017, знайшлися керівники, які наполягали на врахуванні так би мовити наявного на 1 січня поточного року складу.

Якщо не враховувати символічні поправки, відсотки цього року співпадають з минулорічними, які – правда, з різних причин – не влаштовують майже всіх директорів. Додати мені нічого, хоча зі сказаного я роблю тільки один висновок: принцип розподілу між нашими установами величезних, за дивними і не виправданими, як на мене, словами П. О. Порошенка, мільярдів з держбюджету, що безкорисно йдуть на науку, залишається нагальною проблемою, яка з роками гарячішає.

З іншого боку, навіть, враховуючи такі важкі та несприятливі творчій роботі обставини, чи

можемо ми говорити про справжню плідну діяльність наших – маю на увазі відділення – та й не тільки наших академічних установ, хоча, повторю, на тлі академії наші виглядають більш-менш пристойно.

Давайте подивимось на публікаційну активність науковців різних країн (рис. 6).

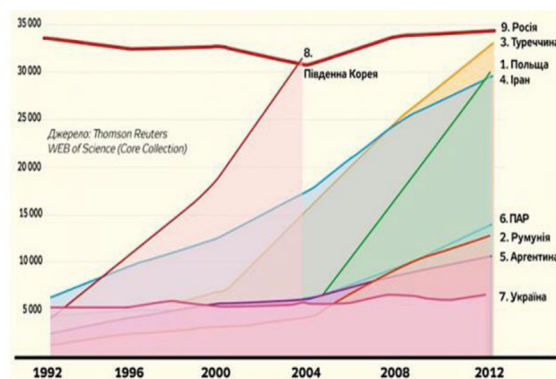


Рис. 6. Динаміка наукових публікацій в різних країнах за період 1992-2012 рр.

Як кажуть, неозброєним оком видно, що на фоні інших країн ми тупцюємо на місці. Як буде видно, така картина і у нашому, передовому за всіма показниками, відділенні.

Для порівняння показані лише країни зі схожими (за винятком Південної Кореї) показниками економічного розвитку. Видно, що приблизно 15-20 років тому ми мали більш-менш однакові стартові умови, але біля 10-ти років тому більшість з них почала швидко розвивати науку, що стало трендом нового тисячоліття, що ми не врахували і стали помітно відставати. Скажімо, у 2014 році науковці України опублікували 6300 наукових статей (з них НАНУ – 4300, або 68%), а Іран чи Польща у 5 разів більше, Румунія – у 3 рази, хоча ще недавно за загальною кількістю публікацій ми були приблизно на рівних. У країнах великої сімки цей коефіцієнт 20-25, у США – 100.

Вже стало загальним місцем говорити, що будь-який середній університет публікує більше статей, ніж вся наша академія, хоча там працівників зазвичай у рази менше. Не знаю, чому, але на це ніхто не звертає увагу. У даному випадку маються на увазі державні мужі, оскільки академія, принаймні її основні інститути,

виглядають значно краще за середньо- українську статистику. Тим не менш, можна припускати, що слова Президента України про неефективність науки у більшій чи меншій степені стосуються й цього аспекту нашої діяльності, якщо до нього доходить подібна інформація.

Знову покажу інтегральний показник, або кількість публікацій на одного науковця в рік (рис. 7).

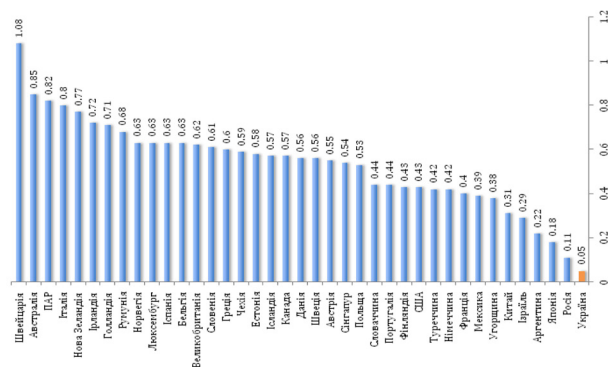


Рис. 7. Середня кількість публікацій в рік на одного науковця (2015).

Мені особисто соромно і, коли я бачу таку функцію розподілу, де ми безпорадно на її далекому хвості, згадуються слова, одного відомого персонажу з кінофільму «За державу обидно». У відділенні ситуація не така плачевна. Повірте, пасти з таким великим запасом задніх теж не личить висококваліфікованим фахівцям науково розвиненої, як ми всі ще переконані, країни.

Наведу індекси Гірша академії та 9-ти кращих її установ за станом на 2015 рік. Видно, що чотири з них – це інститути нашого відділення, а два – ядерного (рис. 8).

Я не вибрав цифр по окремих науках, але можу засвідчити, що за даними Міжнародної бази *Simago*, якщо брати сумарно по всіх науках, Україна, як видно, знаходиться на 45 місці, хоча два роки тому були 39. Що стосується фізики і астрономії - ми на 26 місці (були на 23), яке нижче матеріалознавчого, у якого числові наукометричні показники значно менші, проте порядкове місце у світі на 2015 рік – 21. Натомість, ми випереджаємо наших біологів, хоча майже повсюдно наукометрія наук про життя завжди виглядає краще.

Зазначене відставання не настільки болюче і піддається виправленню, а от єдине, що має сенс серйозно обговорювати, це те, що уряди практично усіх країн, які дійсно бажали поправити наукові справи, зробили вже давно – стали ретельно відслідковувати якісні індикатори, у той чи інший спосіб враховуючи їх при розподілі фінансування чи оцінці рівня наукової діяльності тих чи інших суб'єктів – фізичних або юридичних – в аспекті світового наукового процесу.

№ п/п	Установа	Кількість публікацій у SCOPUS	Кількість цитувань у SCOPUS	Індекс Гірша (H-індекс)
1	НАН України (загалом)	25 918	73 435	78
2	Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова	2 722	32 324	74
3	Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут"	4 542	33 161	70
4	Інститут фізики	3 619	28 498	63
5	Інститут фізіології ім. О. О. Богомольця	2 325	18 709	57
6	Інститут молекулярної біології і генетики	1 883	18 126	57
7	Інститут ядерних досліджень	2 223	18 105	57
8	Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б. І. Веркіна	4 374	30 225	56
9	Інститут біоорганічної хімії та нафтохімії	1 140	11 948	56
10	Головна астрономічна обсерваторія	907	13 963	55

Рис. 8. Індекс Гірша кращих установ НАН України станом на 2015 р.

Не треба ідеалізувати подібні дані або перебільшувати їхнє значення, але при цьому не можна не визнати, що кореляція, без усяких сумнівів, існує і незаперечно гласить: чим вони вище, тим вище загальний рівень науки чи в країні, чи в організації типу академії, чи в установі. Не заперечуватиму, є окремі винятки, коли наукометрія або бреше, або видає викривлені чи штучно завищені дані, але у більшості випадків вона як допоміжний інструмент непогано працює, відображаючи *середню* реально існуючу ситуацію, і дещо говорить і про окремого науковця, і про колективи, і про стан справ у тому чи іншому науковому напрямі.

Отже, незважаючи на те, що наша заробітна платня є смішною у порівнянні з європейською, що ми, без перебільшення, є об'єктами довготривалого пригнічення і що витрати на одного наукового співробітника в Україні у 10-20 і більше разів поступаються тим, які має вчений у розвинутій (рис. 9, 10) країні не може, на мою думку, служити виправданням, що сама академія не націлює нас – своїх співробітників,

а також свої установи – на підвищення широко використовуваних наукометричних показників, не має спеціальної програми підтримки відповідних передовиків, не робить ставку на них.

Країна	У доларах США
США	260 000
Німеччина	245 000
Австрія	232 000
Англія	215 000
Японія	208 000
Франція	205 000
Індія	127 000
Китай	74 000
Росія	40 000
Україна	8 000

Рис. 9. Річні витрати на одного дослідника.

Країна	Держбюджет	Загалом
Ізраїль	3,05	4,25
Фінляндія	2,55	3,84
Японія	2,3	3,33
Німеччина	1,95	2,78
США	1,9	2,79
Франція	1,33	2,21
Англія	1,24	1,82
ЄС (27 країн)	1,23	1,9
Китай	1,1	1,43
Італія	0,74	1,27
Польща	0,4	0,68
Росія	0,37	1,24
Україна	0,29	0,73

Рис. 10. Річні витрати на наукові дослідження у відсотках ВВП.

Отже, наукометрію у тому чи іншому вигляді, на мій погляд, обійти важко, але користуватися її даними треба виважено і обережно.

І хоча ми всі добре розуміємо, що з точки зору загального рівня життя, інфраструктури, безпеки її громадян Україна вже не відрізняється від країн третього світу, де нема нормальних шкіл, лікарень, та й університетів, які б входили хоча б до сотні кращих у світі, саме на вчешних, і в першу чергу, на нас - природничників, лежить відповідальність за майбутнє країни. А коли починаєш опиратися людям, які, ігнорую-

чи усі світові тенденції стосовно ставлення до науки, по суті весь цей кошмар влаштували, особливо після перемоги Революції гідності, у відповідь чуєш, що «навколо вороги і ти їхній пособник», або «країна гине, а ти тут лізеш із своєю наукою». Ці бюрократи, не можуть збагнути, що на нас призводить гнітюче враження і ображає будь-яка підозра у нечесності, коли за наукову продукцію видають фіктивну діяльність, яку при цьому не дозволяють перевірити через незалежну експертизу.

Коли я говорю, що владні кола звернули на нас увагу, я маю на увазі прийняття недолугого, на мою думку, Закону про науку і науково-технічну діяльність, який нам підносять як велике досягнення революціонерів від науки, якийсь уявний компроміс, а насправді – це Закон від бюрократів та депутатів, які ніколи у фундаментальній науці не працювали і основних засад її розвитку не уявляють.

Крім того, компроміс, як відомо, завжди гра на пониження, і ми, як ніхто інший, прекрасно, уявляємо, з ким на нього йдемо, бо загальноосвітній, а тим більше природничо-науковий рівень тих, хто пише подібні закони, називаючи себе гордим словом «еліта», викликає хіба що розпач.

Скажу більше: зрозуміло, що, попри красиві формулювання, цей закон, значною мірою, антиакадемічний, чого ніхто і не скриває, припускаючи, що в академії корінь зла і вона протидіє розвитку науки в Україні або гальмує його. Я ж схилиюсь до думки, що хоча претензій до нас – співробітників, членів і керівництва академії - можна висловити чимало, ми, навіть зовсім молоді і недосвідчені науковці, на рівні захисного рефлексу відчуваємо, що головні погрози для науки виходять зовсім з іншого боку.

Звичайно, у моїх словах зайві емоції, але їх неможливо позбутися, коли щороку вже на протязі практично двох десятиліть з Печерських пагорбів весь час лине, що грошей на науку нема і що наука, виробляючи лише стоси нікому не потрібних паперів, має кормити себе сама. Ті, хто так думає і гучно проголошує, байдуже спостерігаючи за відтоком з країни яйцеголових розумників, мають нести відповідальність за наслідки неминучої де-

білізації країни. Останньою краплею у низці подібних анти-освітніх заходів стала ідея МОН про вилучення природничих дисциплін з програми старших класів загальноосвітніх шкіл. Як влучно зауважив один дотепник, людина, яка вміє розв'язувати диференційні рівняння, знає основоположні закони фізики і розуміє хімію, «лептонним богам» молитися не буде. І хто з цим ярмом бореться? Лише Національна академія і один-два університети. А де академія педагогічних наук? Напевно, підтримує, як мовчать і школи, і, що особливо показово, батьки, а також переважна більшість громадських організацій.

Серед тих, які активно проти, Українське фізичне товариство, а також Астрономічна асоціація України, що є і приємним, і закономірним.

Мені при цьому «подобається» позиція МОН, яке розуміє роль природничих наук, але щось там прийнято урядом і ми маємо виконувати, хоча і з певними застереженнями. Як на мене, не можна навіть із застереженнями проводити такі рішення у житті. Чому б не ініціювати прийняття нового стандарту освіти?! Мені це важко зрозуміти.

Щоб бути сприйнятим, покажу дуже цікаві інформативні дані щодо зміни споживчих ціни на різні послуги у передових країнах за останні 20 років.

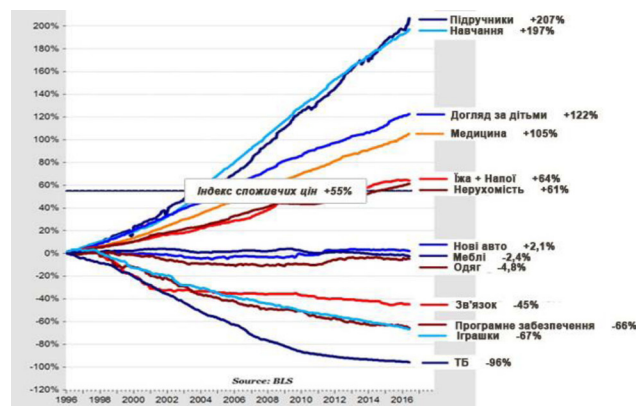


Рис. 11. Динаміка цін в країнах «золотого мільярду» за останні 20 років (1996-2016).

Несподіваним, принаймні для мене, виявилось трикратне зростання ціни на навчання та підручники, а отже, – на отримання *ново-*

го знання. Практично вдвічі дорожчою стала медицина, зросли ціни на їжу та нерухомість. При цьому багато чого майже не змінилося, а от ціни на те, що забезпечує наука у своєму прикладному аспекті, навіть дещо знизились. Самі ж знання ціннішають і за всіма оцінками така тенденція зберігатиметься у найближчі 20-25 років. У такому, зовсім не рожевому кольорі, видається мені вихідний стан, з якого треба було б стартувати, думаючи про майбутнє науки, під чим я розумію виключно першокласну науку, а не другорядну чи периферійну. І чи зробив хто-небудь спробу аналізу, що ми маємо, що ми хочемо і на що спроможні?

Дозвольте висловити деякі суб'єктивні думки, які, я майже впевнений, не всіма поділяються. Правда, спочатку попереджу можливе питання: чому йдеться переважно про академію, якщо звітує відділення? Відповідаю: як на мене, академія може існувати і без відділення, а от навпаки – шансів нема, тому загально-академічні проблеми та перспективи не можуть бути поза увагою будь-кого з нас.

Наприклад, мені здається, а точніше – здається очевидним, що якщо вести розмову відверто і називати речі своїми іменами, то за роки незалежності, попри створення досить великої низки установ, часом доволі успішних, а також враховуючи здоровий консерватизм, притаманний будь-якій академії, наша фактично не розвивалася, не оновила основні принципи своєї діяльності, дбайливо зберігаючи те, що накопичено за радянську добу. Мабуть, на певному етапі це було єдино можливим, але давайте визнаємо – пройшло більше чверті століття. І весь цей період ми чомусь залишили осторонь, не вживши необхідних захисних заходів, щоб у нашій повсякденній діяльності взяти до уваги один з фундаментальних законів, які супроводжують функціонування будь-якого живого організму – перебувати у гармонії з оточенням, інколи вельми недружелюбним. Іншими словами, він формулюється так: якщо жива система не адаптується або не пристосовується до зовнішнього середовища, її еволюція не містить інших шляхів, ніж шлях до загибелі, або, у кращому випадку, необоротної деградації. Її ж прагнення жити і розвиватися на власний роз-

суд або за окремими правилами не обходиться без конфліктів з тим же середовищем, що для нас означає лише одне – з сильними світу цього. Щоб не бути ними підкореними і відстояти звичний рівень автономії та не імітаційної свободи творчості, необхідно мати громадянську мужність, яку, на жаль, академія продемонструвати не змогла, бо на це потрібні не академічні вчинки, взагалі кажучи, невластиві державній інституції.

Можете бути впевнені, що як посадова особа академії ці слова, я, в першу чергу, адресую собі, бо попри розміщення серії багатослівних сердитих текстів у ЗМІ, а також такі ж виступи на зібраннях різної присутності, жодним чином нічого не спромігся і ніщо не змінив. Тобто ККД моїх власних намагань хоч на щось вплинути або бути почутим є точним нулем. При цьому я апелював лише до владних кіл, а не до нас, що, мені тепер здається, не було достатньо послідовним, і, до певної степені, справедливим. Я не посипаю голову попелом, але, погодьтесь, мабуть, починати щось робити треба було з себе, що, зазвичай, і зручніше, і конструктивніше.

Ні, деякі зміни сталися. Так, за роки незалежності ми значною мірою позбавилися московського нагляду, інколи вдало використовували самоврядність, але оточуючих суспільних змін, про які згадувалося, академія практично не помітила і у своєму бутті не врахувала, тихо сподіваючись, що несприятливі часи минуть, і на трон, нарешті, зійде освічений лідер. Такого не сталося, згадане вище значне відставання, вірніше – його причини, ніхто серйозно не розглянув, і ми, у тому числі ваш покірний слуга, все списували на хронічне недофінансування, яке, безумовно, теж дало свої негативні наслідки.

Звикнувши у радянські часи працювати з так званими міністерствами «дев'ятки», які, як і Державний комітет з науки і техніки СРСР, мали на меті прикладні напрями, а отже, відслідковували і підтримували інноваційні пропозиції, при отриманні незалежності ми, втративши попередні важелі впливу, опинилися один на один з народжуваними бізнесом і бізнесменами, яких раніше навіть в уяві не було і які тим самим теж не були готові та й не вміли працювати з пошуковими установами.

Питання «*Що робити?*» ніким, включаючи академію, по суті серйозно не ставилось. Чи не в цьому полягає глибинна причина вічної нестачі коштів, оскільки від армії, яка сама занепадала, жодних запитів не поступало? Громадянська промисловість як дітище радянських часів високі технології теж практично не опановувала, тому їй також передова наука виявилася непотрібною. А яких-небудь інших джерел для розвитку ми знайти не зуміли.

Виникла перманентна проблема невизначеності, в якій фактично продовжує перебувати весь науковий сектор і кінець якої не проглядається, а призови до міністерств і відомств «*давайте співпрацювати*» - глас волаючого в пустелі, бо величезний відсоток підприємств давно у приватних руках.

З цього приводу варто зауважити, що жодну державну академію наук не можна розглядати поза структурою промислового сектору, з яким вона співіснує. В радянські часи він у нас був тотально централізованим, тому і академія була такою ж єдиною можливою централізованою організацією, бездоганно пристосованою саме до адміністративно-командного управління. Тепер навколо нас все абсолютно інше, ми ж залишилися у звичній схемі, намагаючись, що нам здається природним, розподіляти бюджет з одного центру за принципом «*кожній сестрі по сережці*». Я не готовий дати рецепти, але складається підсвідоме враження, що якісь можливості втрачені, що щось влаштовано не так, і мені самому було б цікаво дізнатись, чи потрібна українській економіці або хоча б якійсь її частині НАН України у нинішньому вигляді, хоча прекрасно усвідомлюю, що наукові установи приватизувати чи комерціалізувати, тобто перевести на самоокупність, немає жодної можливості. Навіть припущення чогось подібного є безглуздою нісенітницею.

Є й інший бік медалі: не тільки ми самі виявились не готовими до ринку, а й ринок до нас, бо ми не маємо так би мовити ринкового товару, оскільки фундаментальні результати, якими б пріоритетними або видатними не були – і це загальновідомо - не є продуктами чи виробами для продажу. А тим, що неможливо вигідно продати, нікого з бізнесменів не за-

цікавиш, бо їхня мета – прибуток. У наших він ще й має бути швидким.

Скажіть, будь ласка, хто з ділових людей може бути зацікавлений, наприклад, в орнітологічних чи ентомологічних дослідженнях, у з'ясуванні механізмів рентгенівського випромінювання зірок, розв'язанні гіпотез Гільберта чи Пуанкаре або якомога глибшому охолодженні атомного бозе-конденсату. Схожі проблеми можна перелічувати й перелічувати. Нові ж меценати на кшталт шляхетного роду Терещенків, які б з міркувань збагачення суспільного інтелекту, а не власної кишені спонсорували високотехнологічні або чисто наукові розробки з прицілом на майбутнє, напевно, ще в утробах українських жінок. Тому наука, яка тим самим не може вписатися у сучасну українську дійсність, стала, до певної міри, сиротою, якою має хтось опікуватися. А без прямих вимог на корисність наукових результатів, що дуже принципово, це може бути тільки держава, і не кожний пересічний її політик це розуміє, оскільки лише одиниць серед них можна віднести до державних діячів, які усвідомлюють цю проблему як стратегічну для країни.

Зокрема, подібне нерозуміння черговий раз яскраво продемонстрував П. О. Порошенко, коли 3 березня ц.р. виступав перед студентами і молоддю Харківщини, заявивши: *«Я твердо переконаний, що українська наука потребує глибокого реформування. Ми маємо значно наблизити її до практики»*, чим позиціонував себе лише як політик середньої руки.

Звісно, я поважаю посаду президента і уважно слухаю, що він виголошує, проте, вибачте, у питаннях науки він, нехай не ображається, для мене не є авторитетом і, на жаль, не знає історію з Робертом Вільсоном, першим директором Лабораторії імені Енріко Фермі, який на питання конгресменів США, чи має коштовний прискорювач, який будувався наприкінці 60-х років у містечку Батавія поблизу Чикаго, якесь відношення до обороноздатності країни, чесно відповів: «Жодного. Але він робить країну достойною захисту».

Тобто, навіть представникам американського істеблішменту було невідомо, що наука діє по ланцюжку – добуває знання, чим піднімає

престиж країни, щоб громадяни, насамперед молоді, мали підстави нею пишатися, і молодь, яка надихається науковими досягненнями, йшла в усі важливі сфери, звичайно, й оборону. А починається усе зі шкільних років, коли школярі, які читають популярні книжки, заряджаються ними на нові відкриття, оскільки без науки ця архіважлива справа просвіщення занепадає аж до зникнення.

Хотів би додати кілька загальних і, взагалі кажучи, добре відомих міркувань, які, тим не менш, чомусь залишаються поза голів, від яких залежить підтримувати чи не підтримувати фундаментальну науку: утилітаризм у відношенні до науки є недоречним і неефективним. Практично усі відкриття є непередбачуваними і часто виявляються побічним результатом певних нехай і запланованих досліджень. При цьому про їхню корисність ніхто не думає, і думки про неї народжуються пізніше (інколи набагато), а якщо реалізуються, стають законними розмови про повноцінну віддачу науки. Згадаємо СРСР, де наука була частиною ідеології - звідси космос, атомна промисловість, енергетика тощо. Комуністи свідомо пестили ВПК, довіряючи вченим у певних межах ходити туди не знаю, куди, робити то, не знаю, що. При цьому самі вчені ніколи не зверталися до влади з проханням поставити велику народно - господарчу задачу, оскільки задачі може ставити лише наука і лише собі або брати їх з оточуючого життя. Отже, нам бракує державної ідеології, яка б спиралась виключно на високу науку.

Без неї все занепадає, що неприпустимо, тому всі ми щиро вважаємо, що фундаментальна наука, її носії та знання, яке ними неперервно виробляється, самі по собі є національним надбанням, яке потребує особливої уваги і має бути збережене за будь яких несприятливих умов - воєн, криз, стихійних лих. Однак далеко не всі поділяють такі погляди.

У першу чергу, це президенти України років її незалежності, а за ними й сотні народних обранців, від яких, як ми знаємо, теж багато чого залежить. Я ж, знаючи реальний стан держави, а особливо згаданий вище загальний освітній рівень її керівництва, став глибоким

песимістом, коли думаю, чого нам чекати і на що сподіватися. Але ще більший, хоча й несподіваний, смуток викликає зовсім інше: це безпрецедентна за масштабами для нашої вельми відсталोї і бідної країни, керівництво якої, перефразовуючи закид попереднього прем'єра А. П. Яценюка до науки, не спроможне ні на що, крім виробництва жалюгідних прохань про безвіз, кредити та летальну зброю, система академічних дослідницьких інститутів. Це, начебто, єдине ціле невідомо як зберегти в існуючому вигляді навіть у найближчий перспективі, якщо, звичайно, не погодитись з тим же принизливим для усіх нас фінансуванням, адже нема жодних ознак на його збільшення.

Причому йдеться не про відсотки, або врахування інфляційних процесів і наразі майже недоступних витрат на комуналку, що, як ми знаємо, теж дається з боями, а про рази, інакше нічого, за великим рахунком, не поправити. З цього я не можу зробити іншого висновку, ніж не дуже приємний, але єдиний: в умовах поточного фінансового статус-кво дослідницька робота у нашій країні ніколи не стане привабливою для тих, хто на неї робить ставку свого життя, і вони, особливо найкращі та найталановитіші, отримавши необхідні знання і вміння, продовжуватимуть шукати місця роботи поза Україною, а в ній наука відходитиме разом з нами, що стає все більш об'єктивною і сумною реальністю. Оце справжня трагедія.

Остання знаходить своє безпосереднє відображення, зокрема, й у тому, що середній вік працюючого кадрового складу академії, причому не тільки її членів або Президії, зашкалює.

Поступово, самі того не помітивши, ми опинилися у практично бездонному як для сучасних «рятівних» засобів у формі обмеженого фінансування геронтологічному, перепрошую за такий образ, проваллі, яке з природних причин заважає академії залишатись законодавцем мод у науці, але хіба можна виниклою стагнацією закидати самій академії? Старіння посилюється катастрофічним відтоком мозку і суцільним прогашем у конкуренції за кваліфіковані наукові кадри, оскільки нема перспектив у молоді людини, коли престиж дослідницьких і інженерних професій, а за ним і зарплата на-

уковців в країні впали нижче плінтусу? І чи цьому відповідає європейський вибір, слова щодо якого кожний пересічний український політик промовляє як мантру, хоча далі декларацій справа не йде, оскільки, насправді, державі не до науки.

Можна висловитись й інакше: чим НАН України, якій ми всі сумлінно служимо, може сьогодні привабити молодого, працелюбного, амбітного випускника вузу або аспірантури, коли перед ним відкриті двері практично усіх найкращих лабораторій світу, де він може без жодних проблем реалізувати свої креативні здібності та, що теж вкрай суттєво, мати усі необхідні для нормального побуту і кар'єрного зростання умови. В Україні, як ми знаємо, рівень подібних складових повноцінного життя значно нижчий або відсутній. Дожили, скажімо, до того, що за наявної державної підтримки зарплата доктора наук, який працює у Києві, менше середньої по місту. Про інші міста достовірної інформації не маю, проте навряд чи там справи ліпші. За винагородою за наукову працю ми настільки нижче не тільки країн Заходу, а й багатьох країн, які лише розвиваються, що на цьому напрямку очікувати суттєвого покращання може хіба що божевільний. Коментарі, як-то кажуть, зайві, але це незаперечні факти, які потребують якогось реагування.

Воно може бути різним, і мені, спираючись на презумпцію невинуватості – маю на увазі державу, – хочеться зайти дещо з іншого боку і спитати: *«А може ми забагато просимо?»*. Звернемося до світового досвіду: не гарантую, що дані стовідсотково відповідають дійсності, але, наскільки зміг дізнатися, жодна країна світу, рахуючи найбагатші, що витрачають на наукові дослідження шалені у порівнянні з нами кошти, не дозволяє собі мати десятки тисяч своїх громадян (а разом з галузевими академіями та університетами – мабуть, й сотню тисяч), єдиною метою яких є здійснення фундаментальних досліджень, і всі їхні виконавці стоять з протягнутою рукою.

Водночас, можливо, більше відповідає дійсності інше припущення: ми називаємо фундаментальними дослідження, які такими за своєю природою не є, але люди, що ними займаються,

входять до переліку. Так чи інакше, таке припущення лише означає, що для держави ми всі виявляємось дійсно об'єктивно не підйомними. Звісно, на цьому я точно наполягати не можу, але знаю, що за НАН України числиться виконання саме таких досліджень і саме її визнають як неефективного виконавця, якого треба глибоко реформувати. Останні – це згадані вище слова президента України з тієї ж його харківської промови перед молоддю.

Якщо повернутись до наших реалій, то не важко переконатись, що загальна структура нашого наукового господарства помітно розходиться з світовими стандартами, хоча, зрозуміло, вони ніким і нікому для виконання не прописуються, але тенденції відомі, хоча б з маси статистичних даних.

У минулі роки ми ніколи не вдавалися до плавної структурної реорганізації та перегляду найпріоритетніших галузей щодо адекватної їхньої актуальності підтримки. Боюсь, ми вже втратили шанси на поступове реформування старої системи...

Втім, ми дійсно чуємо багато правильних слів щодо необхідності зберегти накоплений науковий потенціал, дружно визнаючи, що він стрімко руйнується. Але з вашого дозволу задам схоже питання, висловившись трохи по-іншому: на скільки вистачить запасу міцності, якщо вона ще є? Чи можна прогнозувати, скільки ми ще працюватимемо в умовах, коли нема підпитки молоддю, передового обладнання, розхідних матеріалів, грошей на відрядження, і не декваліфікуємося? Мені здається, що цифра 10 років цілком достовірна, а таке продовжується більше. І в мене великі сумніви, чи зможемо ми протягнути ще стільки ж. Проте, нехай кожний судить сам.

У підсумку, ми всі визнаємо, що ситуація, яка склалася, не є нормальною, проте я жодного разу не чув і таке питання: *«Ну, добре, зараз погано, а що ж завтра?»*

До чого я клоню? До того, що робота над Законом про науку, який, здавалося б, націлений на перспективу, мала б початися з головного питання, відповіді на яке я ніде не знаходжу, а саме: яка наука потрібна Україні і в якому обсязі? За що конкретно, а не загалом наше

суспільство готове платити і яку ціну. Коли ж ми живемо в умовах фінансової навіть не напруженості - вона нерідко буває й в країнах Заходу, а перманентного колапсу, подібні питання вимагають чіткої відповіді – без демагогічної риторики та скритого лукавства. З одного боку, ми не можемо дозволити собі викидати гроші на вітер, а з іншого, - не треба викликати ілюзії у великої кількості ні в чому не винних науковців якого б віку вони не були. Як відомо, у ринковому суперництві виживає сильніший.

Так і тут: хоча сфера фундаментальної науки має триматись на плечах держави, тобто платників податків, займатися такою наукою мають право лише ті, хто справді працює на світовому рівні.

При цьому я добре усвідомлюю, що існує триєдина послідовність - наука, технології, інновації. Тільки останні, які є результатом прикладних досліджень, крок за кроком просувають людство у найближче майбутнє, а от фундаментальна наука ні про що таке не піклується, проте, як ми всі прекрасно знаємо, теж працює на майбутнє, але віддалене, і ніхто не знає на скільки. В цьому сенсі вона виключно затратна. Тоді питаю: чи потрібна нам фундаментальна наука взагалі, хоча нескінчене число разів волав лише про неї?

Робити це, тобто ставити подібне питання руба, мене примушують нинішні обставини і відповідальне розуміння того, що моя країна неспроможна утримувати необхідний рівень всіх наявних фундаментальних досліджень, оскільки на це йдуть, бо можуть, лише багаті країни, які мають претензії на світове лідерство і не тільки в науці. Що ще більше спонукає мене до подібних одкровенень, так це парадоксальні заклики до академії розвиватися і щось виробляти при тотальному скороченні її бюджету.

Коштів же на те, щоб утримувати науку хоча б в НАН України в її сьогоdnішньому обсязі, яких було б достатньо, як я собі це уявляю, при нашому житті годі й чекати, або скажу з меншою часткою безвиході - не буде ще дуже довго. Тому ми, як це не важко і боляче, маємо вирішитись і піти на крайні заходи для максимально раціонального використання доступних коштів.

Раціонально – це означає жорстке обмеження кількості підтримуваних інститутів, лабораторій або, що фактично те ж саме, дослідників, і орієнтування лише на справді висококласні колективи, які для своєї діяльності мають отримати і мати умови, близькі до середньосвітових. Крім того, необхідно провести чітке розмежування фундаментальних і прикладних досліджень, для чого, як мені видається, треба було б мати два різних фонди підтримки – Фонд фундаментальних досліджень і Фонд інженерно-технічних розробок і технологій, а фундаментальні дослідження природничого спрямування сконцентрувати в академії, передавши соціогуманітарні науки в університети.

Хочу при цьому пояснити, що ні для нікого не є секретом, що у будь-якій науці існує певний розподіл науковців за внеском в неї та рівнем власних результатів, на, вибачте, хвостах якого працює до 90% дослідників, які вважаються начебто середняками, але, насправді, є кваліфікованими фахівцями, що займаються рутинною, але дуже необхідною науковою роботою. Під стягами скорочення різко рубати відповідні хвости, залишаючи лише лідерів, дуже небезпечно, бо тоді не буде середовища, що розуміє і втілює у життя оригінальні ідеї лідерів. Проте саме така оптимізація пропонується МОН, коли має скорочуватися все і вся, хоча мова може йти лише про підняття висоти максимуму при зменшенні інтегралу функції розподілу із збереженням її хвостів. У нас же, як мені здається, впав саме максимум.

Може, в моїх словах є частка загостреного перебільшення, але такі думки, позбавитись яких дуже важко, приходять в голову, і коли порівняти умови праці в європейських лабораторіях з нашими, і коли знаєш, як наші провідні науковці не можуть відвідати світові форуми, листуючись з їхніми оргкомітетами на предмет підтримки, і коли вони щиро просять, зокрема, мене, посприяти конкурсному проходженню тієї чи іншої розробки, щоб отримати хоч які-небудь додаткові кошти, погоджуючись на суми, що часом в рази поступаються запрошуваним.

Водночас, я досить спокійно приймаю критику і незгоду, але якщо виникне ділова дискусія, мене це влаштує.

Не буде зайвим ще раз сказати, чому я вирішив розпочати подібний обмін думками, хоча мене на нього ніхто не уповноважував. При цьому висловлене мною легко віднести до наївності. Натомість, треба ж колись зрозуміти причини, чому ми опинились у такому незavidному стані і як з нього виходити. Ми глибоко впевнені, що державні органи нами керують бездарно, але мене, зізнаюсь, зараз більше бентежить, а чи все правильно робимо саме ми або що не зробили, хоча мали б зробити. Тому, дозвольте висловити ряд пропозицій, добре розуміючи, що спроба може бути невдалою.

Наприклад, чому Закон, який спрямований на підняття престижу науки, не містить тверджень, що без візи Національної академії Уряд не може прийняти жодного серйозного рішення. Чому на вищу наукову організацію країни не покладено *обов'язковий* науковий супровід стратегії модернізації країни, а вона не визначена як лідер у розробці науково-технічної політики, і не зобов'язана розробити програму економічного і технологічного розвитку.

А якщо так, тоді що маємо робити ми самі? Після довгих роздумів і, намагаючись бути якомога обережнішим, я прийшов до висловленої думки, що поправити стан науки і вивести її хоча б на мінімально прийнятний рівень можна було б лише значним скороченням чисельності інститутів. Навіть, зробивши такий рішучий крок, стабільне фінансування певна кількість інститутів, може, навіть, їх більшість, має добувати на конкурсах. І лише відносно дуже невелика кількість академічних установ, об'єднаних у Національні дослідницькі центри з певних фундаментальних дисциплін і знову ж таки досить обмеженим штатом постійних співробітників, могла б отримувати базове фінансування прямо з бюджету, але й вимоги до них мають бути, образно кажучи, «гамбурзькі». Статус центра при цьому може, зокрема, надаватися уста-

новам-лідерам, кращим у своїй галузі, щоб держава мала всі підстави витратити на них бюджетні кошти.

Я дозволяю собі подібні пропозиції, бо мене надихає впевненість, що провідні установи нашого відділення є саме такими і зможуть витримати будь-який зовнішній аудит. Чи є така стратегія в цілому правильною, звичайно, судити не берусь. І такий, і інші варіанти треба обговорювати. Іншого шляху для порятунку і подальшого розвитку науки я в

українських реаліях запропонувати наразі не можу.

І останнє: ми вступаємо у ювілейний період, коли майже вся поточна робота академії концентруватиметься навколо підготовки до визначної події наступного року – її 100-річчя. Мабуть, не в останню чергу, від нас залежатиме, у якому складі, якій формі і з якими досягненнями ми до нього підійдемо.

Стаття надійшла до редакції 20.06.2017 р.

UDC 53,52

DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.2.106602>

THE BASIC SCIENTIFIC ACHIEVEMENTS OF INSTITUTES OF PHYSICS AND ASTRONOMY DEPARTMENT OF NAS OF UKRAINE FOR 2016 THE PLACE AND THE ROLE OF A SCIENCE IN A MODERN SOCIETY AND PROBLEMS OF THE ACADEMY OF SCIENCES REORGANIZATION

V. M. Loktev

PhAD of NAS of Ukraine, e-mail: vfa@nas.gov.ua

Summary

In the article results of scientific activity of institutes which are the part of physics and astronomy Department (PhAD) of a national academy of sciences of Ukraine are analyzed, in context of global scientific process.

It is shown, in particular, that in the Institute of physics the new organic superluminescent probe with the high resolution for the reproduction of biological objects or their separate elements structures has been developed. In the V. E. Lashkar'ov Institute of semiconductor physics the installation for the modern nanoprobe diagnostics of the material surface physical properties has been created. The marked achievements of a world level are also in the V. E. Kurdyumov Institute of metallophysics, the M. M. Bogolyubov Institute of theoretical physics, the Institute of magnetism, the Head astronomical observatory and in the other divisions of PhAD.

The significant attention is paid to the analysis of a different sort of problems of PhAD activity and Academy integrally.

The significant statistical data describing efficiency of scientific activity, their importance for socio-economic factors in the advanced countries are given.

It is marked, that conditions of scientific activity in the state do not give an opportunity to use still existing scientific potential for its more successful development. As the debatable ways and actions of the organizational plan of a different administrative level, which could essentially change a state of affairs in development of priority science directions and the use of a science for effective development of economy are offered.

Keywords: physics, fundamental researches, the Academy of sciences, reorganization

УДК 53,52

DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.2.106602>

**ОСНОВНІ НАУКОВІ ДОСЯГНЕННЯ ІНСТИТУТІВ ВІДДІЛЕННЯ ФІЗИКИ І
АСТРОНОМІЇ НАН УКРАЇНИ ЗА 2016 Р.
МІСЦЕ І РОЛЬ НАУКИ В СУЧАСНОМУ СУСПІЛЬСТВІ І ПРОБЛЕМИ
РЕОРГАНІЗАЦІЇ АКАДЕМІЇ НАУК**

В. М. Локтєв

ВФА НАН України, e-mail: vfa@nas.gov.ua

Реферат

У статті аналізуються результати наукової діяльності інститутів, що входять до складу Відділення фізики і астрономії (ВФА) Національної академії наук України, в контексті світового наукового процесу.

Показано, зокрема, що в Інституті фізики розроблено новий органічний суперлюмінесцентний зонд з високою роздільною здатністю для відтворення структури біологічних об'єктів або їх окремих елементів. В Інституті фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова створили установку для сучасної нанозондової діагностики фізичних властивостей поверхні матеріалів. Відзначені досягнення світового рівня також в Інституті металофізики ім. В. Є. Курдюмова, Інституті теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова, Інституті магнетизму, Головній астрономічній обсерваторії та ряді інших підрозділів ВФА

Значна увага приділяється аналізу різного роду проблем діяльності ВФА і Академії в цілому.

Наводяться значні статистичні дані, що характеризують ефективність наукової діяльності, значимість її для соціально-економічних чинників у розвинутих країнах.

Зазначається, що умови наукової діяльності в державі не дають можливості використати все ще існуючий науковий потенціал для більш успішного її розвитку. Пропонуються, як дискусійні, шляхи і заходи організаційного плану різного управлінського рівня які могли б суттєво змінити стан справ у розвитку пріоритетних напрямів науки і використанні науки для ефективного розвитку економіки.

Ключові слова: фізика, фундаментальні дослідження, Академія наук, реорганізація

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

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

УДК 538.935 PACS numbers: 72.10.-d, 72.20.Dp, 72.20.Fr, 72.90.+y, 73.63.-b

DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.2.106603>

ВИМІРЮВАННЯ ПРОВІДНОСТІ Й АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРІВ У РАМКАХ УЗАГАЛЬНЕНОЇ МОДЕЛІ ТРАНСПОРТУ ЕЛЕКТРОНІВ

*Ю. О. Кругляк, М. В. Стріха**

Одеський державний екологічний університет,

факультет комп'ютерних наук,

вул. Львівська, 15, Одеса, Україна

тел. (067) 725 2209, *E-mail: quantumnet@yandex.ua*

* Київський національний університет ім. Т. Шевченка,

факультет радіофізики, електроніки і комп'ютерних систем,

пр. Глушкова, 4г, Київ, Україна, тел. (044) 526 0532;

Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України,

пр. Науки, 41, Київ, Україна, тел. (044) 525 6033,

E-mail: maksym_strikha@hotmail.com

ВИМІРЮВАННЯ ПРОВІДНОСТІ Й АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРІВ У РАМКАХ УЗАГАЛЬНЕНОЇ МОДЕЛІ ТРАНСПОРТУ ЕЛЕКТРОНІВ

Ю. О. Кругляк, М. В. Стріха

Анотація. У методичній статті, розрахованій на науковців, викладачів та студентів вищої школи, обговорено експериментальні методи вимірювання опору в узагальненій моделі транспорту електронів Ландауера–Датта–Лундстрорма (ЛДЛ), зокрема, в умовах прикладання зовнішнього

магнітного поля: метод змінної довжини провідника, чотириточкову схему вимірювань, класичний метод вимірювання ефекту Холла й різні варіанти методу ван дер Пау, а також температурні вимірювання й урахування артефактів (ефект Нерста), вимірювання в сильних магнітних полях (ефект Шубнікова–де Гааза).

Ключові слова: нанофізика, наноелектроніка, вимірювання опору, метод ван дер Пау, ефект Холла, температурні вимірювання, врахування артефактів, ефект Нернста, ефект Шубнікова–де Гааза

MEASURING OF CONDUCTIVITY AND ANALYSIS OF ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF TRANSISTORS WITHIN GENERALIZED MODEL OF ELECTRON TRANSPORT

Yu. O. Kruglyak, M. V. Strikha

Abstract. In a tutorial article directed to serve researchers, university teachers and students, we discuss experimental methods for measuring the resistance in the frame of the generalized transport Landauer – Datta – Lundstrom (LDL) model, including measurements under applied external magnetic field, namely: method of variable resistor length, four-point measurement scheme, the classical method of the Hall effect measurement and different variants of the van der Pauw method, temperature measurements and accounting for artifacts (Nernst effect), measurements in strong magnetic fields (Shubnikov – de Haas effect).

Keywords: nanophysics, nanoelectronics, resistance measurement, van der Pauw method, Hall effect, thermal measurement, artifact measurement, Nernst effect, Shubnikov – de Haas effect

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРОВ В РАМКАХ ОБОБЩЕННОЙ МОДЕЛИ ТРАНСПОРТА ЭЛЕКТРОНОВ

Ю. А. Кругляк, М. В. Стриха

Аннотация. В методической статье, рассчитанной на исследователей, преподавателей и студентов высшей школы, обсуждаются экспериментальные методы измерения сопротивления в рамках обобщенной модели транспорта электронов Ландауэра – Датта – Лундстрема (ЛДЛ), в том числе в условиях внешнего приложенного магнитного поля: метод переменной длины проводника, четырехточечная схема измерений, классический метод измерения эффекта Холла и различные варианты метода ван дер Пау, а также температурные измерения и учет артефактов (эффект Нернста), измерения в сильных магнитных полях (эффект Шубникова – де Гааза).

Ключевые слова: нанофизика, нанoeлектроника, измерение сопротивления, метод ван дер Пау, эффект Холла, температурные измерения, учет артефактов, эффект Нернста, эффект Шубникова–де Гааза

1. Вступ

Продовжуючи знайомити вітчизняних викладачів, аспірантів і студентів, які читають курси або навчаються на різних спеціалізаціях фізичного й інженерного профілю, із сучасною концепцією викладання фізики наносистем, автором якої є проф. Супрійо Датта (Supriyo Datta), до певної міри альтернативною традиційній, що відштовхується від розгляду аналогічних явищ у великих об'ємних провідниках, ми розглянули в [1] модель Ландауера – Датта – Лундстрема (ЛДЛ), яка вже знайшла широке застосування при аналізі як електронного, так і фононного транспорту в резисторах як нанорозмірних, так і довгих чи об'ємних.

При цьому розгляд у [1] здійснювався для випадку, коли температура контактів резистора однакова. У [2] натомість ми розглянули термоелектричні ефекти Зеебека і Пельтьє в моделі ЛДЛ, а також якісно обговорили закон Відемана – Франца й основні рівняння термоелектрики з відповідними транспортними коефіцієнтами. Потому в [3] ми отримали доведення для результатів, постульованих у [2], причому зробили це для 1D, 2D і 3D провідників з довільним законом дисперсії і будь-яким режимом провідності: балістичним, дифузійним, або ж перехідним.

З позицій транспортної моделі Ландауера – Датта – Лундстрема у [4] побудовано узагальнену модель переносу тепла фононами. У [5] ми розглянули, як узагальнена транспортна модель ЛДЛ описує провідність графену. Надалі, в [6] ми розглянули роль розсіяння в моделі ЛДЛ й продемонстрували, що при описі транспорту електронів у провіднику в дифузійному режимі важливу роль відіграє середня довжина вільного пробігу ℓ , яка визначає коефіцієнт проходження τ . Нарешті, в [7] було розглянуто кінетичне рівняння Больцмана (КРБ), яке в застосуванні до наноелектроніки розв'язує ті ж завдання, що й узагальнена транспортна модель ЛДЛ. Ми продемонстрували: для одних задач краще використовувати КРБ, а для других – модель ЛДЛ.

Глибший розгляд інших аспектів використання моделі ЛДЛ читач знайде в [8-10]. Натомість цю нашу статтю присвячено методам вимірювання провідності й ефекту Холла в

слабких та сильних магнітних полях, зокрема й за наявності перепаду температур на контактах провідника. Ми також обговоримо, як уникнути при вимірюванні впливу артефактів, таких, як опір на контактах, та неконтрольованих термоелектричних ефектів, та продемонструємо, як здійснюється обробка результатів при конкретних вимірюваннях.

2. Основні вирази і співвідношення

Для характеристики матеріалу провідника в принципі потрібно виміряти всі чотири термоелектричні коефіцієнти [1-3]: провідність (чи опір), коефіцієнт Зеебека (або C_{oe}), коефіцієнт Пельтьє та електронну теплопровідність. Співвідношення Кельвіна дозволяє вимірювати або коефіцієнт Зеебека, або коефіцієнт Пельтьє. Техніка вимірювання коефіцієнта Зеебека достатньо складна, тому ми її тут не обговорюватимемо, відіславши читача натомість до [11]. Не простіше вимірювати й електронну теплопровідність, тому зазвичай її оцінюють через закон Відемана – Франца. В нашому огляді ми зосередимося на вимірюванні провідності.

Розглядатимемо струми в дифузійному режимі з рівнянням для густини струму

$$J_x = \sigma \frac{d(E_F/q)}{dx}. \quad (1)$$

Тут q – заряд електрона, σ – питома провідність, E_F – рівень Фермі (градієнт якого, як ми вважаємо, відмінний від 0 тільки вздовж осі x). При однорідному розподілі густини електронів $d(E_F/q)/dx = E_x$, тому

$$\begin{aligned} J_x &= \sigma E_x \\ E_x &= \rho J_x \end{aligned} \quad (2)$$

Тут $\rho = 1/\sigma$ – питомий опір. Зазвичай провідність або опір певного матеріалу вимірюють у дифузійному режимі, оскільки саме в такому режимі провідність залежить від матеріалу провідника, а не від його вимірності. Слід також зазначити, що вирази (1) і (2) однаково застосовні як для n -провідників, так і для p -провідників.

Вирази (1) і (2) застосовні до провідників різної вимірності (1D, 2D і 3D); для просто-

ти ми при цьому вважаємо, що просторова неоднорідність має місце тільки вздовж осі x . Одиниці вимірювання величин, однак, залежать від вимірності зразка, а саме:

$$\begin{aligned} 1D: & E_x \quad B/\text{м} \quad J_x \quad A \quad \rho \quad \text{Ом}/\text{м} \\ 2D: & E_x \quad B/\text{м} \quad J_x \quad A/\text{м} \quad \rho \quad \text{Ом} \\ 3D: & E_x \quad B/\text{м} \quad J_x \quad A/\text{м}^2 \quad \rho \quad \text{Ом} \cdot \text{м} \end{aligned} \quad (3)$$

Для 2D провідника питомий опір зазвичай називають поверхневим опором і як одиницю вимірювання використовують $\text{Ом}/\square$ (Ω/sq : Ohms per square), що має вимірність Ом.

Розгляньмо плоский резистор, з довжиною L і площею перерізу $A = Wt$, зображений на рис. 1.

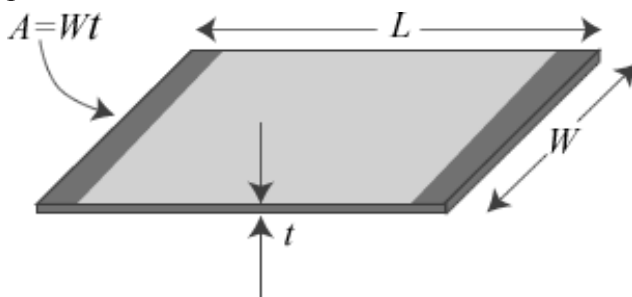


Рис. 1. Плоский провідник з товщиною t . Якщо більша від половини дебройлівської довжини хвилі для електрона, то можемо вважати рух електрона вздовж кожної з осей квазікласичним, а сам провідник – тривимірним; якщо ж мала порівняно з половиною довжини дебройлівської хвилі, то квазікласичний рух електронів можливий тільки в двох напрямках, в одному він квантований, і такий провідник називаємо двовимірним.

Для струму I , що протікає в напрямку x , маємо:

$$I = GV = \left(\sigma \frac{A}{L} \right) V = \left(\sigma \frac{Wt}{L} \right) V, \quad (4)$$

де G – повна провідність зразка, V – прикладена до нього напруга. При цьому для двовимірного випадку $\sigma_s = (nt)q\mu = n_s q\mu$ (де n_s – рухливість носіїв), і провідність

$$G = \sigma_s \left(\frac{W}{L} \right), \quad (5)$$

де $\sigma_s = 1/\rho_s$ – питома поверхнева провідність, а n_s – поверхнева концентрація електронів. Для 3D зразка $G = \sigma A/L$, а для 1D провідника $G = \sigma/L$ [1].

Алгоритм обчислення поверхневої провідності плоского провідника товщини t залежить від того, чи поведуть себе електрони в провіднику як 3D об'єкти (квазікласичний рух дозволено вздовж трьох осей), чи як 2D об'єкти (квазікласичний рух дозволено тільки вздовж самої поверхні, перпендикулярно до поверхні рух квантово обмежений). Якщо t достатньо велике (більше від половини довжини дебройлівської хвилі електрона), тоді квантове обмеження на рух перпендикулярно до поверхні слабе, й електрони можна розглядати як 3D частинки. Тоді поверхнева провідність в режимі малого відхилення від рівноваги визначатиметься як [1]

$$\sigma_s = \frac{2q^2}{h} \int t M_{3D}(E) \lambda(E) \left(-\frac{\partial f_0}{\partial E} \right) dE. \quad (6)$$

Тут M – питома кількість мод провідності, що відповідають енергії E , яке припадає на одиницю площі перерізу A , L – довжина вільного пробігу, що так само залежить від

енергії, $f_0 = \frac{1}{e^{(E-E_F)/kT} + 1}$ – рівноважна Фермі-Дірака функція розподілу електронів. Саме таке припущення ($n_s = nt$) ми використали при переході від (4) до (5), де n_s – тривимірна концентрація електронів у 3D зразку.

Якщо ж товщина зразка t достатньо мала (менша від половини довжини дебройлівської хвилі електрона), то квантове обмеження на рух перпендикулярно до поверхні сильне, і такий рух уже не можна вважати квазікласичним; тоді електрони слід розглядати як 2D частинки, й поверхнева провідність [1]

$$\sigma_s = \frac{2q^2}{h} \int M_{2D}(E) \lambda(E) \left(-\frac{\partial f_0}{\partial E} \right) dE. \quad (7)$$

Нагадаємо, що $M = M A$ – це питома кількість мод провідності, що дорівнює числу мод провідності, яке припадає на одиницю площі поперечного перерізу 3D провідника, а $M = M W$ – це питома кількість мод провідності, що дорівнює числу мод провідності, яке припадає на одиницю довжини поперечно-

го (перпендикулярного до напрямку струму) перерізу 2D провідника. Якщо режим транспорту в провіднику квазібалістичний, то середню довжину вільного пробігу $\lambda(E)$ слід замінити її формальним значенням [1, 10].

Як видно з (6) та (7), провідність залежить від розташування рівня Фермі, яке в свою чергу залежить від концентрації електронів. Таким чином, у кінцевому підсумку провідність залежить від поверхневої концентрації електронів, $\sigma_s(n_s)$. Вимірявши експериментально залежність питомої провідності від концентрації електронів, знайдемо рухливість електронів μ , з $\sigma_s = n_s q \mu$. Звичайно, слід пам'ятати, що вирази (6) і (7) однаково застосовні як для n -провідників, так і для p -провідників.

3. Огляд методів вимірювання опору (провідності)

Розглянемо найпростішу задачу вимірювання опору R_{ch} матеріалу, з якого виготовлено резистор завдовжки L (рис. 2): $R_{ch} = \rho_s L / W$.

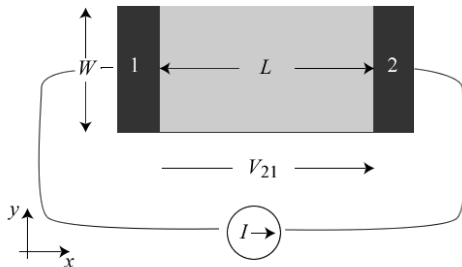


Рис. 2. Плоский резистор з двома металічними контактами 1 і 2.

При подачі струму на контакт 2 і виведенні його з контакту 1 вимірюється різниця потенціалів V_{21} . Звідси одержуємо

$$R = \frac{V_{21}}{I} = R_{ch} + 2R_c, \quad (8)$$

де R_c – опір контакту метал/напівпровідник. Отже, виміряний опір включає в себе опір контакту. Потрібно або окремо виміряти опір контакту, або виконати вимірювання за такою схемою, яка виключить опір контактів.

Спершу розглянемо перший варіант вимірювання. Він відомий як метод змінної довжини провідника Transmission Line Method (TLM) [12]. Використовують плоский резистор з контактами 1, 2, 3, ..., розташованими на різній відстані один від одного (рис. 3).

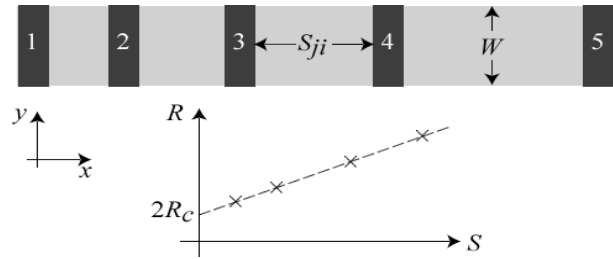


Рис. 3. Контакти розташовані, наприклад, на все більшій відстані S_{ji} один від одного. Зображено типовий графік залежності опору від відстані між контактами.

Якщо відкласти виміряний опір $R_{ji} = V_{ji} / I$ як функцію відстані між двома сусідніми контактами S_{ji} , одержимо пряму лінію (рис. 3)

$$R_{ji} = \frac{V_{ji}}{I} = 2R_c + \rho_s \frac{S_{ji}}{W}. \quad (9)$$

З нахилу прямої лінії одержуємо питомий опір, а відрізок, який відтинається на осі опорів, дає опір контакту [12].

Тепер розглянемо другий варіант вимірювання опору з виключенням опору контактів шляхом застосування чотириточкової схеми вимірювання (рис. 4).

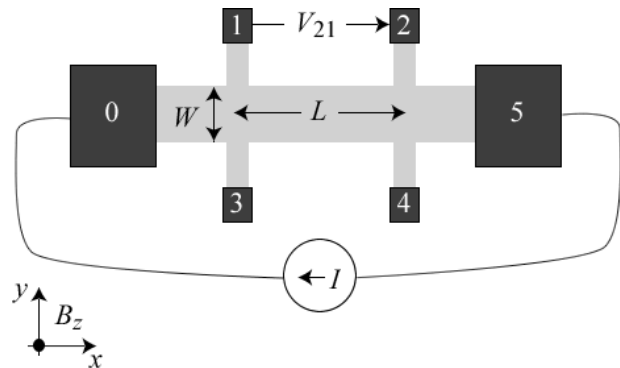


Рис. 4. Чотириточкова схема вимірювання опору, яка використовується також для вимірювання ефекту Холла (холлівська лінійка).

Контакти 0 та 5 використовують для підведення струму, а контакти 1 і 2, або ж 3 і 4 використовують для вимірювання напруги. Якщо використати вольтметр з великим імпедансом, то струм між контактами 1 і 2 (або ж 3 і 4) відсутній. Отже, падіння напруги на межі контактів з досліджуваним провідником немає, і, зна-

ючи силу струму, ми можемо одержати чистий опір матеріалу провідника:

$$R = \frac{V_{21}}{I} = \rho_s \frac{L}{W}. \quad (10)$$

Докладні відомості про ці широко застосовувані вимірювальні схеми можна знайти в [13, 14]. Але надалі нам потрібно визначити ще й поверхневу концентрацію електронів.

4. Вимірювання ефекту Холла

Якщо в чотириточковій вимірювальній схемі (рис. 4) струм подати в напрямі $+x$, магнітне поле прикласти в напрямі $+z$, а напругу міряти в напрямі $+y$ між контактами 1 і 3, або 2 і 4, то результуюча холлівська напруга буде позитивною для n -провідників і негативною для p -провідників. Ця схема вимірювань дозволяє визначити поверхневу концентрацію електронів.

Оскільки струм протікає в напрямку $+x$, то електрони рухаються в напрямку $-x$ з середньою швидкістю, яка визначається співвідношенням $I_x = Wn_s q \langle v_x \rangle$ (рис. 5).

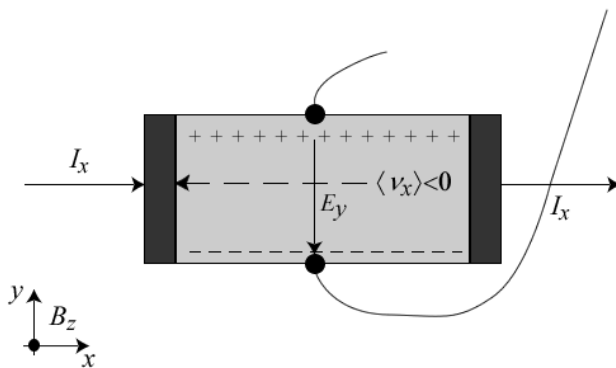


Рис. 5. Ефект Холла й вимірювання холлівської напруги

Магнітна складова сили Лоренца $\vec{F} = -q\vec{v} \times \vec{B}$ (діє на електрони в напрямі $-y$) призводить до накопичення електронів на нижній стороні 2D провідника, а на верхній стороні виникає дефіцит електронів, що в свою чергу породжує електричне поле в напрямку $-y$, що компенсує дію магнітного поля. Відповідну напругу $V_H = -WE_y$ називають холлівською.

Аналіз ефекту Холла почнімо з виразу [7]

$$\vec{J} = \sigma_s \vec{E} - \sigma_s \mu r_H [\vec{E} \times \vec{B}], \quad (11)$$

де r_H – холлівський фактор. Вираз (11) надалі зручно записати покомпонентно:

$$\begin{aligned} J_x &= \sigma_s E_x - \sigma_s \mu r_H E_y B_z \\ J_y &= \sigma_s E_y + \sigma_s \mu r_H E_x B_z \end{aligned} \quad (12)$$

й переписати щодо електричного поля:

$$\begin{aligned} E_x &= \rho_s J_x + (\rho_s \mu r_H B_z) J_y, \\ E_y &= \rho_s J_y - (\rho_s \mu r_H B_z) J_x. \end{aligned} \quad (13)$$

Оскільки в описаних вище експериментальних умовах $J_y = 0$, то з другого рівняння маємо:

$$E_y = -\frac{r_H B_z J_x}{q n_s}, \quad (14)$$

що можна переписати в вигляді

$$R_H \equiv \frac{E_y}{B_z J_x} = \frac{r_H}{(-q)n_s} = \frac{1}{(-q)n_H}, \quad (15)$$

де r_H – коефіцієнт Холла, а

$$n_H \equiv \frac{n_s}{r_H} \quad (16)$$

називають холлівською концентрацією. Нагадаємо, що холлівський фактор [7]

$$r_H \equiv \frac{\langle \langle \tau^2 \rangle \rangle}{\langle \langle \tau \rangle \rangle^2} \quad (17)$$

близький до одиниці (дещо більший від неї) і його значення визначається механізмом розсіювання в провіднику.

Нарешті, запишемо коефіцієнт Холла через експериментально вимірювану холлівську напругу $V_H = -WE_y$ і струм $I = WJ$, а саме:

$$R_H = \frac{-V_H}{IB_z} = \frac{1}{(-q)n_H}. \quad (18)$$

Отже, експериментально вимірюваний коефіцієнт Холла прямо пов'язаний з холлівською концентрацією (для p -провідників $(-q)$ замінюємо на $(+q)$). Холлівську концентрацію зазвичай наводять як поверхневу концентрацію

електронів. Слід, однак, пам'ятати, що насправді холлівська концентрація і поверхнева концентрація електронів пов'язані між собою виразом (16).

4.1. Приклад аналізу результатів холлівського експерименту

Проаналізуємо подальші результати вимірювання ефекту Холла на холлівській лінійці (рис. 4):

$$L = 100 \text{ мкм}, \quad W = 50 \text{ мкм}, \quad I = 1 \text{ мкА},$$

$$B_z = 0.2 \text{ Тл}, \quad V_{21}|_{B_z=0} = 0.54 \text{ мВ}, \quad V_{24}|_{B_z=0.2 \text{ Тл}} = 0.13 \text{ мВ}.$$

З цих результатів можна одержати опір досліджуваного зразка, визначити, чи це провідник *n*- чи *p*-типу, знайти поверхневу концентрацію електронів (точніше, холлівську концентрацію) й рухливість (точніше, холлівську рухливість).

За відсутності магнітного поля

$$R_{xx} = V_{21} / I = 540 \text{ Ом}. \quad (19)$$

Оскільки вимірний опір $R_x = \rho_s L / W$ пропорційний питомому поверхневому опору, то

$$\rho_s = 270 \text{ Ом/□}. \quad (20)$$

Виміряна холлівська напруга V_{24} позитивна, тому маємо провідник *n*-типу. З виразу (18) знаходимо коефіцієнт Холла

$$R_H = \frac{-V_{24}}{IB_z} = -650 \text{ м}^2/\text{Кл} \quad (21)$$

і далі холлівську концентрацію

$$n_H = r_H n_s = 9.6 \times 10^{15} \text{ м}^{-2} = 9.6 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}. \quad (22)$$

Далі, для питомої поверхневої провідності маємо:

$$\sigma_s = \frac{1}{\rho_s} \equiv n_s q \mu = n_H q \mu_H, \quad (23)$$

звідки для холлівської рухливості одержуємо

$$\mu_H = r_H \mu = 24100 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}. \quad (24)$$

Можна припустити той або інший механізм розсіяння, знайти холлівський фактор і визначити справжні значення поверхневої концентрації електронів та їхньої рухливості. Але одержані таким чином значення і містять певну невизначеність, пов'язану з вибором моделі розсіяння. Тому зазвичай наводять просто холлівські концентрацію та рухливість. Описаний вище ефект Холла називають також класичним ефектом Холла, щоб відрізнити його від аномального ефекту Холла в феромагнетиках і спінового ефекту Холла [25], розгляд яких виходить за межі нашої статті.

5. Метод вимірювання ван дер Пау

Метод ван дер Пау дозволяє виміряти опір і холлівські ефекти для плоского зразка довільної форми [13, 14, 15], не застосовуючи холлівську лінійку (рис. 6).

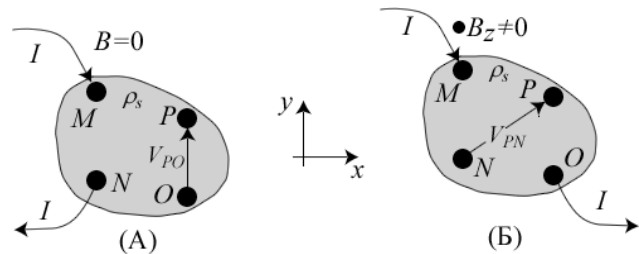


Рис. 6. Метод вимірювання ван дер Пау: (А) схема вимірювання опору; (Б) схема вимірювання ефекту Холла.

Досліджуваний зразок перебуває в площині *xy*. Він може мати довільну форму, але мусить бути однорідним з ізотропною провідністю й не мати отворів. Контакти мають бути точковими й міститися на периметрі зразка. При вимірюванні опору струм подається на два сусідні контакти, наприклад, М і N, а напругу міряють між двома іншими контактами Р і О (рис. 6А). Вимірний таким чином опір

$$R_{MN,OP} = \frac{V_{PO}}{I}$$

дозволяє визначити питомий поверхневий опір.

При вимірюванні ефекту Холла магнітне поле скеровують перпендикулярно до зразка, струм подають на два протилежні контакти, наприклад, М і О, а напругу вимірюють між

двома іншими контактами N і P. Вимірний опір

$$R_{MO, NP} = \frac{V_{PN}}{I} \quad (25)$$

дозволяє визначити холлівську напругу.

Аналіз вимірної схеми ван дер Пау почнімо з виразів (13)

$$\begin{aligned} E_x &= \rho_s J_x + (\rho_s \mu r_H B_z) J_y, \\ E_y &= \rho_s J_y - (\rho_s \mu r_H B_z) J_x. \end{aligned}$$

Різниця потенціалів між контактами N і P – це інтеграл за траєкторією

$$V_{PN}(B_z) = -\int_N^P \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int_N^P (E_x dx + E_y dy). \quad (26)$$

Холлівська напруга визначається як

$$V_H \equiv \frac{1}{2} [V_{PN}(+B_z) - V_{PN}(-B_z)]. \quad (27)$$

Підставляючи (13) в (26), знаходимо

$$V_H = \rho_s \mu_H B_z \left(\int_{y_N}^{y_P} J_x dy - \int_{x_N}^{x_P} J_y dx \right). \quad (28)$$

Струм, що входить у контакт M і виходить з контакту O, перетинає уявну траєкторію між контактами N і P. Закон збереження струму вимагає, щоб

$$I = \int \vec{J} \cdot \hat{n} dl, \quad (29)$$

де $\hat{n}$ – одиничний вектор, нормальний до траєкторії, що пов'язує точки N і P, для якого

$$\hat{n} dl = d\vec{l} \times \hat{z} = dy \hat{x} - dx \hat{y}. \quad (30)$$

Підставляючи (30) до (29), знаходимо

$$I = \int_{y_N}^{y_P} J_x dy - \int_{x_N}^{x_P} J_y dx, \quad (31)$$

і, згідно з (28), остаточно

$$V_H = \rho_s \mu_H B_z I. \quad (32)$$

Таким чином, геометрія схеми ван дер Пау справді дозволяє виміряти ефект Холла.

Перейдімо до вимірювання опору за ван дер Пау. На рис. 7 схемі вимірювання опору за ван дер Пау (рис. 6А) поставлена у відповідність простіша для аналізу геометрія контак-

тів, розташованих у ряд на краю нескінченної півплощини.

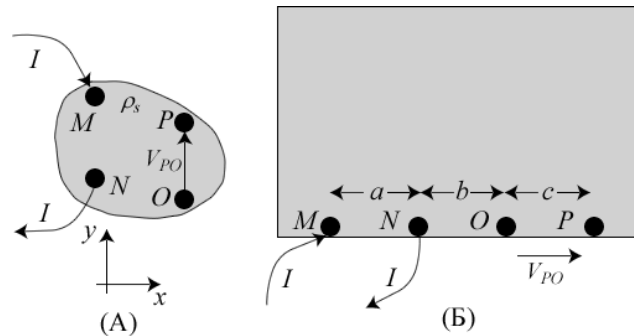


Рис. 7. Порівняння геометрії схеми (А) вимірювання опору за ван дер Пау з уявною схемою (Б) розташування контактів на краю нескінченної півплощини, яка дає ті ж самі результати вимірювання, що й схема (А) за цілком припустимих обмежень, що накладаються на досліджуваний об'єкт [15].

Ван дер Пау, використовуючи техніку конформних перетворень, довів, що результати вимірювань в обох схемах (А) і (Б) рис. 7 ідентичні за умови, що досліджуваний матеріал провідника однорідний, ізотропний і не містить отворів [10].

Розгляньмо, що відбувається при входженні струму в точковий контакт M нескінченної півплощини (рис. 7Б). Струм розходить-ся радіально щодо точки входження з густиною й полем

$$J_r = \frac{I}{\pi r}, \quad E_r = \frac{I \rho_s}{\pi r}, \quad (33)$$

де r – модуль радіус-вектора до довільної точки півплощини, який бере початок у точці входження струму. Інтегруючи від r_0 до r , знаходимо потенціал електричного поля, створеного струмом,

$$V(r) - V(r_0) = -\frac{I \rho_s}{\pi} \ln \left(\frac{r}{r_0} \right). \quad (34)$$

Тепер можна написати (див. рис. 7), що

$$\begin{aligned} V(P) &= -\frac{I \rho_s}{\pi} \ln \left(\frac{a+b+c}{r_0} \right), \\ V(O) &= -\frac{I \rho_s}{\pi} \ln \left(\frac{a+b}{r_0} \right), \\ V_{PO} &= V(P) - V(O) = -\frac{I \rho_s}{\pi} \ln \left(\frac{a+b+c}{a+b} \right). \end{aligned} \quad (35)$$

Маємо ще втрату в потенціалі, зумовлену струмом, який виходить з контакту N, а саме:

$$V_{PO}^{(N)} = + \frac{I \rho_s}{\pi} \ln \left(\frac{b+c}{b} \right). \quad (36)$$

Різниця потенціалів між контактами О і Р – це сума обох вкладів. Після ділення її на струм одержимо опір

$$R_{MN,OP} = \frac{V_{PO} + V_{PO}^{(N)}}{I} = \frac{\rho_s}{\pi} \ln \left[\frac{(a+b)(b+c)}{b(a+b+c)} \right], \quad (37)$$

який залежить від геометрії контактів. Опір визначається послідовністю його індексів у (37): струм входить у контакт М, залишає зразок через контакт N, різниця потенціалів вимірюється між контактами О і Р з Р як позитивним терміналом. Тепер подамо струм через контакт N й виведемо його через контакт О, а різницю потенціалів вимірюємо між контактами Р і М. Тоді для опору маємо:

$$R_{NO,PM} = \frac{\rho_s}{\pi} \ln \left[\frac{(a+b)(b+c)}{ac} \right]. \quad (38)$$

Комбінуючи (37) і (38), одержимо вираз, який не залежить від геометрії контактів:

$$\exp \left(- \frac{\pi}{\rho_s} R_{MN,OP} \right) + \exp \left(- \frac{\pi}{\rho_s} R_{NO,PM} \right) = 1. \quad (39)$$

Аналогічний результат ван дер Пау одержав для геометрії рис. 7А.

Отже, метод вимірювання опору за ван дер Пау виглядає так: ми вимірюємо опір (рис. 6А), скеровуючи струм крізь сусідні контакти М і N, а різницю потенціалів вимірюємо між двома іншими контактами О і Р: $R_{MN,OP} = V_{PO} / I$. Потім здійснюємо аналогічне вимірювання, пропускаючи струм через контакти N і О, а різницю потенціалів вимірюючи між Р і М: $R_{NO,PM} = V_{PM} / I$. Використовуючи два одержані результати вимірювань, розв'язуємо рівняння (39) для визначення питомого поверхневого опору. Зразок, використовуваний в експерименті, може не мати якоїсь спеціальної форми, а контакти можуть розташовуватися більш або менш довільно й на різних відстанях один від одного. Для квадратного зразка $a = b = c$ і $R_{MN,OP} = R_{NO,PM} = V/I$, так що розв'язок рівняння (39) спрощується до

$$\rho_s = \frac{\pi V}{\ln 2 I} \quad (40)$$

і немає потреби розв'язувати трансцендентне рівняння (39) методом ітерацій, або чисельно.

Для вимірювання ефекту Холла (рис. 6Б) направимо магнітне поле в напрямку +z, струм проведемо між двома несусідніми контактами М та О, виміряємо різницю потенціалів між двома іншими контактами N та Р. Змінимо напрям магнітного поля і виміряємо ту ж саму різницю потенціалів. Згідно з (32), середнє значення цих двох вимірів є холлівська напруга, яка дозволяє далі вирахувати холлівські коефіцієнт, концентрацію і рухливість.

Холлівська лінійка й геометрія ван дер Пау – це два різні способи виконати одне й те ж саме вимірювання. Метод ван дер Пау з квадратним розташуванням контактів (див. (40)) особливо зручний.

6. Температурні вимірювання

Вимірювання опору й ефекту Холла при різних температурах зразка дозволяє пролити світло на фізику процесів розсіяння в провіднику. Зазвичай будують графік залежності рухливості від температури (рис. 8А).

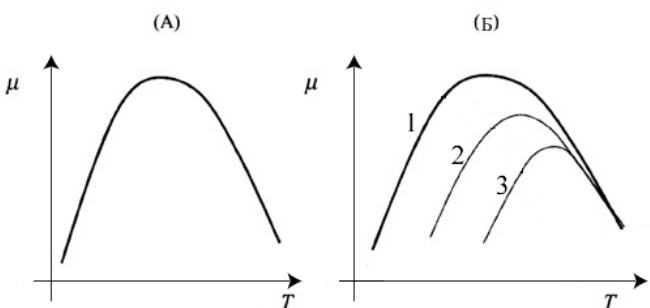


Рис. 8. Типова залежність рухливості від температури: (А) Характерний вигляд $\mu(T)$; (Б) Зсув $\mu(T)$ для трьох зразків з дедалі більшою концентрацією заряджених домішок

Якщо рухливість визначили з холлівських вимірювань, то на осі ординат відкладено фактично холлівську рухливість. З підвищенням температури рухливість спершу зростає, а потім виходить на плато й починає зменшуватися.

тися. Збільшення рухливості зі збільшенням температури зазвичай пов'язують із розсіянням електронів на заряджених чи іонізованих домішках, а дальший спад – з розсіянням на фононах. Якщо діють одночасно два механізми розсіяння – на іонізованих домішках і на фононах – то експериментально визначена рухливість якісно описується правилом Матіессена [16, 17]:

$$\frac{1}{\mu_{obs}} = \frac{1}{\mu_{ii}} + \frac{1}{\mu_{ph}}, \quad (41)$$

яке показує: спостережувану рухливість контролює менша з тих двох рухливостей, які визначаються різними механізмами розсіяння.

Щоб зрозуміти причину збільшення рухливості зі збільшенням температури, звернімося до рис. 3 в [6]. Заряджені домішки народжують випадкові флуктуації потенціалу дна зони провідності, які стають випадково розташованими центрами розсіяння. Чим вища кінетична енергія електронів, тим вище електрони розташовані за шкалою енергій над дном зони провідності й тим менше відчувають флуктуації його потенціалу (й, відповідно, тим менше розсіюються). Отже, час розсіяння повинен зростати зі збільшенням енергії носіїв. Оскільки середня кінетична енергія невинроджених носіїв струму в провіднику пропорційна kT , то час розсіяння, а, відповідно, й рухливість $\mu = q\tau m^*$, повинні зростати з підвищенням температури. Кількісний опис залежності рухливості від температури передбачає усереднення належним чином залежності часу розсіяння від енергії $\tau(E - E_c)$ згідно з (48) в [6]. В 3D-провідниках розсіяння на заряджених домішках призводить до температурної залежності часу розсіяння $\sim T^{3/2}$ [16]. Важливе подальше: щойно експерименти показують зростання рухливості зі збільшенням температури, це означає, що участь у розсіянні беруть заряджені домішки.

Зменшення рухливості при високих температурах найчастіше спричинене розсіянням на фононах. Оскільки квазічастинки фонони є бозонами з нульовим хімічним потенціалом, їхнє число в одиниці фазового об'єму залежить від температури, а швидкість розсіяння, відтак, пропорційна числу фононів

$$\frac{1}{\tau(E)} \propto n_{ph}, \quad (42)$$

яке визначається статистикою Бозе – Ейнштейна:

$$n_{ph}(\hbar\omega) = \frac{1}{e^{\hbar\omega/kT} - 1}. \quad (43)$$

В ковалентних напівпровідниках (германій, кремній) домінує розсіяння на акустичних фононах. Спираючись на закони збереження енергії та імпульсу, можна показати, що основний вклад дають низькоенергетичні фонони. З урахуванням цього

$$e^{\hbar\omega/kT} \approx 1 + \hbar\omega/kT,$$

так що число фононів в одиниці фазового простору зростає з температурою лінійно,

$$n_{ph}(\hbar\omega) \approx \frac{kT}{\hbar\omega}.$$

$$\text{Тоді з (42) випливає, що } \tau \propto \frac{1}{kT},$$

й тому рухливість повинна зменшуватися з підвищенням температури. Уточнення показника степені при температурі вимагає коректного усереднення часу розсіяння за енергією. В [16] показано, що в 3D провідниках

$$\mu \propto T^{-3/2}.$$

В полярних напівпровідниках (матеріали групи A^3B^5) в розсіянні домінують оптичні фонони з енергією $\hbar\omega \approx kT$ при кімнатній температурі (20-30 *meV*). В цьому випадку експоненту в бозевському розподілі (43) вже не можна розкласти за малим показником степені, й слід використовувати (43) безпосередньо. Таким чином, у полярних напівпровідниках рухливість зменшується з підвищенням температури за експонентою [16].

На рис. 8Б показано тенденцію до зменшення максимально досяжної рухливості в трьох зразках, характеризованих дедалі більшою концентрацією заряджених домішок. Мірою збільшення рухливості з підвищенням температури домінантна роль розсіяння на заряджених домішках поступово нівелюється в конкуренції з розсіянням на фононах. Рухливість досягає свого максимуму при рівній інтенсив-

ності двох механізмів розсіювання. При подальшому підвищенні температури загальна рухливість зменшуватиметься, бо розсіювання на фонах дедалі більшою мірою переважатиме над розсіюванням на заряджених домішках. Досягнення максимуму рухливості контролюється розсіюванням на заряджених домішках. Чим більша концентрація заряджених домішок у зразку, тим вища температура потрібна для народження такої кількості фононів, розсіювання на яких має ту ж інтенсивність, що й розсіювання на заряджених домішках. При цьому величина максимуму рухливості робиться дедалі менша, а сам максимум зсувається в бік вищих температур. Вимірювання рухливості при низьких температурах дозволяє оцінити загальну концентрацію заряджених домішок у провіднику. Зазначмо, що описана вище картина суттєво ускладниться, коли провідність напівпровідника має амбіполярний характер (струм проводять як електрони, так і дірки). Докладніше обговорення практики вимірювання електрофізичних властивостей провідників в умовах квазірівноважного режиму транспорту можна знайти в [13, 14].

6.1. Температурний артефакт при вимірюванні ефекту Холла (ефект Нернста)

Повернімося до холлівської лінійки на рис. 4. Струм подається на контакт 0 і залишає провідник через контакт 5. Слід очікувати охолодження контакту 5 і нагрівання контакту 0 внаслідок ефекту Пельтьє [2]. Раніше ми «за умовчанням» вважали, що вимірювання здійснюються в ізотермічних умовах. Якщо ж підкладинка холлівської лінійки не має достатньої здатності для тепловідведення, то може виникнути градієнт температури в напрямку осі x . Як це позначиться на вимірюванні ефекту Холла?

Повернімося до транспортних рівнянь в оберненій формі для 3D провідника в дифузійному режимі [3]:

$$\frac{d(E_F / q)}{dx} = \rho J_x + S \frac{dT}{dx}, \quad J_{Qx} = TSJ_x - \kappa \frac{dT}{dx}$$

й перепишемо їх в індексних позначеннях [7]:

$$E_i = \rho_{ij}(\vec{B})J_j + S_{ij}(\vec{B})\partial_j T, \\ J_{Qi} = \pi_{ij}(\vec{B})J_j - \kappa_{ij}(\vec{B})\partial_j T. \quad (44)$$

В ізотропному напівпровіднику всі чотири транспортні тензори діагональні, однак, у присутності магнітного поля з'являються недіагональні компоненти тензора. В слабких магнітних полях діагональні компоненти тензора не змінюються, а недіагональні компоненти з'являються з векторних добутоків сили Лоренца. Для матеріалів з кубічною симетрією транспортні коефіцієнти в присутності слабого магнітного поля можна записати так:

$$\rho_{ij}(\vec{B}) = \rho_0 + \rho_0 \mu_H \epsilon_{ijk} B_k + \dots, \\ S_{ij}(\vec{B}) = S_0 + S_1 \epsilon_{ijk} B_k + \dots, \\ \pi_{ij}(\vec{B}) = \pi_0 + \pi_1 \epsilon_{ijk} B_k + \dots, \\ \kappa_{ij}(\vec{B}) = \kappa_0 + \kappa_1 \epsilon_{ijk} B_k + \dots. \quad (45)$$

Кожний з транспортних коефіцієнтів у слабкому магнітному полі має ту ж саму структуру в вигляді суми діагональної компоненти, позначеної індексом 0, і недіагональних компонент, які виникають з векторного добутку сили Лоренца й контролюються за знаком і за відмінністю від нуля символом Леві-Чівіта [7]. За винятком питомого опору, для якого $\rho_1 = \rho_0 \mu_H$, для решти термоелектричних коефіцієнтів недіагональні компоненти не розкриті, їм просто надано індекс 1.

Повернімося до питання, як впливає температурний градієнт в напрямку x на вимірювану холлівську напругу. З рівняння (44) одержуємо:

$$E_y = \rho_0 J_y + \rho_0 \mu_H \epsilon_{yjk} B_k J_j + S_0 \partial_y T + S_1 \epsilon_{yjk} B_k \partial_y T. \quad (46)$$

Умови проведення експерименту такі, що струм скеровано тільки вздовж осі x , а магнітне поле направлене вздовж осі z . Припустімо також, що градієнт температури вздовж осі y відсутній. За таких умов замість (46) маємо:

$$E_y = +\rho_0 \mu_H \epsilon_{yxz} B_z J_x + S_1 \epsilon_{yxz} B_z \partial_x T. \quad (47)$$

Нарешті, використовуючи значення символу Леві-Чівіта $\epsilon_{yxz} = -1$ [7], одержуємо

$$E_y = -\rho_0 \mu_H B_z J_x - S_1 B_z \partial_x T. \quad (48)$$

Перший доданок – це чистий ефект Холла. Натомість другий доданок – артефакт, спричинений градієнтом температури в напрямку x , який був створений струмом у тому ж напрямку, і який народжує додаткову компоненту електричного поля в напрямку y (ефект Нернста). З (48) випливає, що при одночасній зміні напрямку струму й магнітного поля на протилежні, доданок, що відповідає за ефект Холла, знаку не змінює, а другий доданок – змінює знак на протилежний. Таким чином, вимірявши холлівську напругу, а потім перемкнувши напрямки електричного й магнітного полів на протилежні, вимірявши холлівську напругу ще раз, і взявши середнє зі значень двох вимірювань, можна позбутися цього артефакту. Однак, це перемикання слід зробити достатньо швидко, щоб градієнт температури $\partial T / \partial x$ не встиг змінити свій знак.

Слід завжди пам'ятати: такі термомагнітні ефекти можуть спотворити інтерпретацію результатів холлівських вимірювань [16, 18]. Навіть за відсутності магнітного поля поздовжній температурний градієнт, викликаний ефектом Пельтьє, може спотворити результати вимірювання опору.

7. Вимірювання в сильних магнітних полях

При розв'язуванні кінетичного рівняння Больцмана з урахуванням магнітного поля [7] ми вважали, що магнітне поле слабе, і виконується нерівність

$$\omega \tau \ll 1, \quad (49)$$

де для параболічного закону дисперсії циклотронна частота

$$\omega_c = \frac{qB}{m^*}. \quad (50)$$

З (49) і (50) випливає умова слабкості магнітного поля

$$. \quad (51)$$

Нижче ми коротко обговоримо три питання: 1) фізичний зміст умови слабкості магнітного поля (49); 2) циклотронна частота для довільного закону дисперсії $E(k)$; 3) вплив величини магнітного поля на результати вимірювань.

Повторимо стисло викладку, наведену нами раніше в [5]. На рис. 9 зображено траєкторія руху електрона в площині k_x під дією магнітного поля, направлено вздовж осі $+z$.

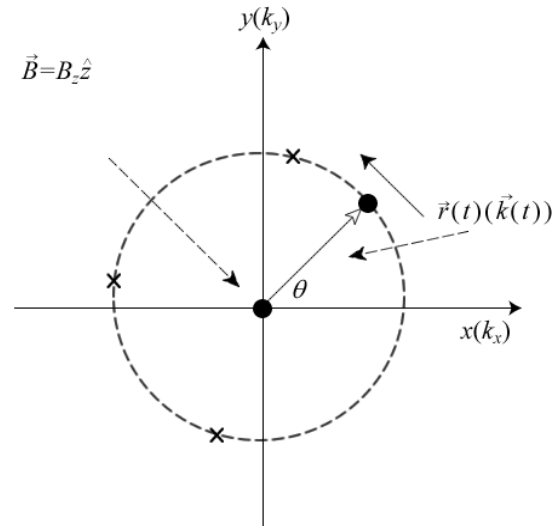


Рис. 9. До обчислення циклотронної частоти. Хрестиками на траєкторії позначено акти розсіяння. $\hat{z}$ - орт у напрямку осі z .

Період обертання по орбіті дорівнює $T = 2\pi/\omega_c$, тому умова слабкості магнітного поля (49) еквівалентна . В слабких магнітних полях період обертання електрона набагато перевищує час між двома послідовними зіткненнями, тож електрон рідко має нагоду замкнути свою колову орбіту. В сильних магнітних полях і електрони, перше, ніж зазнати розсіяння, встигають здійснити один, чи й декілька обертів навколо напрямку магнітного поля.

Рівняння руху електрона (рис. 9) – це

$$\frac{d(\hbar \vec{k})}{dt} = -q\vec{v} \times \vec{B}, \quad (52)$$

або ж покомпонентно

$$\begin{aligned} \hbar \frac{dk_x}{dt} &= -qv_y B_z, \\ \hbar \frac{dk_y}{dt} &= +qv_x B_z, \end{aligned}$$

що дає (рис. 9):

$$\begin{aligned} \hbar k \frac{d(\cos \theta)}{dt} &= -q(v \sin \theta) B_z, \\ \hbar k \frac{d(\sin \theta)}{dt} &= +q(v \cos \theta) B_z. \end{aligned} \quad (53)$$

Диференціюючи за часом перше з рівнянь (53) і використовуючи друге рівняння, одержимо

$$\frac{d^2(\cos \theta)}{dt^2} = -\omega_c^2 \cos \theta, \quad (54)$$

де циклотронна частота для довільної, але ізотропної зонної структури

$$\omega_c = \frac{qv}{\hbar k} B_z \quad (55)$$

Для параболічного закону дисперсії

$$v = \frac{\hbar k}{m^*},$$

що й дає вираз для циклотронної частоти (50). Вираз (55) використовують для знаходження циклотронної частоти в графені [5].

Розгляньмо декілька типових прикладів. У слабколегованому Si при кімнатній температурі рухливість складає порядку $1000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. У поширеного лабораторного магніту $B = 0.2 \text{ Тл}$, тож $\mu B \approx 0.02 \ll 1$, й ми гарантовано перебуваємо в режимі слабого магнітного поля. Не складно придбати магніт з полем, більшим на порядок, але ми все ще перебуватимемо в режимі слабких полів. Для роботи в режимі сильного магнітного поля потрібні магніти з полем, більшим на два порядки (приблизно 20 Тл і вище). Такі потужні магніти рідко використовують у рутинних дослідках.

Ситуація цілком інша для провідників з високою рухливістю, наприклад, для напівпровідників групи III–V чи для модуляційно-легованих гетероструктур. Для прикладу розгляньмо потрійну сполуку InGaAs при 300 К . У ній рухливість електронів складає приблизно $10^4 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Тоді для стандартного лабораторного магніту з $B = 0.2 \text{ Тл}$ добуток $\mu B \approx 0.2 < 1$ й ми все ще перебуваємо в режимі слабого поля. Якщо знизити температуру зразка до 77 К , або ще нижче, то цілком можна досягнути рухливості $10^5 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ і вище. Тоді $\mu B \approx 2 > 1$ й режим сильного магнітного поля вже реалізується поширеними лабораторними магнітами. В сильних полях можуть мати місце цікаві нові ефекти.

Звернімося до рівняння (54). Воно описує гармонійні коливання. Рівні енергії гармонійного осцилятора квантуються як:

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) \hbar \omega_c. \quad (56)$$

Рівні енергії, описувані (56), називають рівнями Ландау.

Розгляньмо 2D провідник у магнітному полі. За відсутності магнітного поля густина станів запишеться як ([1], рис. 10А)

$$D_{2D}(E) = g_v \frac{m^*}{\pi \hbar^2}, \quad (E > \varepsilon_1) \quad (57)$$

де ε_1 – дно першої підзони, при цьому ми вважаємо, що вищі підзони не заповнені, ε_1 – долинне виродження напівпровідника.

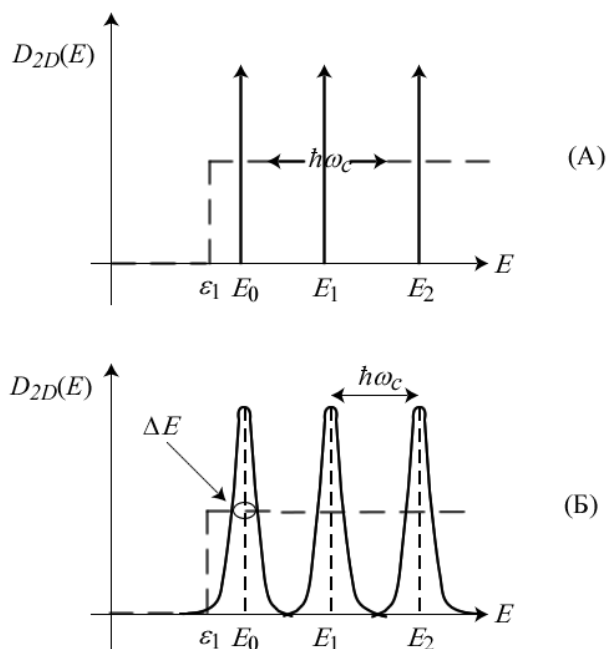


Рис. 10. Магнітне поле змінює густину станів 2D провідника: (А) Розсіяння відсутнє; (Б) Розсіяння розширює рівні Ландау.

За присутності сильного магнітного поля рух електрона стає квантований за всіма трьома напрямками і густина станів визначається сумою δ -функцій [10]:

$$D_{2D}(E, B_z) = D_0 \sum_{n=0}^{\infty} \delta \left[E - \varepsilon_1 - \left(n + \frac{1}{2}\right) \hbar \omega_c \right], \quad (58)$$

де D_0 – виродження одного рівня Ландау. Оскільки відстань між рівнями Ландау $\hbar\omega_c$, виродження одержимо множенням цієї енергетичної відстані на густину станів (57):

$$D_0 = \hbar \omega_c \left(g_v \frac{m^*}{\pi \hbar^2} \right) = g_v \frac{2qB_z}{h}. \quad (59)$$

Розсіяння розширює рівні Ландау (рис. 10Б). Ширина кожного рівня визначається співвідношенням невизначеностей $\Delta E \Delta t \approx \hbar$. Поклавши близьким до часу розсіяння, $\Delta \approx$, одержимо $\Delta \approx \hbar$. Сильне магнітне поле визначається як поле, достатнє для розрізнення окремих рівнів Ландау. Для цього відстань між рівнями Ландау повинна перевищити розширення окремої лінії, що веде до відомої нерівності $\omega \tau \gg$ й тим самим демонструє ще одну фізичну інтерпретацію нерівності (49). При цьому спінове розщеплення рівнів Ландау ми знехтували.

7.1. Осциляції Шубнікова – де Гааза й квантовий ефект Холла

Цікаві ефекти виникають при вимірюванні опору й ефекту Холла в змінюваному сильному магнітному полі. Нехай у нас є модуляційно-легована плівка з $n_s = 5 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ та рухливістю $\mu = 1 \times 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Визначимо, скільки рівнів Ландау заселено, якщо $B_z = 1 \text{ Тл}$.

Спочатку слід визначити, чи розрізняються окремі рівні Ландау. Для рухливості $\mu = 1 \times 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с} = 10 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ маємо:

$$\mu B_z = 10 \gg 1 \quad (60)$$

й ми явно перебуваємо в режимі сильного магнітного поля. Далі обчислюємо виродження рівнів Ландау. Вважаючи, що, одержуємо

$$D_0 = \frac{2qB_z}{h} = 4.8 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}, \text{ і, відповідно,}$$

$$\frac{n_s}{D_0} = 10.4,$$

що означає: перші 10 рівнів Ландау заселені, а рівень Фермі лежить у проміжку між 10-м та 11-м рівнями Ландау.

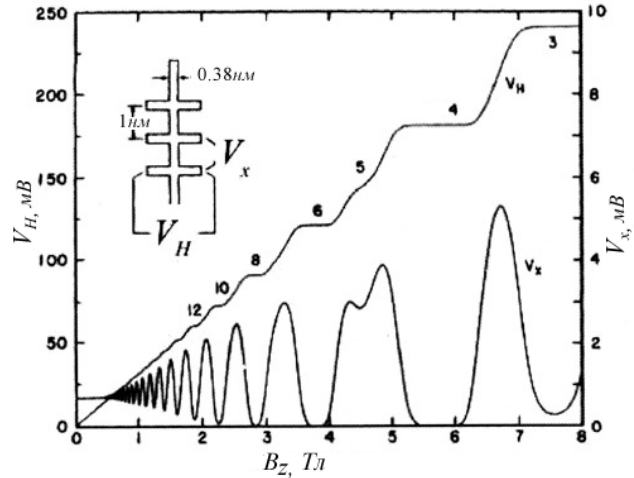


Рис. 11. Холлівські вимірювання модуляційно-легованої структури AlGaAs/GaAs в сильному магнітному полі при 1.2 К. Інжектований струм – 25.5 мкА, і поверхнева концентрація $n_s = 5.6 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ [19].

Рис. 11 зображує результати вимірювань характеристик такої структури [19].

Розгляньмо спочатку поздовжній опір $R_{xx} = V_{xx} / I$ (відповідну напругу відкладено по правій осі на рис. 11). При слабких полях опір не залежить від магнітного поля і є опором матеріалу. Зі збільшенням магнітного поля R_{xx} починає осцилювати. Осциляції стають дедалі більшими мірою того, як усе більше виявляється квантованість спектру електронів у сильному магнітному полі (рівні Ландау). Ці осциляції опору R_{xx} (і відповідної напруги V_{xx}) відомі як осциляції Шубнікова – де Гааза [20, 21]. Їх у 1930 році відкрили на зразках вісмуту з малою кількістю домішок голландський фізик Ван дер де Гааз і український фізик, фундатор кріогенної лабораторії в Українському фізико-технічному інституті в Харкові Лев Шубніков (на жаль, ученого було розстріляно в 1937 році через безглузде політичне звинувачення, і навіть його ім'я в назві відкритого ним ефекту в СРСР до кінця 1950-х років згадувати було заборонено). Період цих осциляцій дозволяє виміряти поверхневу концентрацію електронів [22]. Коли магнітне поле стає дуже сильним, виникають ділянки за віссю абсцис, де опір R_{xx} фактично зануляється й напруга на відповідних контактах не падає (рис.

11). За таких умов спостерігається квантовий ефект Холла [19, 22 – 25].

Поведінку холлівської напруги зі зміною магнітного поля зображено на рис. 11 (ліва вісь). В слабких магнітних полях холлівська напруга пропорційна полю, як це й має бути згідно з (18). Однак із переходом до сильних магнітних полів починається квантування холлівської напруги, яке супроводжується зростанням висоти й ширини сходинок квантування. Відповідно, має місце й квантування Холлівського опору згідно зі співвідношенням

$$R_H = \frac{h}{q^2} \frac{1}{n}; \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (61)$$

Вперше цілочисельний квантовий ефект Холла (ЦКЕХ) спостерігав Клаус фон Клітцинг з колегами [26]. Константа $\frac{h}{q^2} = 25812.807 \dots \Omega$ носить тепер назву сталої

Клітцинга і є міжнародним еталоном для визначення значення одиниці опору Ω . Самі сходинок квантованого опору (61), як видно з рис.11, за інтервалом полів відповідають ділянкам занулення R_{xx} . Пізніше було відкрито й дробовий квантовий ефект Холла (див. напр. [27]), де у (61) може набувати також певних дробових значень $2/7, 1/3, 2/5, 3/5, 5/2$ тощо.

Вигляд залежностей на рис.11 відразу наводить на думку, що ЦКЕХ пов'язаний з заповненням чергових рівнів Ландау електронами зі зменшенням магнітного поля. Адже зі зростанням магнітного поля циклотронна частота (50) збільшується, і, врешті-решт, навіть перший рівень Ландау, описуваний в (56), опиниться над рівнем Фермі, який визначається поверхневою концентрацією електронів (її в реальних експериментах з двовимірними провідниками регулюють напругою на металевому затворі, розташованому під діелектриком, який є підкладкою для досліджуваного провідника – маємо звичайний плоский конденсатор). Використовуючи (59), легко показати, що n -й рівень Ландау буде повністю заповнено електронами при зменшенні магнітного поля від максимального (за якого жоден рівень не перебуває нижче рівня Фермі) до значення

$$B_n = \frac{1}{n} \frac{h n_s}{q}. \quad (62)$$

Надалі ми використаємо вираз для Холлівського опору (18), а також очевидні співвідношення

$$V_H = WB \langle v_x \rangle \quad I = W n_s q \langle v_x \rangle, \quad (63)$$

де W – ширина провідника, $\langle v_x \rangle$ – середня дрейфова швидкість електронів. Зазначмо що перше з цих співвідношень є наслідком вимоги рівності сили Лоренца, яка діє на електрони з боку магнітного поля, і сили, спричиненої напруженістю холлівського електричного поля між протилежними межами провідника: $qE_y = qB_z \langle v_x \rangle$. Підставивши спершу ці співвідношення у (18), а далі (62) – в отриманий результат, ми отримаємо значення холлівського опору, описувані (61), для таких значень магнітного поля, коли рівень Фермі опиняється точно посередині між рівнями Ландау. В цих точках всі рівні Ландау нижче рівня Фермі повністю заповнені електронами, а вище – порожні. Але природа поличок для холлівського опору в достатньо широкому інтервалі полів навколо таких точок (див. рис. 11) з цього простого опису не впливає і потребує додаткових пояснень.

Для значення магнітного поля, описуваного (62), рівень Фермі потрапляє в проміжок між n -м та $(n+1)$ -м рівнем Ландау, і, згідно з формулою Ландауера, поздовжній опір R_{xx} при цьому має бути максимальний. Натомість, як показує експеримент (рис.11), він при таких значеннях поля зануляється. Пояснення природи ЦКЕХ викладено в [25]. Точні вирази для провідності і для питомого опору в двовимірній системі показують, що в граничному випадку сильного магнітного поля $\sigma_{xx} \ll \sigma_{xy}$, і $\rho_{xx} \rightarrow 0$ (хоч з формули Ландауера на позір має впливати $\sigma_{xx} \rightarrow 0$, але такий хибний висновок базується тільки на врахуванні розташування рівня Фермі між рівнями Ландау, і не враховує складної залежності довжини вільного пробігу від магнітного поля). Якісно ЦКЕХ в двовимірному провіднику можна пояснити на основі моделі крайових станів. Біля краю провідника формується електричне поле, яке перешкоджає елек-

тронам виходити за його межі. Воно призводить до залежності початку відліку енергії для рівнів Ландау, який в (56) ми покладали рівним нулеві, від координати (рис. 12).

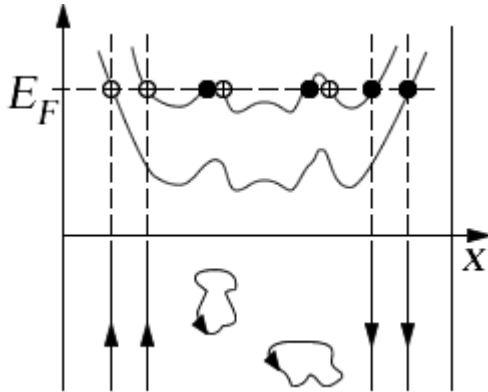


Рис. 12. До природи крайових станів: електрони дрейфують уздовж ліній постійної енергії, утворюючи локалізовані й крайові струмові стани.

Як це зображено на рис. 12, рівні Ландау в силу цього вигинаються біля країв угору. В схрещеному електричному й магнітному полях заряджені частинки дрейфують уздовж еквіпотенціальних ліній. Оскільки електрони підкоряються статистиці Фермі – Дірака й при низьких температурах заповнюють усі стани до рівня Фермі, то за умови коли рівень Фермі вдалині від країв розташований між рівнями Ландау, а фактор заповнення цих рівнів $\frac{n_s}{D_o}$ близький до цілого числа, то вдалині від країв (усередині провідника) формуються локалізовані стани, які не беруть участі в провідності, а біля країв – крайові струмові стани.

Можна показати [27]: струм, що переноситься кожним крайовим станом, квантований і дорівнює $I_{\text{partial}} = \frac{q^2}{h} V_H$. А число крайових каналів ціле й визначається фактором заповнення $\frac{n_s}{D_o}$. Тому загальний струм через зразок дорівнює

$$I = \frac{q^2}{h} V_H \frac{n_s}{D_o}. \quad (64)$$

З урахуванням (18) і (62) це еквівалентне квантованим значенням холлівського опору (61). Оскільки значення $\frac{n_s}{D_o}$, що входить до (61), є цілою частиною співвідношення $\frac{n_s}{D_o}$,

залежність холлівського опору від поля можна використати для прецизійного визначення поверхневої концентрації [22].

8. Висновки

Підведемо підсумки. Холлівська лінійка і вимірювальні геометрії ван дер Пау дозволяють виміряти як опір, так і холлівську концентрацію й холлівську рухливість. За бажання можна оцінити й холлівський фактор, що дозволить точніше визначити поверхневу концентрацію електронів і їхню справжню рухливість. Однак, на практиці зазвичай наводять холлівську концентрацію та холлівську рухливість. Температурні вимірювання допомагають ідентифікувати домінуючий механізм розсіяння. Холлівські вимірювання потребують особливої ретельності з метою уникнути виявів гальвано- і термомагнітних ефектів, таких, як ефект Нернста. Суттєво нову інформацію можуть дати вимірювання в сильних магнітних полях, однак для таких експериментів потрібні матеріали з достатньо високою рухливістю електронів.

На завершення наголосимо: стаття є наслідком прослуховування одним з нас (ЮОК) курсів лекцій «Near-Equilibrium Transport: Fundamentals and Applications» та «Nanoscale Transistors», прочитаних он-лайн в 2011 та 2016 роках проф. Марком Лундстромом (Mark Lundstrom), а також «Fundamentals of Nanoelectronics, Part I: Basic Concepts», прочитаних он-лайн в 2012 і 2015 роках проф. Супрійо Датта (Supriyo Datta) в рамках ініціативи Purdue University / nanoHUB-U [www.nanohub.org/u]. В ній також використано напрацювання авторського курсу «Фізика конденсованого середовища», який інший автор (МВС) упродовж останніх років читає для магістрів радіофізичного факультету Київського національного університету імені Т. Г. Шевченка.

Авторі щиро вдячні Н. Ю. Кругляк за допомогу в роботі над статтею і в підготовці її до друку.

Список використаної літератури

- [1]. Yu. O. Kruglyak, M. V. Strikha. *Uzahalnena model elektronnoho transportu v mikro- i nanoelektronitsi* // Sens. elektron. mikrosist. tehnol. – 2015. – t. 12, No. 3. S. 4 – 27 (in Ukrainian).
- [2]. Yu. O. Kruglyak, M. V. Strikha. *Termoelektrychni yavyshcha ta prystroi z pozytsii uzahalnenoї modeli transportu elektroniv* // Sens. elektron. mikrosist. tehnol. – 2015. – t. 12, No. 4. S. 5 – 18 (in Ukrainian).
- [3]. Yu. O. Kruglyak, M. V. Strikha. *Termoelektrychni koefitsiienty v uzahalnenii modeli transportu elektroniv* // Sens. elektron. mikrosist. tehnol. – 2016. – t. 13, No. 1. S. 5 – 23 (in Ukrainian).
- [4]. Yu. O. Kruglyak, M. V. Strikha. *Transport tepla fononamy v uzahalnenii modeli Landauera-Datta-Lundstroma* // Sens. elektron. mikrosist. tehnol. – 2016. – t. 13, No. 2. S. 16 – 35 (in Ukrainian).
- [5]. Yu. O. Kruglyak, M. V. Strikha. *Transportni yavyshcha v hrafeni v uzahalnenii modeli Landauera-Datta-Lundstroma* // Sens. elektron. mikrosist. tehnol. – 2016. – t. 13, No. 3. S. 5 – 29 (in Ukrainian).
- [6]. Yu. O. Kruglyak, M. V. Strikha. *Urakhuvannia rozsiiannia v uzahalnenii modeli Landauera-Datta-Lundstroma* // Sens. elektron. mikrosist. tehnol. – 2016. – t. 13, No. 4. – S. 5-18.
- [7]. Yu. O. Kruglyak, M. V. Strikha. *Kinetychne rivniannia Boltsmana v uzahalnenii modeli transportu elektroniv u mikro- ta nanoelektronitsi* // Sens. elektron. mikrosist. tehnol. – 2017. – t. 14, No. 1, – S. 5 – 20.
- [8]. Datta Supriyo. *Lessons from Nanoelectronics: A New Perspective on Transport*. Hackensack, New Jersey: World Scientific Publishing Company, 2012; www.nanohub.org/courses/FoN1.
- [9]. Lundstrom Mark, Jeong Changwook. *Near-Equilibrium Transport: Fundamentals and Applications*. Hackensack, New Jersey: World Scientific Publishing Company, 2013; www.nanohub.org/resources/11763.
- [10]. Yu. A. Kruglyak. *Nanoelektronika «snizu - vverh»*, Odessa: TES, 2015. (in Russian)
- [11]. L. Danielson. Measurement of the thermoelectric properties of bulk and thin film materials, www.osti.gov/scitech/biblio/663573, 1996.
- [12]. H. H. Berger. Models for contacts to planar devices, *Solid-State Electron.*, v. 15, 145 – 158 (1972).
- [13]. D. K. Schroder. *Semiconductor Material and Device Characterization*, Wiley Interscience, New York, 2006.
- [14]. D. C. Look. *Electrical Characterization of GaAs Materials and Devices*, New York: John Wiley and Sons, 1989.
- [15]. L. J. van der Pauw. A method for measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape, *Phillips Res. Rep.*, v. 13, 1 – 9 (1958).
- [16]. Mark Lundstrom. *Fundamentals of Carrier Transport*. Cambridge UK: Cambridge University Press, 2000.
- [17]. N. Ashcroft, N. Mermin, *Fizika tverdogo tela* (Moskva: Mir: 1979) (in Russian).
- [18]. C. M. Wolfe, N. Holonyak, G. E. Stillman. *Physical Properties of Semiconductors*, Englewood Cliffs, N. Jersey: Prentice Hall, 1989.
- [19]. M. E. Cage, R. F. Dziuba, B. F. Field. A test of the quantum Hall effect as a resistance standard, *IEEE Trans. Instrument. Measure.*, v. IM-34, 301 – 303 (1985).
- [20]. L. W. Schubnikov, W. J. de Haas. *Proc. Royal Netherl. Acad. Arts Science*, v. 33, 130 (1930).
- [21]. L. W. Schubnikov, W. J. de Haas. *Proc. Royal Netherl. Acad. Arts Science*, v. 33, 163 (1930).
- [22]. D. F. Holcomb. Quantum electrical transport in samples of limited dimensions, *Amer. J. Phys.*, v. 67, 278 – 297 (1999).
- [23]. J. H. Davies. *The physics of Low-Dimensional Semiconductors*, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1998.
- [24]. S. Datta. *Electronic Transport in Mesoscopic Systems*, Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [25]. Yu. O. Kruglyak, M. V. Strikha, *Uroky nanoelektroniky: efekt Kholla i vymiriuvannia elektrokhimichnykh potentsialiv u kontseptsii «znyzu-vhoru»*. Sens. elektron.

mikrosist. tehnol., t. 11, No 1: 5 – 27 (2014) (*in Ukrainian*).

[26]. K. V. Klitzing, G. Dorda, and M. Pepper. New Method for High-Accuracy Determination of the Fine-Structure Constant Based on Quantized Hall Resistance. *Phys. Rev. Lett.* v. 45, 494 (1980).

[27]. David Tong. *The Quantum Hall Effect. TIFR Infosys Lectures*. <http://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/qhe.html>

Стаття надійшла до редакції 02.04.2017 р.

UDC 538.935 PACS numbers: 72.10.-d, 72.20.Dp, 72.20.Fr, 72.90.+y, 73.63.-b
DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.2.106603>

MEASURING OF CONDUCTIVITY AND ANALYSIS OF ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF TRANSISTORS WITHIN GENERALIZED MODEL OF ELECTRON TRANSPORT

Yu. O. Kruglyak, M. V. Strikha

Odesa State Environmental University,
Faculty of Computer Sciences
15 Lvivska Str, Odesa, Ukraine

* Taras Shevchenko Kyiv National University
Faculty of Radiophysics, Electronics and Computer Sciences,
4g Hlushkov Av, Kyiv, Ukraine
V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine,
41 Nauky Av, Kyiv, Ukraine

Summary

In a tutorial article directed to serve researchers, university teachers and students, we discuss experimental methods for measuring the resistance in the frame of the generalized transport Landauer – Datta – Lundstrom (LDL) model, including measurements under applied external magnetic field, namely: method of variable resistor length, four-point measurement scheme, the classical method of the Hall effect measurement and different variants of the van der Pauw method, temperature measurements and accounting for artifacts (Nernst effect), measurements in strong magnetic fields (Shubnikov–de Haas effect).

Hall effect setup and van der Pauw measuring geometry enables to measure both the resistance and Hall concentration / Hall mobility. We also can estimate Hall factor, which enables to determine surface concentration of electrons and their real mobility more precisely. Temperature measurements permit to identify the dominant scattering mechanism. Hall measurements need special accuracy in order to avoid the influence of galvanic and thermomagnetic effects, such as Nernst effect. Measurements in strong magnetic fields can supply with essentially new information, however, they need materials with rather high mobility of electrons.

Keywords: nanophysics, nanoelectronics, resistance measurement, van der Pauw method, Hall effect, thermal measurement, artifact measurement, Nernst effect, Shubnikov – de Haas effect

УДК 538.935 PACS numbers: 72.10.-d, 72.20.Dp, 72.20.Fr, 72.90.+y, 73.63.-b
DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.2.106603>

ВИМІРЮВАННЯ ПРОВІДНОСТІ Й АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРІВ У РАМКАХ УЗАГАЛЬНЕНОЇ МОДЕЛІ ТРАНСПОРТУ ЕЛЕКТРОНІВ

Ю. О. Кругляк, М. В. Стріха

Одеський державний екологічний університет,
факультет комп'ютерних наук,
вул. Львівська, 15, Одеса, Україна
тел. (067) 725 2209, *E-mail: quantumnet@yandex.ua*
* Київський національний університет ім.Т. Шевченка,
факультет радіофізики, електроніки і комп'ютерних систем,
пр. Глушкова, 4г, Київ, Україна, тел. (044) 526 0532;
Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України,
пр. Науки, 41, Київ, Україна, тел. (044) 525 6033,
E-mail: maksym_strikha@hotmail.com

Реферат

У методичній статті, розрахованій на науковців, викладачів та студентів вищої школи, обговорено експериментальні методи вимірювання опору в узагальненій моделі транспорту електронів Ландауера – Датта – Лундстрема (ЛДЛ), зокрема, в умовах прикладання зовнішнього магнітного поля: метод змінної довжини провідника, чотириточкову схему вимірювань, класичний метод вимірювання ефекту Холла й різні варіанти методу ван дер Пау, а також температурні вимірювання й урахування артефактів (ефект Нерста), вимірювання в сильних магнітних полях (ефект Шубнікова – де Гааза).

Показано, що холлівська лінійка і вимірювальні геометрії ван дер Пау дозволяють виміряти як опір, так і холлівську концентрацію й холлівську рухливість. За бажання можна оцінити й холлівський фактор, що дозволить точніше визначити поверхневу концентрацію електронів і їхню справжню рухливість. Однак, на практиці зазвичай наводять холлівську концентрацію та холлівську рухливість. Температурні вимірювання допомагають ідентифікувати домінуючий механізм розсіяння. Холлівські вимірювання потребують особливої ретельності з метою уникнути виявів гальвано- і термомагнітних ефектів, таких, як ефект Нернста. Суттєво нову інформацію можуть вимірювання в сильних магнітних полях, однак для таких експериментів потрібні матеріали з достатньо високою рухливістю електронів.

Ключові слова: нанофізика, наноелектроніка, вимірювання опору, метод ван дер Пау, ефект Холла, температурні вимірювання, врахування артефактів, ефект Нернста, ефект Шубнікова – де Гааза

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

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

УДК 534.29

DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.2.106604>

АКУСТОСТИМУЛЬОВАНА «КВАЗІКАВІТАЦІЯ» ВАКАНСІЙНИХ ДЕФЕКТІВ У НАПІВПРОВІДНИКАХ ПРИ ЇХ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНОМУ ОПРОМІНЕННІ

Я. М. Оліх¹, Я. І. Лепіх²

¹ Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України;

² Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр МОН і НАН України при Одеському національному університеті імені І. І. Мечникова
e-mail: ndl_lepikh@onu.edu.ua

АКУСТОСТИМУЛЬОВАНА «КВАЗІКАВІТАЦІЯ» ВАКАНСІЙНИХ ДЕФЕКТІВ У НАПІВПРОВІДНИКАХ ПРИ ЇХ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНОМУ ОПРОМІНЕННІ

Я. М. Оліх, Я. І. Лепіх

Анотація. Стаття присвячена дослідженню фізичних процесів у напівпровідникових структурах під дією високоенергетичного опромінення при імплантації іонів Ag^+ , N^+ і O^+ і при одночасному опроміненні акустичними хвилями. Виявлено ряд ефектів обумовлених стимуляцією акустичним полем.

Ключові слова: іонна імплантація, акустичні хвилі, «квазікавітація», напівпровідники, дефектно-домішкові структури

ACOUSTOSTIMULATED "QUASI-CAVITATION" OF VACANCY DEFECTS IN SEMICONDUCTORS AT THEIR HIGH-ENERGETIC IRRADIATION

Ya. M. Olikh, Ya. I. Lepikh

Abstract. The article is devoted to the investigation of physical processes in semiconductor structures under the action of high-energy irradiation at Ar^+ , N^+ and O^+ ions implantation and at simultaneous acoustic waves irradiation. A number of effects caused by an acoustic field stimulation has been revealed.

Keywords: ionic implantation, acoustic waves, "quasi-cavitation", semiconductors, defective - impurity structures

АКУСТОСТИМУЛИРОВАНИЯ "КВАЗИКАВИТАЦИЯ" ВАКАНСИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ПОЛУПРООДНИКАХ ПРИ ИХ ВИСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ОБЛУЧЕНИИ

Я. М. Олих, Я. И. Лепих

Аннотация. Статья посвящена исследованию физических процессов в полупроводниковых структурах под действием высокоэнергетического облучения при имплантации ионов Ar^+ , N^+ и O^+ и при одновременном облучении акустическими волнами. Выявлен ряд эффектов обусловленных стимуляцией акустическим полем.

Ключевые слова: ионная имплантация, акустические волны, «квазикавитация», полупроводники, дефектно-примесные структуры

Вступ

При використанні інтенсивних акустичних хвиль (АХ) в процесі імплантації високих доз йонів Ar^+ , N^+ і O^+ в пластини кремнію, або H^+ в епітаксійні плівки $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}/\text{Si}$, чи SiH_4^+ в SiO_2 , - було виявлено цілий ряд акустостимульованих (АС) ефектів, а саме: збільшення товщини аморфізованого шару, звуження профілю імплантованого в кремній бору, підвищення ефективності формування діелектричних шарів SiO_2 та Si_3N_4 , зменшення механічних напружень у структурі $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}/\text{Si}$ та покращення люмінесцентних властивостей наноструктур Si/SiO_2 [1]. Для пояснення цих ефектів в майже усіх відомих роботах (див. бібліографію в [1]) використовувалася модель АС розділення в приповерхневій області пластини імплантованих атомів домішки і міжвузлових атомів Si , які утворюються при йонній імплантації,

з видалення останніх з області імплантації. Вважається, що в результаті цього процесу в приповерхневій області пластини кремнію накопичуються вакансійні дефекти і відбувається частковий відпал радіаційних дефектів - активація імплантованих атомів домішки уже в процесі імплантації. Проте необхідно зауважити, що фізичні причини такого АС упорядкування радіаційних дефектів в залежності від експериментальних умов взагалі можуть суттєво відрізнятися і конкретні механізми потребують спеціального вивчення.

Подібна ситуація для незвичайної еволюції радіаційних дефектів в кристалах реалізується, зокрема, при високо енергетичній імплантації великих доз легуючих домішок, - в приповерхневій області кристала накопичується висока концентрація дефектів вакансійного типу, а при імплантації йонів газу можуть утворюватися і наповнені газом пори-“бульбашки”. При

цьому окремі мікроструктурні перетворення дефектно-домішкової структури (ДДС) кристала подібні до процесів, які відбуваються при акустичній кавітації в рідині [2], що дає певні підстави ввести поняття “квазікавітації”. Зовнішня схожість проявлення цих процесів в твердому тілі і рідині обумовлена, в першу чергу, локальним характером механічних напружень, локалізацією високих значень температури і тиску в середовищі при поширенні інтенсивних акустичних хвиль. При цьому їх фізична подібність на мікроскопічному рівні, на наш погляд, створює важливі перспективи використання методології та теоретичних моделей акустичної кавітації в рідині для опису окремих ефектів трансформації радіаційних дефектів в твердому тілі, що і є метою даної статті.

Розглянемо окремі сторони цих явищ більш детально.

1. Акустодинамічні ефекти в рідині (кавітація)

При поширенні інтенсивних АХ (інтенсивністю більше $1...2 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}$) в рідині під дією локального змінного тиску спостерігається ефект, що називається акустичною кавітацією (АК). Під АК розуміють процес швидкого утворення та анігіляції (лускання в зоні підвищеного тиску) газових або парових порожнин (бульбашок) в середовищі, яке піддається дії АХ [2].

Пульсуюче зростання бульбашки в акустичному полі внаслідок дифузії в її середину парогазової суміші може супроводжуватись коагуляцією окремих бульбашок під дією сил Б'єркнеса. Внаслідок неоднорідності акустичного поля в рідині, поступального переміщення і коагуляції бульбашки досягши певних розмірів, втративши сферичну форму стають нестабільними і при попаданні у зону підвищеного тиску лускаються. При цьому в середині бульбашки тиск газу досягає 10^9 Па , виникає ударна хвиля амплітудою до 10^8 Па , а локальна температура може становити 6000 К .

Таким чином відбувається трансформація в цілому середніх параметрів стану рідкого середовища у локальні надвеликі їх значення тиску і температури. Наслідком цього

є ціла низка фізичних ефектів, що можуть мати як негативні прояви (ерозія надтвердих матеріалів), так і корисні – нанодиспергування матеріалів, емульгування, інтенсифікація фізико-хімічних реакцій і процесів, сонолюмінесценція тощо. Очевидно, що досягнення в режимі кавітації одночасно надвисоких локальних тиску і температури відкриває широкі можливості для модифікації матеріалів різних сфер застосування, у тому числі в технології напівпровідників. В останньому випадку застосуємо внаслідок зовнішньої потреби термін “квазікавітації”.

2. Акустодинамічні ефекти при йонно-променевої імплантації і акустичному опроміненні пластин Si

Генерація дефектів та акустичних сигналів

Йони з енергією, що перевищує енергію зв'язку атома в ґратці, спрямовуються на поверхню кристала, упродовжуються і зупиняються на деякій глибині, створюючи при цьому масу дефектів. В процесі імплантації йонів (ІЙ) середніх мас в напівпровідниковий кристал Si вводяться стійкі радіаційні дефекти вакансійного типу, переважно дивакансії, і два типа міжвузельних комплексів. Ці дефекти, а також більш крупні вакансійні комплекси (тетравакансії) можуть нагромаджуватися в кристалі аж до критичної концентрації, яка відповідає переходу кремнію в аморфний стан. Особливі умови виникають і при імплантації високих доз йонів газів в Si або при радіаційній руйнації молекул при високо енергетичному опроміненні окисних шарів SiO_2 [3].

Розглядаючи вплив зовнішніх АХ на процеси дефектоперетворення при ІЙ необхідно враховувати і джерела внутрішнього акустичного поля [4]. Проникнення йона викликає в кристалі мікробибух, який породжує акустичну ударну хвилю (УХ). Характерна частота цих УХ – порядку оберненої тривалості збурення, пов'язаного або з локальним розігрівом, або з часом проникнення йона ($10^{-11}-10^{-12}$)с [3]. Зауважимо, що подібне виникнення нанорозмірних областей вибухового характеру енерговиділення є загальним явищем для різноманітних видів високоенергетичного опромінення

- радіаційне опромінення, йонна імплантація, лазерна обробка тощо. Експериментальним методом діагностики генерації акустичних сигналів є дослідження акустичної емісії, що дозволяє отримувати інформацію про розвиток нерівноважних структурних перетворень ДДС в об'ємі кристала акустичними методами.

Блістерування

Одним з найбільш показових проявлень ефекта «квазікавітації» вакансійних дефектів при ЙІ, є „блістерування”. Як було показано раніше [5], в процесі імплантації аргону в Si (енергія $E_A \approx 40$ кеВ, інтенсивність імплантації $I \approx 10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$) на глибині R_p відбувається утворення газових бульбашок (діаметром ~ 200 нм та густиною $\sim 4 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$), які при досягненні дози ЙІ ($\Phi_{Ar} > 10^{17} \text{ см}^{-2}$) «лускаються», породжуючи УХ. При цьому спостерігається ефект блістерування (рис.1) - на поверхні кремнію утворюються кратери (діаметром ~ 500 нм, глибиною 100-150 нм), а на зворотній стороні пластини значно покращуються властивості шарів Si_xN_y .

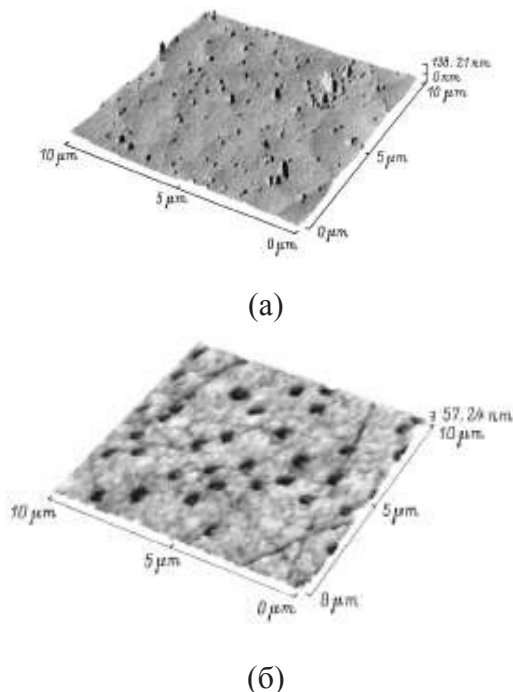


Рис. 1. Мікроскопічне зображення поверхні пластини Si, опроміненої йонами Ar з дозою $\Phi \approx 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (а) та $\Phi \approx 10^{17} \text{ см}^{-2}$ (б) [4].

Відзначимо, що в умовах дії зовнішньої АХ спостерігається зменшення дозового порогу виникнення ефекту “блістерування”,

який проявляється в Si уже при $\Phi < 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ($E_{Ar} \approx 150$ кеВ). Цікаво, що вплив АХ зростає при зниженні частоти АХ (з 7.4 МГц до 0.7 МГц) [6].

Збільшення товщини аморфизованого шару

АС посилення процесу аморфізації поверхні Si відбувається і при імплантації Ar^+ [7,8], причому при дозах Ar^+ менших ніж при „блістеруванні” ($\Phi_{Ar} = 10^{13} - 10^{15} \text{ см}^{-2}$; густина струму $6 \cdot 10^{10} - 3 \cdot 10^{12} \text{ йонів.см}^{-2}$). Дія АХ зводиться до переміщення внутрішньої межі розділу аморфної та кристалічної фаз до поверхні. При цьому аморфизований шар виникає вже безпосередньо на поверхні пластини та його товщина збільшується в ~ 1.3 рази. Використання in-situ АХ дозволяє понизити критичну дозу аморфізації та отримати суцільний аморфний шар при значно менших концентраціях введеної домішки. В цих роботах вперше було запропоновано модель, що включає АС комплексування вакансій та утворення вакансійно-аргонових «бульбашок». Такі процеси підсилюють перекривання неупорядкованих областей і стимулюють утворення суцільного аморфного шару на поверхні.

Прискорена релаксація механічних напружень в плівках SiGe/Si

Подібна ситуація реалізується і в іншому експерименті, а саме при імплантації йонів He^+ ($E_{He} \approx 50$ кеВ, $\Phi_{He} \approx 1.8 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$) в епітаксійні плівки $\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}/\text{Si}$ (товщина $d=100; 300$ нм) з наступним відпадом їх в атмосфері Ar ($650^\circ\text{C} - 850^\circ\text{C}$, 60 с) [9]. Було виявлено, що АХ дозволяє значно зменшити механічні напруження на границі SiGe/Si - ступінь релаксації напружень досягає $\approx 80\%$; відпал при 650°C стимулює подальшу їх релаксацію, а ступінь компенсації з АХ зростає. При цьому також зменшуються шорсткість поверхні (~ 0.6 нм) та густина проникаючих дислокацій (за результатами ПЕМ і селективного травлення).

Пороговий характер виникнення сигналів АЕ

Основними механізмами акустичної емісії (АЕ) при ЙІ є: а) елементарні акти генерації (розтягування) та рекомбінації (стиснення)

пар Френкеля; б) рух в каскаді вибитих з вузлів атомів матриці; в) теплові піки (характерна частота – порядку оберненої тривалості збурення 10^{-11} - 10^{-12} с); г) великомасштабні процеси генерації і переміщення дислокацій, виникнення тріщин, двійникування [4]. Проте за певних умов можуть виникати і нові механізми. Так, при дослідженні АЕ в процесі ІЙ Ag^+ (10^{13} до 10^{15} см^{-2}) було виявлено немонотонний характер амплітудних залежностей АЕ від густини струму йонів Ag^+ $J_{\text{йон}}$ (інтенсивності імплантації) (рис. 2). Такий пороговий характер АЕ, причому при режимах імплантації, коли відбувається часткова аморфизація і можуть появлятися блістери на поверхні, свідчить про виникнення в цьому режимі ІІ іншого більш ефективного джерела АЕ; а саме, як ми вважаємо, - “лускання вакансійно-газових бульбашок”. Цікаво, що зі збільшенням частоти АХ зростає ефективність АЕ та її максимум зміщується в область більших $J_{\text{йон}}$.

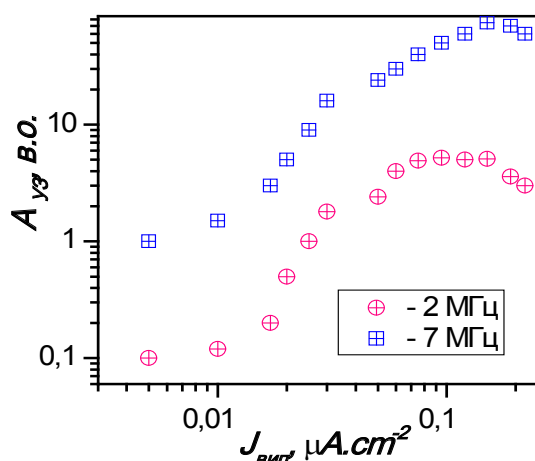


Рис. 2. Пороговий характер виникнення сигналів АЕ.

3. Порівняльні характеристики акустичної кавітації та йонної імплантації

В Таблиці 1 (верхня частина) приведені макроскопічні параметри середовища (води та кремнію, зокрема) характерні для АК та ІІ, відповідно, при поширенні АХ [7,8,10]. Прослідковується майже повна їх ідентичність. В нижній частині таблиці порівнюються мікроскопічні характеристики - кавітаційна буль-

башка та область каскаду імплантованого високоенергетичного йона, які і визначають власне АК та ІІ; теж спостерігається певна їх кореляція. Розміри кавітаційної бульбашки складають 1-100 мкм, а усереднена форма каскадної області для пучка важких йонів представляє собою еліпсоїд обертання з ефективним радіусом до ~ 10 нм. Максимальна температура каскадної області може перевищувати $5 \cdot 10^3$ К, а час її релаксації $\sim 10^{-11}$ с [11]. Проте найбільш важливою подібною характеристикою для АК та ІІ є виникнення локальних областей вибухового характеру енерговиділення та поширення його в обох середовищах шляхом УХ. Максимальний тиск в каскадній області досягає 10^4 бар, а різке розширення її має вибуховий характер і породжує майже сферичну УХ з фронтальним тиском, який може бути і вище межі плинності матеріалу. Під дією цього тиску в результаті послідовних багатократних актів імплантації може відбуватися аномальне переміщення атомів, що є певною альтернативою дифузійним потокам. А різниця енергій парної взаємодії для атомів різного сорту може привести до корельованої їх перебудови, зокрема, розділення в об'ємі імплантованих та матричних атомів. Посилення цього ефекту, оскільки відстань пробігу сферичної УХ невелика (< 10 нм), можна досягнути додатковим енергетичним підживленням УХ [11]. Наприклад, за рахунок самовідновлення амплітуди УХ в результаті нелінійних ефектів взаємодії УХ з неоднорідностями середовища; або введенням в кристал при імплантації зовнішньої АХ, яка може стимулювати виникнення солітонного режиму поширення УХ без затухання.

4. Механізм АС „квазікавітації” вакансійних дефектів

Суть ефекту “квазікавітації” вакансійних дефектів, названому нами за аналогією з процесами акустичної кавітації у рідині [2], полягає в активному впливі інтенсивних АХ на формування і релаксацію нерівноважної структури радіаційних дефектів. В залежності від умов опромінення кристала розглядається два випадки.

Таблиця 1

<i>Основні фізичні параметри середовища та АХ, при яких реалізується</i>			
<i>Акустична кавітація та СЛ</i>		<i>ЙІ</i>	
<i>Температура води</i>	$<65^{\circ}\text{C}$	<i>Температура підкладки</i>	$<65^{\circ}\text{C}$
<i>Тиск води</i>	>15 <i>мм.рт.ст</i>	<i>Тиск в камері</i>	<15 мм.рт.ст
<i>Частота АХ</i>	$(20\cdot 10^3 - 10^6)\text{Гц}$	<i>Частота УЗ хвилі</i>	$(10^6 - 10^7)\text{Гц}$
<i>Потужність УЗ хвилі</i>	$>0.5 \text{ Вт.см}^{-2}$	<i>Потужність УЗ хвилі</i>	$>0.5 \text{ Вт.см}^{-2}$
<i>Розрахункові характеристики</i>			
<i>кавітаційної бульбашки</i>		<i>каскадної зони</i>	
<i>Розмір бульбашки</i>	<0.5 мкм	Глибина проникнення йона - <1 мкм Радіус каскаду ($E > 10\text{KeV}$) - 5 нм	
<i>Температура</i>	$3000 - 5000\text{K}$ $>10^5\text{K}$	<i>Температура</i>	$<6000\text{K}$
<i>Тиск</i>	1000 ат $>10^9 \text{ ат}$	<i>Тиск</i>	1000 ат $>10^9 \text{ ат}$
<i>Тривалість СЛ спалаху</i>	$(10^{-11} - 10^{-10}) \text{ с}$	<i>Тривалість розвитку каскаду</i>	$(10^{-12} - 10^{-11}) \text{ с}$
<i>Ударна хвиля</i>		<i>Ударна пружна хвиля (профіль)</i>	ширина $\sim 1\text{нм}$; довжина пробігу $< 100\text{нм}$

Перший виникає при високо енергетичній імплантації легуючих домішок; у кристалі може накопичуватися велика концентрація дефектів вакансійного типу, які утворюють *вакансійні кластери*. Другий – при імплантації високої дози йонів газу, які в результаті precipitaції утворюють в кристалі *газові бульбашки*; центрами їх зародження теж є вакансійні комплекси. Останній випадок включає і варіант радіаційної руйнації газомістких молекул твердого середовища (SiO_2 , GeO_2 тощо), що містяться в твердому тілі. В процесі подальшої ЙІ, особливо при поширенні в кристалі інтенсивної АХ від зовнішнього джерела, – можуть реалізуватися умови для специфічної еволюції імплантаційних дефектів. На першій стадії появляються зародки і відбувається початкове формування “бульбашок” (для узагальнення будемо називати “бульбашками” і скупчення газових атомів, і вакансійні кластери – «анти-бульбашки»), що абсорбують частину найближчих вакансій (або/і, в тому числі, оточуючих домішкових атомів). Переважає АС

процес подібний процесу «дозрівання Освальда», який супроводжується інтенсивним обміном компонентами між „малими” (до 5-8 нм) та „великими” (до 20 нм) “бульбашками”; малі (близькі до критичних розмірів) – скорочуються, а великі, в результаті дифузійних процесів, – збільшуються. Наступна стадія АС „квазі-кавітації” реалізується при досягненні “бульбашкою” певних, відносно великих розмірів, вона стає нестійкою і, попадаючи в поле підвищеного (для «антибульбашки” - розрідженого) акустичного тиску, втрачає стабільність та лускається (захлипується), породжуючи в середовищі УХ з високим тиском. В подальшому, в результаті ефекту деформаційного втягування домішкової атмосфери з оточення пульсуючого вакансійного кластера можлива АС трансформація структури вакансійних дефектів – з вакансійного до міжвузельного типу, з утворенням при цьому в кристалі дислокаційних петель.

Отже в результаті ЙІ в кристалі виникає метастабільний стан ДДС і роль зовнішньої

АХ (навіть не дуже інтенсивної) зводиться до запуску спускового механізму додаткового переходу ДДС в стабільний стан. Звичайно, інші дифузійні перебудовні процеси як для легованих атомів, так і власних радіаційних дефектів – відбуваються незалежно. В середньому по кристалу окремі зміни направлених дифузійних потоків домішкових атомів визначаються лише змінами їх коефіцієнтів дифузії як результат додаткових коливних напружень зовнішньої АХ, що є незначними [12]. В той же час абсолютно інша ситуація реалізується локально поблизу пульсуючих вакансійних комплексів, де виникають надзвичайно великі градієнти механічних напружень $\partial\sigma/\partial x$ та в областях кристала під час проходження УХ з дуже вузьким профілем (див. Табл. 1.) [13]. В цих умовах визначальними стають ефекти нелінійної взаємодії гармонічної АХ з внутрішніми деформаційними полями кристала. Наприклад, генерація ВЧ імпульсів з частотою порядку величини оберненого часу проходження АХ через неоднорідність (близько частоти фононів) і включення фононних резонансних механізмів дії на дифузію через підвищення заселеності домішкових квантових коливальних рівнів та відповідне зростання вірогідності міграції атома на інші рівні [14].

Цікаво, що при поширенні УХ в середовищі, яке знаходиться не в абсолютному мінімумі енергії, а лише у деякому проміжному метастабільному, який відділений від глобального енергетичним бар'єром, для подолання цього бар'єра достатньо передачі акустичної енергії ззовні. Роль такого спускового механізму може зіграти саме АХ, якщо швидкість дисипації енергії УХ при поширенні не перевищує величину енергії, що виділяється на фронті УХ.

Висновки

1. Розглянуто динамічні процеси в кремнії при йонно-променевої імплантації (*генерація дефектів; генерація акустичних сигналів*) та в рідині (*кавітація*). Зроблено порівняння ефектів від дії інтенсивних АХ у рідині та у кристалі.

2. На експериментальних прикладах (*збільшення аморфізованого шару Si; релакса-*

ція напружень в SiGe/Si) проілюстровано прояв „кавітаційного” механізму.

3. Запропонована модель АС „квазікавітації” вакансійних дефектів в напівпровідниках при ЙІ в умовах дії АХ.

Список використаної літератури

[1]. Machulin V. F., Lepikh Ya. I., Olikh Ya. M., Romaniuk B. M. Akustoelektronni ta akustionni tekhnologii // Visnyk NAN Ukrainy. – 2007. - No 5. S. 3-8 (*in Ukrainian*).

[2]. Lepikh Ya. I. Prykladna akustyka v medytsyni. Odesa: Astroprynt, 2005. - 208 s. (*in Ukrainian*).

[3]. Chelyadinskij A. R., Komarov F. F. Defektno-primesnaya inzheneriya v implantirovannom kremnii // UFN. – 2003. - T. 173. - № 8. - S. 813-846 (*in Russian*).

[4]. Olikh Ya. M. Pro mozhlyvosti akustokerovanoi inzhenerii defektiv u „nerivnovazhnykh napivprovodnykh” (ch. 1. Mekhanizmy). Novi tekhnologii No 2 (20) -2008. Naukovyi visnyk KUEITU. – S. 188-193 (*in Ukrainian*).

[5]. Demidov E. S., Karzanov V. V., Lobanov D. A., Markov K. A., Sdobnyakov V. V. Dal'nodejstvuyushchee vliyanie oblucheniya ionami argona na sintez stekhiometricheskoj fazy nitrida kremniya v cloyah Si_xN_y sformirovannykh ionnoj implantaciej //FTP. 2001, T. 35,– V. 1. – S. 21. (*in Russian*).

[6]. Romanjuk B., Kruger D., Melnik V., Popov V., Olikh Ya., Soroka V., Oberemok O. Ultrasound effect on radiation damages in boron implanted silicon. //Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. 2000, V. 3, N1, P. 15-18.

[7]. Romanyuk B., Krüger D., Melnik V., Popov V., Borshchagovskyi E., Olikh Ya., Soroka V. Mekhanisms of silicon amorphization at the US action during Ion Implantation. // Ukrainian Journal of Physics, 2001, Vol. 46, No2, P. 191-195.

[8]. Krüger D., Romanyuk B., Melnik V., Olikh Ja., Kurps R. Influence of in-situ US treatment during ion implantation on amorphization and junction formation in silicon// J. Vacuum Sci. & Technology. - 2002. - B20. -

№ 4. – P. 1448-1451.

[9]. Romanyuk B., Kladko V., Olikh Ya., et al. Enhanced relaxation of SiGe layers by He implantation supported by in situ us treatments// Mater. Sci. in Semicond. Processing, 8 (4), pp. 171-175, (2005).

[10]. Margulis M. A. Sonolyuminescenciya. UFN. 2000. T. 170, №3. S. 263 (*in Russian*).

[11]. Ovchinnikov V. V. UFN. 2008. T. 178, №9, S. 991-1001 (*in Russian*).

[12]. Bakaj A. S., Lozinskij I. P. Vliyanie zvuka na diffuziyu atomov primesi vnedreniya

v tverdom tele // FTT. –1986. –T. 28. –№8. –S. 2455–2457 (*in Russian*).

[13]. Titov V. V. Rol' mekhanicheskikh napryazhenij pri legirovanii materialov s pomoshch'yu ionnyh puchkov. Preprint IAEH-3774/11, 1983 (*in Russian*).

[14]. Pavlovich V. N. Enhanced diffusion of impurities and defect in crystal in conditions of ultrasonic and radiative excitation of crystal lattice // Phys. Stat. Sol. (b). – 1993. – Vol. 180, N1. – P. 97-105.

Стаття надійшла до редакції 22.06.2017 р.

UDC 534.29

DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.2.106604>

ACOUSTOSTIMULATED “QUASI-CAVITATION” OF VACANCY DEFECTS IN SEMICONDUCTORS AT THEIR HIGH-ENERGETIC IRRADIATION

Ya. M. Olikh¹, Ya. I. Lepikh²

¹ V. E. Lashkaryev Institute of semiconductor physics of NAS of Ukraine;

² Interdepartmental scientific-educational physics and technical centre of MES and NAS of Ukraine
e-mail: ndl_lepikh@onu.edu.ua

Summary

The article is devoted to the investigation of physical processes in semiconductor structures under the action of high-energy irradiation at Ar⁺, N⁺ and O⁺ ions implantation at simultaneous acoustic waves irradiation. A number of effects caused by an acoustic field stimulation has been revealed.

The explanation to the microstructured transformation of crystal defective – impurity structure from the positions of similarity of processes which occur at cavitation in liquids is given. The term “quasi-cavitation” which by the analogy is physically based on the effect of local high concentration of energy (pressure, temperatures and mechanical stress), which essentially effects on processes in semiconductors at ionic - beam implantation is entered.

Keywords: ionic implantation, acoustic waves, “quasi-cavitation”, semiconductors, defective - impurity structures

АКУСТОСТИМУЛЬОВАНА “КВАЗІКАВІТАЦІЯ” ВАКАНСІЙНИХ ДЕФЕКТІВ У НАПІВПРОВІДНИКАХ ПРИ ЇХ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНОМУ ОПРОМІНЕННІ

Я. М. Оліх¹, Я. І. Лепіх²

¹ Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України;

² Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр МОН і НАН України при
Одеському національному університеті імені І. І. Мечникова
e-mail: ndl_lepikh@onu.edu.ua

Реферат

Стаття присвячена дослідженню фізичних процесів у напівпровідникових структурах під дією високоенергетичного опромінення при імплантації іонів Ar^+ , N^+ і O^+ при одночасному опроміненні акустичними хвилями. Виявлено ряд ефектів обумовлених стимуляцією акустичним полем

Дається пояснення мікроструктурним перетворенням дефектно-домішкової структури кристала з позицій подібності процесів, що відбуваються при кавітації у рідинах. Вводиться термін “квазікавітація”, що за аналогією фізично базується на ефекті локальної високої концентрації енергії (тиску, температури і механічних напружень), яка суттєво впливає на процеси в напівпровідниках при іонно-променевої імплантації.

Ключові слова: іонна імплантація, акустичні хвилі, «квазікавітація», напівпровідники, дефектно-домішкові структури

OPTICAL AND OPTOELECTRONIC AND RADIATION SENSORS

ОПТИЧНІ, ОПТОЕЛЕКТРОННІ І РАДІАЦІЙНІ СЕНСОРИ

УДК 551.510.53

DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.2.106605>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА РАБОТУ ОПТИКО-ЛОКАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

В. И. Сантоний, И. А. Иванченко, Л. М. Будиянская

*Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова
ул. Дворянская 2, Одесса, Украина, 65082, тел. 723-34-61, e-mail: dirsony@ukr.net*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА РАБОТУ ОПТИКО-ЛОКАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

В. И. Сантоний, И. А. Иванченко, Л. М. Будиянская

Аннотация. Проведен сравнительный анализ взаимодействия оптического излучения с сосредоточенной преградой и аэрозольными образованиями естественного и искусственного происхождения.

Приведены экспериментальные результаты воздействия на работу оптико-локационного устройства (ОЛУ) таких параметров аэрозольной среды, как расстояние до кромки, плотность, глубина и структура образования.

Определены критерии распознавания твердой преграды и аэрозольной помехи по таким параметрам амплитудной характеристики отраженного сигнала, как крутизна нарастания, пороговый уровень, пространственное расположение максимума и временная флуктуация.

Предложены меры защиты ОЛУ от аэрозольных помех.

Ключевые слова: оптико-локационное устройство, аэрозольная помеха, распознавание, амплитуда сигнала

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ АЕРОЗОЛЬНИХ УТВОРЕНЬ НА РОБОТУ ОПТИКО-ЛОКАЦІЙНИХ ПРИСТРОЇВ

В. І. Сантоній, І. О. Іванченко, Л. М. Будіяньська

Анотація. Проведений порівняльний аналіз взаємодії оптичного випромінювання із зосередженою перешкодою і аерозольними утвореннями природного і штучного походження.

Приведені експериментальні результати дії на працю оптико-локаційного пристрою (ОЛП) таких параметрів аерозольного середовища, як відстань до кромки, щільність, глибина і структура утворення.

Визначені критерії розпізнавання твердої перешкоди і аерозольної перешкоди за такими параметрами амплітудної характеристики відбитого сигналу, як крутизна наростання, пороговий рівень, просторове розташування максимуму і часова флуктуація.

Запропоновані заходи захисту ОЛП від аерозольних перешкод.

Ключові слова: оптико-локаційний пристрій, аерозольна перешкода, розпізнавання, амплітуда сигналу

RESEARCH OF AEROSOL FORMATION INFLUENCE ON OPTICAL LOCATIONAL DEVICES OPERATION

V. I. Santoniy, I. A. Ivanchenko, L. M. Budienskaya

Abstract. A comparative analysis of interaction of optical radiation with a solid obstacle and aerosol formations of natural or artificial origin was carried out.

The results of optical electronic device (OED) interfered by such parameters of aerosol environment as the distance to the edge, density, depth and structure were provided.

The criteria of solid obstacle and aerosol interference identification in accordance with such parameters of amplitude characteristics of the reflected signal as steep increase, threshold level, maximum space location and temporary fluctuation were defined.

The measures of OED protection from aerosol interference were suggested.

Keywords: optical electronic device, aerosol interference, identification, signal amplitude

Введение

Аэрозольные помехи в открытом канале распространения оптического излучения относятся к числу наиболее весомых внешних воздействий на оптико-локационные устройства (ОЛУ) [1-3]. Следовательно, стабилизация или повышение точности измерений связаны с дополнительными функциональными нагрузками ОЛУ – обнаружением и распознаванием помеховых образований.

По данным [4] подавляющее большинство облаков и туманов имеет коэффициент рассеяния меньше $0,8 \text{ м}^{-1}$. Экспериментальные исследования свойств атмосферных оптических помех показали, что они оказывают сильное влияние на амплитудные и временные характеристики зондирующего импульса ОЛУ [5]. Дымы ослабляют световой поток в 10 раз при увеличении оптической плотности среды на 20 % [6].

В случае малых расстояний (2...5 м) увеличение концентрации водных или дымовых аэрозолей может привести в полной потере видимости. Очевидно, что обратное рассеяние световой энергии от аэрозольных образований естественного и искусственного происхождения может создавать существенную помеху для работы ОЛУ. Для оценки потенциальных характеристик ОЛУ, работающего в реальной атмосфере, требуются данные о свойствах оптических помех и степени их воздействия на полезный сигнал.

Имеющиеся сведения касаются оптико-микроразмерных параметров аэрозольных образований, измеренных методами доплеровских спектров отражения [7] и поляризационного лазерного зондирования [8]. Однако информации о строении частиц недостаточно для создания модели аэрозольного объекта, что актуализирует задачу измерения взаимодействия с ним методами, ориентированными на его объемные свойства.

Постановка задачи

Целью настоящей работы является исследование взаимодействия оптического излучения с аэрозольными образованиями различ-

ного происхождения, определение признаков наличия аэрозольных помех и использование их для помехозащиты ОЛУ.

Функциональное описание

Совершенствование ОЛУ предполагает сравнительный анализ сигналов, отраженных от сосредоточенной преграды и аэрозольных образований естественного или искусственного происхождения, с целью их различения. Суть анализа заключается в определении отличий регистрации фотоприемником излучения, генерированного излучателем в направлении объекта и отраженного им, и излучения, рассеянного аэрозольной средой в обратном направлении.

Соотношение между длиной линии зондирования l , рассеивающими характеристиками аэрозоля и отраженным сигналом $P(l)$ имеет вид [9]

$$P(l) = \frac{E}{l^2} A T^2(l) \beta(l), \quad (1)$$

где E – энергия излучения импульса;

$T(l)$ – прозрачность по линии зондирования между ОЛУ и рассеивающим объемом;

A – константа, определяемая параметрами приемной оптической системы и фотоприемника, а также геометрией пересечения лучей;

β – коэффициент обратного рассеяния.

Одним из определяющих признаков при анализе отраженного сигнала ОЛУ является крутизна нарастания его амплитуды. Из (1) следует, что помеховый сигнал является медленно изменяющимся по сравнению с сигналом от преграды, что может быть эффективно использовано для их различения.

Макет ОЛУ

В исследованиях использовался макет ОЛУ, электрическая схема которого построена на 2-канальному принципу приема-передачи (рис. 1).

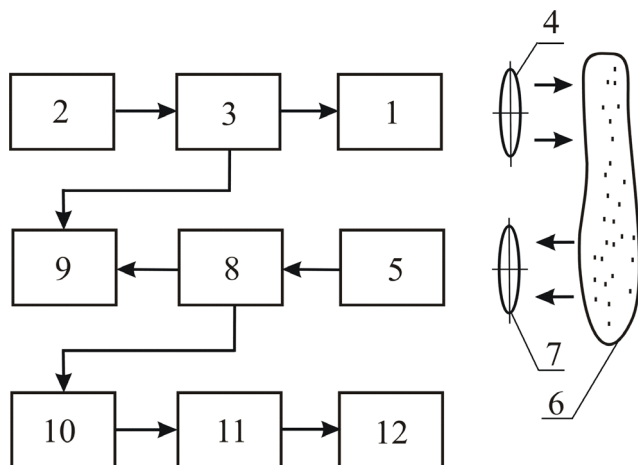


Рис. 1. Электрическая схема ОЛУ.

Передающий канал основан на GaAs-светодиоде 1 с длиной волны излучения 0,91 мкм. Излучатель 1 питается сигналом задающего генератора 2 с частотой повторения 4 кГц, поступающим через токовый ключ 3, и формирует оптические импульсы длительностью 50 нс. Импульсное ИК-излучение транслируется через передающий объектив 4 диаметром 16 мм с фокусным расстоянием 40 мм и углом расходимости $0,76^\circ$.

Приемный канал выполнен на базе Si-микросхемы M72, представляющей собой фотодиод с каскадом усиления. Отраженное от аэрозоля 6 излучение светодиода через приемный объектив 7, состоящий из линзы диаметром 16 мм с фокусным расстоянием 40 мм и полем зрения $1,6^\circ$, поступает на фотоприемник 5.

Сигнал фототвора усиливается на линейном усилителе 8 и через стробирующий каскад 9, обеспечивающий временную синхронизацию между передающим и приемным каналами, поступает на компаратор 10. Компаратор 10 осуществляет ограничение сигнала по амплитуде. Функцию помехозащиты выполняет последующее временное устройство 11, работающее в режиме накопления импульсов отраженного сигнала.

Оконечный каскад приемного канала составляет исполнительное устройство 12, формирующее электрический, акустический или световой сигнал.

Базовое расстояние между оптическими осями приемной и передающей систем составляет 100 мм.

Экспериментальные результаты

Исследования взаимодействия оптического излучения с аэрозолями и дымами проводились в камере искусственных аэрозолей в диапазоне плотностей, включающем реальные атмосферные образования.

Исследования проводились по следующим направлениям.

1. Измерения зависимости амплитуды отраженного сигнала от прозрачности оптического канала или плотности аэрозольной помехи показали, что при возрастании концентрации аэрозольных частиц от 1 до $5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$, что соответствует дымам и слабым туманам, отраженный сигнал обратного рассеяния колеблется в пределах 10-100 мВ. Это на 2-3 порядка ниже, чем при отражении от поверхности со средним коэффициентом отражения $\rho = 0,35$.

Отсюда следует, что в данных пределах концентраций аэрозольных частиц обратное рассеяние не приводит к пороговому срабатыванию зондирующего устройства. При дальнейшем увеличении концентрации частиц до $15 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ сигналы, отраженные от аэрозоля и поверхности, становятся соизмеримыми. Эти результаты согласуются с расчетными и экспериментальными данными о величине аэрозольного затухания, в соответствии с которыми величина отраженной мощности меньше мощности источника излучения на 66-84 дБ [10].

Установлено, что величина мощности обратного рассеяния с ростом коэффициента ослабления аэрозоля вначале растет, а потом имеет тенденцию к спаду.

Экспериментальные временные зависимости напряжения фотодиода $U_{\text{фд}}$, пропорционального объемной концентрации аэрозоля (рис. 2), измерены в аэрозольной камере объемом 1 м³ при пиролизе (тлении) или сжигании древесины (кривые 1, 2) и «городской смеси» (кривые 3, 4) соответственно.

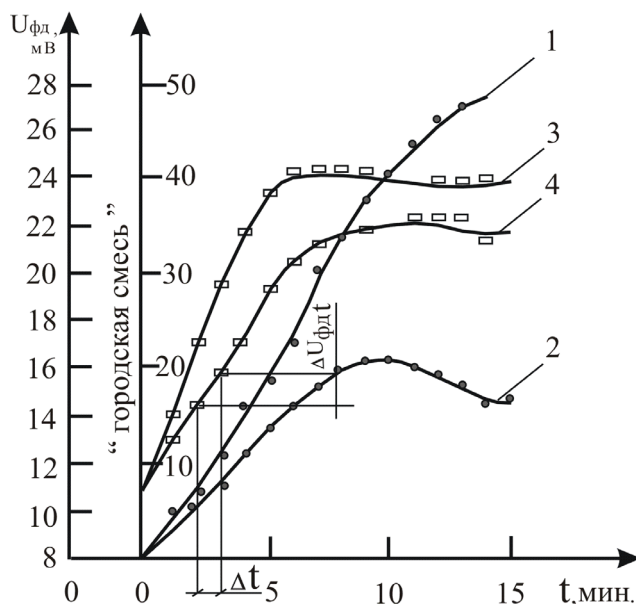


Рис. 2. Зависимости $U_{\phi}(t)$: 1, 2 – дерево; 3, 4 – «городская смесь»; 1, 3 – тление (пиролиз); 2, 4 – горение.

По данным рис. 2 рост объемной концентрации аэрозоля характеризуется линейным ростом U_{ϕ} . Последующие участки насыщения и спада U_{ϕ} объясняются процессами коагуляции частиц и агрегатобразования, которые выражаются в минимуме усреднении концентрации частиц, и повышением доли поглощательных процессов.

2. Исследование зависимости амплитуды помехового сигнала от расстояния до кромки аэрозольной среды показало, что четкую границу аэрозоля устройство не регистрирует (рис. 3). При малых значениях коэффициента рассеяния крутизна нарастания сигнала, отраженного от сосредоточенной преграды, (кривая 1) существенно выше, чем помехового сигнала от аэрозоля (кривые 2, пар, 3, дым). Отраженный от аэрозоля сигнал формируется, в основном, на расстоянии 3 м и при $\beta = 0,05 \div 0,4 \text{ м}^{-1}$ содержит экстремальную область на дальностях 1 ÷ 1,5 м.

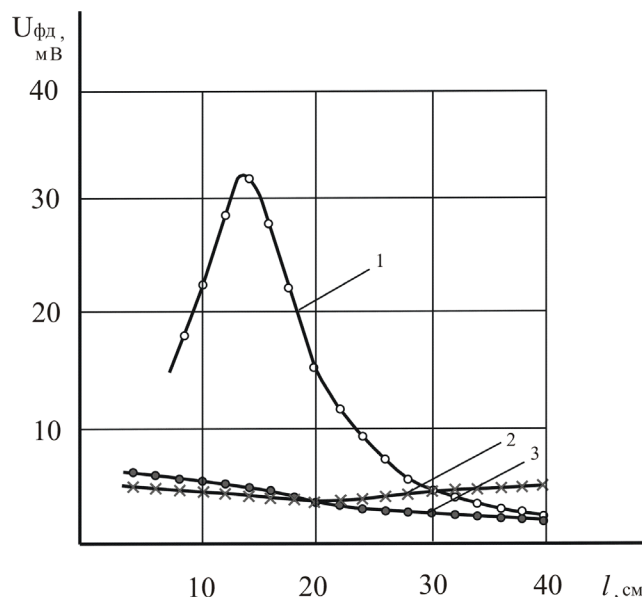


Рис. 3. Зависимости амплитуды отраженного сигнала от расстояния до кромки облачности.

3. Экспериментально определялись глубины области аэрозольных образований, способных сформировать сигнал порогового уровня в ОЛУ приведенной структуры. Высокая чувствительность фотоприемника ($\sim 10^{-8} \text{ Вт}$) определяет порог срабатывания ОЛУ, что соответствует оптической плотности аэрозоля не более 5 %.

Геометрические параметры аэрозольной помехи, способной вызвать сбой в работе ОЛУ, составляют 3 м для естественных облачных покровов и сокращаются до 0,35 м в искусственных образованиях. Эти величины имеют определяющее значение при построении оптико-электронных схем распознавания метеопреобразований и реальных предметов.

4. Исследование структуры отраженного сигнала ориентировалось на различение сосредоточенной преграды и аэрозольной среды. Локационный контраст преграды на фоне или в среде аэрозольных образований определяется динамическими параметрами последней (плотность, коэффициент рассеяния, его градиент и пр.) [11].

Известно [4], что сигнал от сосредоточенной преграды является нефлуктуирующим процессом. При описании структуры помехового сигнала от однородной облачности

существуют противоречия, в соответствии с которыми этот сигнал может быть представлен одновременно в виде **флуктуирующего и нефлуктуирующего процесса**, что подтверждается результатами практических исследований [10]. Поэтому точное описание статистической структуры помехового сигнала, в том числе для реальной облачности, можно получить при непосредственных испытаниях конкретного образца ОЛУ.

Анализ результатов исследования сигнала, отраженного аэрозолем, показал, что его амплитуда флуктуирует во времени с частотой 0,5-10 Гц. Исходя из этого, наиболее близкой представляется модель взаимодействия сигналов с аэрозольной средой, учитывающая влияние на процессы рассеяния флуктуации динамических параметров среды.

При скоростях движения до 30 м/с и величине глубины отражений аэрозоля 1,0-1,5 м, существующего в реальной атмосфере, частота флуктуаций амплитуды отраженного сигнала достигает $2,5 \div 5$ кГц. Соответственно период осцилляций амплитуды составляет $0,4 \div 0,2$ мс. Очевидно, что флуктуации амплитуды отраженного сигнала, связанные с движением, могут быть использованы для построения защиты ОЛУ от помех, создаваемых обратным рассеянием.

О характере зависимости величины полезного сигнала фотоприемного устройства от наличия аэрозольных помех можно судить по экспериментальным кривым рис. 4. Они представляют **дистанционные характеристики ОЛУ**, работающего в задымленной атмосфере (кривая 1) с координатой a границы образования и в чистой атмосфере (кривая 2). Очевидно, что аэрозольная помеха влияет как на амплитуду отраженного сигнала, так и на пространственное положение его максимума, что может послужить причиной ложного срабатывания устройства.

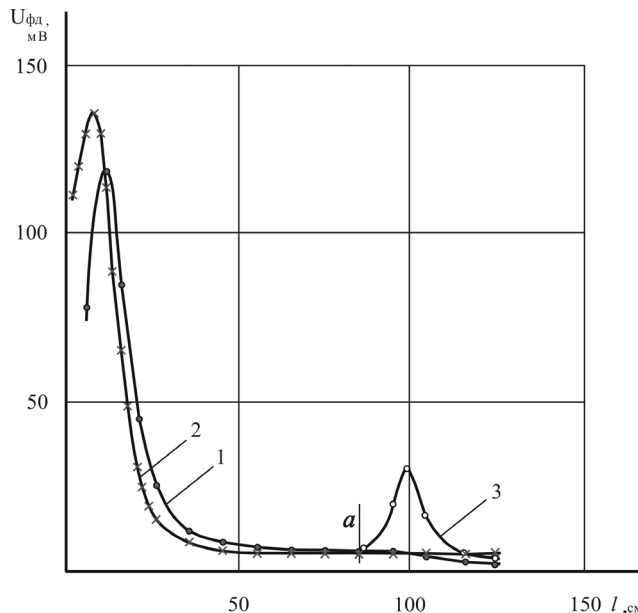


Рис. 4. Дистанционные зависимости полезного сигнала ОЛУ: 1 – в дыму; 2 – в чистой атмосфере; 3 – от черного экрана.

Кривая 3, представляющая зависимость сигнала, отраженного экраном с $\rho = 0,05$, подтверждает существенные различия в характере отражения световых потоков аэрозольными и непрерывными препятствиями, что пригодно как признак для их различения.

Выводы

1. Определен диапазон значений плотности аэрозольной среды, в пределах которого обратное рассеяние не приводит к пороговому срабатыванию ОЛУ.

2. Определяющими признаками наличия аэрозольной среды является крутизна нарастания помехового сигнала, которая значительно ниже, чем от преграды, и флуктуации амплитуды отраженного сигнала, связанные с движением ОЛУ.

3. Установлена зависимость между чувствительностью фотоприемника ОЛУ, определяющей порог срабатывания, и глубиной области аэрозольных образований, способных сформировать сигнал порогового уровня.

4. Определены возможности защиты ОЛУ от действия аэрозольных помех.

Список использованной литературы

- [1]. Yu. G. Yakushenkov, V. N. Lukancev, M. P. Kolosov. Metody borby s pomехami v optiko-elektronnyh priborah. Radio i svyaz, M. 180 s. (1981) (*in Russian*).
- [2]. V. V. Protopopov, N. D. Ustinov. Infrakrasnye lazernye lokacionnye sistemy. Voenizdat, M. 175 s. (1987) (*in Russian*).
- [3]. V. E. Zuev, V. Ya. Fadeev. Lazernye navigacionnye ustrojstva. Radio i svyaz, M. 160 s. (1987) (*in Russian*).
- [4]. V. E. Zuev, M. V. Kabanov. Optika atmosfernogo aerolya. Gidrometeoizdat, L. 254 s. (1987) (*in Russian*).
- [5]. Opticheskaya pogoda / V. E. Zuev, B. D. Belan, G. O. Zadde. Nauka, Sib. Otdelenie, Novosibirsk. 192 s. (1990) (*in Russian*).
- [6]. Optika pyledymovyh oblakov pri dvizhenii obektov bronetankovoj tehniki / G. A. Barsukov, I. A. Mogilyuk, V. V. Sadchikov, A. V. Serebryakov, T. A. Smirnova, Yu. G. Toporkov; Pod obsh. red. Yu. G. Toporkova. NTC «Informtehnika», M. 152. (1993) (*in Russian*).
- [7]. A. R. Nasyrov, V. V. Sadchikov. Doplerovskaya lokaciya avtotransporta, dvizhushego v pyl'evom oblake // Opticheskij zhurnal, №2, s 33-36 (1994) (*in Russian*).
- [8]. V. E. Zuev, B. V. Kaul, I. V. Samohvalov i dr. Lazernoe zondirovanie industrialnyh aerolyej. Nauka, Novosibirsk. 185 s. (1986) (*in Russian*).
- [9]. S. P. Belyaev, N. K. Nikiforova, V. V. Smirnov, G. I. Shelchikov. Optiko-elektronnye metody izucheniya aerolyej. Energoizdat, M. 232 s. (1981) (*in Russian*).
- [10]. M. P. Musyakov, I. D. Micenko, G. G. Vaneev. Problemy blizhnej lazernoj lokacii. Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, M. 296 s. (2000) (*in Russian*).
- [11]. A. R. Nasyrov and V. V. Sadchikov. Ranging contrasts of objects moving in dust clouds // J. Opt. Technol., 70 (2), pp. 85-87 (2003).

Стаття надійшла до редакції 02.12.2016 р.

UDC 551.510.53

DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.2.106605>

RESEARCH OF AEROSOL FORMATION INFLUENCE ON OPTICAL LOCATIONAL DEVICES OPERATION

V. I. Santoniy, I. A. Ivanchenko, L. M. Budiynskaya

Mechnikov's Odessa National University
st. Dvoryanska, 2, Odessa, Ukraine, 65082, тел. 723-34-61, e-mail: dirsony@ukr.net

Summary

This work is aimed at investigating the interaction of optical radiation with aerosol formations of various origin, determining the aerosol interference signs and using them for interference immunity.

The research method basis is the relationship between the amplitude of the reflected signal and the aerosol scattering characteristics, as well as the length of the sensing line.

The investigations were carried out in a chamber of artificial aerosols in the density range including real atmospheric formations.

In the studies we used OED model whose electrical circuit was built on a 2-channel transmit-receive principle. The transmission channel is based on a GaAs-LED with a radiation wavelength of

0.91 μm . The receiving channel is made on the Si-microcircuit M72 basis, which is a photodiode with an amplification cascade.

The measured dependences of the reflected signal amplitude on the aerosol interference density showed that at a reflected power value of less than the radiation source power, no OED threshold triggering occurs at 66-84 dB.

The dependence of the reflected signal amplitude on the distance to the aerosol environment edge showed that there is no clear aerosol boundary detection, but an interference signal is formed at a distance determined by the backscattering radiation coefficient. The threshold signal detection by the photodetector was used to determine the depth of the aerosol formations location, which could cause OED failure.

The OED amplitude characteristic research during motion in an aerosol environment showed the presence of density fluctuations that cause amplitude oscillations.

The result of this work is the determination of the value range of the aerosol environment density, in which the radiation backscattering does not lead to the OED threshold triggering. The signs of the aerosol environment presence are identified as the increase steepness in the interference signal and the fluctuations in the reflected signal amplitude with respect to the OED motion are low relative to the obstacle.

The relationship between the OED detector threshold and the area depth of aerosol formations is established.

The work results make it possible to form interference immunity methods from the aerosol formations effects.

Keywords: optical electronic device, aerosol interference, identification, signal amplitude

УДК 551.510.53

DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.2.106605>

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ АЕРОЗОЛЬНИХ УТВОРЕНЬ НА РОБОТУ ОПТИКО-ЛОКАЦІЙНИХ ПРИСТРОЇВ

В. І. Сантоній, І. О. Иванченко, Л. М. Будіянська

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,
вул. Дворянська, 2, Одеса, Україна, 65082, тел. 723-34-61, e-mail: dirsony@ukr.net

Реферат

Метою роботи є дослідження взаємодії оптичного випромінювання з аерозольними утвореннями різного походження, визначення ознак наявності аерозольних перешкод і використання їх для перешкодозахисту оптико-локаційного пристрою (ОЛП).

В основу методу дослідження покладено співвідношення між амплітудою відбитого сигналу і розсіювальними характеристиками аерозоля, а також довжиною лінії зондування. Дослідження проводилися в камері штучних аерозолів у діапазоні щільностей, що включає реальні атмосферні утворення.

У дослідженнях використовувався макет ОЛП, електрична схема якого побудована по 2-канальному принципу прийому-передачі. Передавальний канал ґрунтований на GaAs-світлодіоді

з довжиною хвилі випромінювання 0,91 мкм. Приймальний канал виконаний на базі Si-мікросхеми M72, що є фотодіодом з каскадом посилення.

Виміряні залежності амплітуди відбитого сигналу від щільності аерозольної перешкоди показали, що при величині відбитої потужності меншої потужності джерела випромінювання на 66-84 дБ порогового спрацьовування ОЛП не відбувається.

Залежність амплітуди відбитого сигналу від відстані до кромки аерозольного середовища показала, що чіткої реєстрації межі аерозолю не відбувається, але на відстані, визначуваній коефіцієнтом зворотного розсіювання випромінювання, формується перешкодовий сигнал.

Методом реєстрації фотоприймачем порогового сигналу визначалася глибина області аерозольних утворень, здатна викликати збій в роботі ОЛП.

Дослідження амплітудної характеристики ОЛП при русі в аерозольному середовищі показало наявність флуктуацій щільності, що викликають осциляції амплітуди.

Результатом роботи є визначення діапазону значень щільності аерозольного середовища, в якому зворотне розсіювання випромінювання не приводить до порогового спрацьовування ОЛП. Виділені ознаки наявності аерозольного середовища – низька відносно перешкоди крутість наростання перешкодового сигналу і флуктуації амплітуди відбитого сигналу при русі ОЛП.

Встановлений взаємозв'язок порогу спрацьовування фотоприймача ОЛП із глибиною області аерозольних утворень.

Результати роботи дозволяють сформулювати методи перешкодозахисту від дії аерозольних утворень.

Ключові слова: оптико-локаційний пристрій, аерозольна перешкода, розпізнавання, амплітуда сигналу

ACOUSTOELECTRONIC SENSORS

АКУСТОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ

PACS 81.07.Bc, 66.30.Lw

DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.2.106606>

ВПЛИВ ДИПОЛЬ-ДИПОЛЬНОЇ ВЗАЄМОДІЇ АДАТОМІВ НА ЗАКОН ДИСПЕРСІЇ ТА ШИРИНУ АКУСТИЧНОЇ ФОНОННОЇ МОДИ КВАЗІРЕЛЕЄВСЬКОЇ ХВИЛІ

М. Я. Сенета, Р. М. Пелешак

Кафедра загальної фізики

Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка

вул. Стрийська, 3, Дрогобич, Львівська обл., 82100

E-mail: marsen18@i.ua

ВПЛИВ ДИПОЛЬ-ДИПОЛЬНОЇ ВЗАЄМОДІЇ АДАТОМІВ НА ЗАКОН ДИСПЕРСІЇ ТА ШИРИНУ АКУСТИЧНОЇ ФОНОННОЇ МОДИ КВАЗІРЕЛЕЄВСЬКОЇ ХВИЛІ

М. Я. Сенета, Р. М. Пелешак

Анотація. У межах нелокальної пружної взаємодії адсорбованого атома з атомами матриці з врахуванням диполь-дипольної взаємодії адатомів та сил дзеркального зображення знайдено в довгохвильовому наближенні закон дисперсії поверхневої квазірелеєвської акустичної хвилі, який враховує залежність від концентрації адатомів, деформаційного потенціалу та температури субстрату. Розраховано зміну енергетичної ширини поверхневої акустичної моди, зумовленої диполь-дипольною взаємодією адсорбованих атомів при температурах 100 K і 300 K.

Ключові слова: диполь-дипольна взаємодія, адатоми, сили дзеркального зображення, акустична квазірелеєвська хвиля

INFLUENCE OF ADATOMS DIPOLE-DIPOLE INTERACTION ON THE DISPERSION LAW AND ACOUSTIC PHONON MODE WIDTH OF QUASI-RAYLEIGH WAVE

M. Ya. Seneta, R. M. Peleshchak

Abstract. Within the nonlocal elastic interaction between adsorbed atoms and matrix atoms taking into account the adatoms dipole-dipole interaction and mirror image forces the dispersion law of quasi-Rayleigh surface acoustic wave is found in the long-wave approximation. The dependences on the adatoms concentration, the deformation potential and the substrate temperature are taken into account. The change of energy width of the surface acoustic mode is calculated. The change is caused of adsorbed atoms dipole-dipole interaction at the temperatures 100 K and 300 K.

Keywords: dipole-dipole interaction, adatoms, mirror image forces, acoustic quasi-Rayleigh wave

ВЛИЯНИЕ ДИПОЛЬ-ДИПОЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АДАТОМОВ НА ЗАКОН ДИСПЕРСИИ И ШИРИНУ АКУСТИЧЕСКОЙ ФОНОННОЙ МОДЫ КВАЗИРЕЛЕЕВСКОЙ ВОЛНЫ

М. Я. Сенета, Р. М. Пелещак

Аннотация. В рамках нелокального упругого взаимодействия адсорбированного атома с атомами матрицы с учетом диполь-дипольного взаимодействия адатомов и сил зеркального изображения найдено в длинноволновом приближении закон дисперсии поверхностной квазирелеевской акустической волны, учитывающий зависимость от концентрации адатомов, деформационного потенциала и температуры субстрата. Рассчитано изменение энергетической ширины поверхностной акустической моды, обусловленной диполь-дипольным взаимодействием адсорбированных атомов при температурах 100 К и 300 К.

Ключевые слова: диполь-дипольное взаимодействие, адатомы, силы зеркального изображения, акустическая квазирелеевская волна

1. Вступ

Дослідження впливу неоднорідностей поверхні (адсорбовані атоми, шорховатість поверхні) на розповсюдження поверхневих акустичних хвиль (ПАХ) представляє не тільки теоретичний інтерес, але й може знайти практичне використання в області неруйнівного контролю [1]. Характеристики розповсюдження поверхневих хвиль – області існування, спектр, ширина акустичної фоновної моди та розподіл поля – залежать від властивостей поверхні та межі поділу середовищ. Зокрема, вони суттєво видозмінюються, якщо на поверхні є адсорбовані атоми або поверхня (межа поділу) не є гладкою і має періодичні

або випадкові нерівності. На адсорбованих атомах і на нерівностях поверхні відбувається багатократне розсіяння поверхневої хвилі. При значних концентраціях адсорбовані атоми починають взаємодіяти як між собою (диполь-дипольна взаємодія та взаємодія, яка пов'язана з силами дзеркального зображення, прикладеними до поверхні кристалу), так і з атомами підкладки (взаємодія адсорбованого атома з атомами матриці в наближенні нелокального закону Гука) і з поверхневою акустичною хвилею через деформаційний потенціал [2]. Наявність адсорбованих атомів і динамічної деформації, створеної поверхневою акустичною хвилею, приводить до перенормування спектру поверхневих акустичних

хвиль, ширини фононної моди та до виникнення локалізованих електронних станів поблизу двовимірних нерівностей на поверхні [3]. Дослідження механізмів збудження електронних станів на адсорбованій поверхні напівпровідників з врахуванням поверхневої акустичної хвилі є необхідним для створення сучасних мікро- і нанoeлектронних приладів з керованими параметрами.

У роботах [4,5] було досліджено вплив взаємодії адатомів із самоузгодженою акустичною квазірелеєвською хвилею на її дисперсію та ширину фононної моди при різних значеннях концентрації адсорбованих атомів без врахування диполь-дипольної взаємодії адсорбованих атомів.

У цій роботі в довгохвильовому наближенні проведено дослідження впливу диполь-дипольної взаємодії адсорбованих атомів на спектр та ширину поверхневих акустичних мод квазірелеєвської хвилі у межах узагальненої моделі напівпровідника Халдейна-Андерсона.

2. Модель взаємодії адатомів з поверхневою акустичною хвилею (ПАХ) з урахуванням диполь-дипольної взаємодії адатомів

Нехай у процесі молекулярно-променевої епітаксії (МПЕ) на поверхню напівпровідника $z=0$ (вісь z напрямлена з поверхні монокрystalу в глибину) напрямлений потік атомів. При скінченних концентраціях адсорбовані атоми починають взаємодіяти як між собою, так і з атомами підкладки. Існують такі основні канали взаємодії адатомів: диполь-дипольне відштовхування заряджених адатомів; опосередкована взаємодія (обмін) адатомів через електрони субстрату; прямий обмін, що виникає при безпосередньому перекритті орбіталей сусідніх атомів [6]; взаємодія, яка пов'язана з силами дзеркального зображення, прикладеними до поверхні кристалу [4] та взаємодія адатомів з атомами підкладки через деформаційний потенціал поверхневої акустичної хвилі [5, 7, 8]. Необхідно зазначити, що диполь-дипольна взаємодія заряджених адатомів домінує при адсорбції атомів лужних металів, газів на d -металах і напівпровідниках [9]. Як було показано у роботі [10], при малих адсорбованих покриттях електростатична дія

інших адатомів на виділений адатом () може бути описана потенціалом $V_{d-d}(\vec{r})$.

$$V_{d-d}(\vec{r}) \approx -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} 2e^2 l^2 \bar{A} Z_a(\theta) N_d^{3/2}(x), \quad (1)$$

де $\theta = N_d(x)/N_{ML}$ – ступінь покриття поверхні адатомами, $N(x)$ – число адатомів на поверхні напівпровідника; N_{ML} – число адатомів у моношарі ($0 \leq \theta \leq 1$); $\bar{A} \approx 10$ – коефіцієнт, який несуттєво залежить від геометрії адсорбованого шару; $l = r_a + r_s$ – довжина адсорбційного зв'язку (, – атомні радіуси адсорбованого атома і атома напівпровідника, з яким адатом безпосередньо зв'язаний). Заряд $Z(\theta)$ адатома визначається через число заповнення адатома n_a , тобто $Z_a = -n_a$. Число заповнення n_a адатомів знаходиться в межах моделі Халдейна-Андерсона [9, 11].

$$n_a = \sum_{\sigma} (n_{v\sigma} + n_{c\sigma} + n_{l\sigma}), \quad (2)$$

де $n_{v\sigma}$, – внески у числа заповнення адатома, зумовлені взаємодією стану адатома з континуумом станів валентної зони та зони провідності відповідно; $n_{c\sigma}$ – число заповнення локальних рівнів, які виникають в адсорбованій системі.

$$n_{v\sigma} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{-\Delta/2} \frac{\Gamma}{[\omega - \epsilon_{a\sigma} - \Lambda(\omega)]^2 + \Gamma^2} f(\omega) d\omega, \quad (3)$$

$$n_{c\sigma} = \frac{1}{\pi} \int_{\Delta/2}^{\infty} \frac{\Gamma}{[\omega - \epsilon_{a\sigma} - \Lambda(\omega)]^2 + \Gamma^2} f(\omega) d\omega,$$

$$n_{l\sigma} = \left[1 + \frac{1}{\pi} \frac{\Gamma \Delta}{(\Delta/2)^2 - \omega_{l\sigma}^2} \right]^{-1} f(\omega_{l\sigma}), \quad (4)$$

де $f(\omega) = \{1 + \exp[(\omega - \mu)/k_B T]\}^{-1}$ – функція розподілу Фермі-Дірака, μ – хімічний потенціал; k_B – стала Больцмана; Δ – ширина забороненої зони напівпровідника.

Енергія локальних адсорбованих рівнів знаходиться з рівняння

$$\omega - \epsilon_{a\sigma} - \Lambda(\omega) = 0, \quad (5)$$

де ϵ – енергія атомного електрона у стані $|a\sigma\rangle$ із врахуванням кулонівського відштовхування електронів із протилежними спінами [9].

Півширина $\Gamma(\omega)$ і гібридизаційний зсув $\Lambda(\omega)$ квазірівня адатома визначається:

$$\Gamma(\omega) = \begin{cases} \pi V^2 \rho_s \equiv \Gamma, & |\omega| \geq \Delta/2, \\ 0, & |\omega| < \Delta/2; \end{cases} \quad (6)$$

$$\Lambda(\omega) = \frac{\Gamma}{\pi} \ln \left| \frac{\Delta/2 - \omega}{\Delta/2 + \omega} \right|,$$

де $\rho_s(\omega)$ – енергетична густина станів власного напівпровідника

$$\rho_s(\omega) = \begin{cases} \rho_s, & |\omega| \geq \Delta/2, \\ 0, & |\omega| < \Delta/2. \end{cases} \quad (7)$$

Необхідно зазначити, що у випадку адсорбції атомів лужних металів, заряд адатома є порядку одиниці, а довжину адсорбційного зв'язку l можна прирівняти до іонного радіусу адатома r_i [12]. При адсорбції газів заряд адатомів порівняно невеликий. Для оцінки кулонівського зсуву у якості l можна брати атомний радіус r_a [13].

Завдяки деформаційному потенціалу та локальному перенормуванню поверхневої енергії як адсорбовані атоми, так і поверхнева пружна акустична квазірелеєвська хвиля неоднорідно деформують приповерхневий шар товщиною a (a – період ґратки в напрямі осі z). У свою чергу, виникаюча неоднорідна самоузгоджена деформація через потенціал деформації перерозподіляє адсорбовані атоми уздовж поверхні, тобто індукує додатковий деформаційно-дифузійний потік адатомів [8]. Вплив адсорбованих атомів зводиться до зміни крайових умов для тензора напруг σ_{ij} на поверхні $z=0$.

Вектор зміщення точок середовища $\vec{u}(\vec{r}, t)$ задовольняє рівняння [4]:

$$\frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = c_i^2 \Delta_{\vec{r}} \vec{u} + (c_l^2 - c_t^2) \text{grad}(\text{div} \vec{u}) \quad (8)$$

Розв'язок рівняння (8) для поверхневої хвилі Релея, яка розповсюджується у напрямку

осі x , представляємо у вигляді:

$$\begin{aligned} u_x(x, z) &= -iqAe^{iqx-i\omega t-k_l z} - ik_l B e^{iqx-i\omega t-k_l z}, \\ u_z(x, z) &= k_l A e^{iqx-i\omega t-k_l z} + qB e^{iqx-i\omega t-k_l z}, \end{aligned} \quad (9)$$

де $k_{l,z}^2 = q^2 - \frac{\omega^2}{c_{l,z}^2}$; A, B – амплітуди ПАХ.

Напрямок x на поверхні кристала визначається пружною анізотропією, а на ізотропній поверхні визначається зовнішньою дією, яка індукує пружну анізотропію або завдяки спонтанному порушенню симетрії дефектно-деформаційної системи.

Просторово-неоднорідна поверхнева деформація $\varepsilon(x, t)$ приводить до неоднорідного перерозподілу адатомів $N_d(x, t)$:

$$N_d(x, t) = N_{0d} + N_{1d}(q) e^{iqx-i\omega t}, \quad (10)$$

де N_{0d} – просторово-однорідна складова концентрації адатомів; $N_{1d}(q)$ – амплітуда періодичного збурення ($N_{1d} \ll N_{0d}$).

Енергія взаємодії адсорбованого атома з атомами матриці W_{da} в наближенні нелокального закону Гука визначається як:

$$W_{da}^{\text{int}}(x) = -K\varepsilon(x)\Delta\Omega_d - K \frac{\partial^2 \varepsilon(x)}{\partial x^2} l_d^2 \Delta\Omega_d, \quad (11)$$

де K – модуль пружності; $\Delta\Omega$ – зміна об'єму кристала, зумовлена одним адсорбованим атомом; l_d – середнє значення квадрата характеристичної відстані взаємодії адатома з атомами матриці [4].

Поряд із пружною взаємодією адсорбованих атомів, яка зменшується з відстанню за степеневим законом, існує взаємодія, яка плавно змінюється на відстанях порядку розміру кристалу й пов'язана з силами дзеркального зображення, прикладеними до поверхні кристала. Така енергія W_{dd}^{int} взаємодії адсорбованого атома з іншими адатомами може бути визначена [14]:

$$W_{dd}^{\text{int}}(x) = -\frac{2}{3} \frac{1-2\nu}{K(1-\nu)a} \theta_d^2 N_d(x), \quad (12)$$

де ν – коефіцієнт Пуассона; $\theta_d = K \cdot \Delta\Omega_d$ – поверхневий деформаційний потенціал.

Пружне поле, що виникає в імплантованій адатомами матриці, діє на адатом із силою

$$F = -\frac{\partial(W_{da}^{int}(x) + V_{d-d}(x) + W_{dd}^{int}(x))}{\partial x} = \theta_d \frac{\partial \varepsilon(x, t)}{\partial x} + \theta_d l_d^2 \frac{\partial^3 \varepsilon(x, t)}{\partial x^3} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} 2e^2 l^2 \bar{A} Z_a(\theta) \frac{\partial N_d^{3/2}(x)}{\partial x} + \frac{2}{3} \frac{1-2\nu}{K(1-\nu)a} \theta_d^2 \frac{\partial N_d(x)}{\partial x}, \quad (13)$$

яка індукує, окрім звичайного дифузійного потоку $\left(-D_d \frac{\partial N_d(x)}{\partial x}\right)$, додатковий деформаційний потік адатомів. Цей додатковий деформаційний потік адатомів зумовлений градієнтами деформації $\frac{\partial \varepsilon(x, t)}{\partial x}$ й концентрації $\frac{\partial N_d(x)}{\partial x}$ дефектів.

Під дією сили (13) адатоми у пружному полі отримують швидкість

$$v = \mu \cdot F = \frac{D_d \theta_d}{k_B T} \frac{\partial \varepsilon(x, t)}{\partial x} + \frac{D_d \theta_d l_d^2}{k_B T} \frac{\partial^3 \varepsilon(x, t)}{\partial x^3} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{D_d}{k_B T} 2e^2 l^2 \bar{A} Z_a(\theta) \frac{\partial N_d^{3/2}(x)}{\partial x} + \frac{2}{3} \frac{1-2\nu}{K(1-\nu)} \frac{D_d \theta_d^2}{k_B T a} \frac{\partial N_d(x)}{\partial x}, \quad (14)$$

де μ – коефіцієнт дифузії адатома; T – температура субстрату. Тут для визначення рухливості адатомів використано співвідношення Ейнштейна.

З урахуванням наближення (10) та взаємодій (1), (11), (12) рівняння для концентрації адатомів набуде вигляду:

$$\begin{aligned} &(-i\omega + D_d(1 - \frac{2}{3} \frac{1-2\nu}{K(1-\nu)a} \frac{\theta_d^2}{k_B T} N_{0d} - \\ & - \frac{3}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{k_B T} e^2 l^2 \bar{A} Z_a(\theta) N_{0d}^{3/2}) q^2) N_{1d}(q) = \\ & = \frac{D_d \theta_d}{k_B T} N_{0d} \varepsilon(q) q^2 (1 - l_d^2 q^2). \end{aligned} \quad (15)$$

З рівняння (15) отримаємо вираз для амплітуди поверхневої концентрації адатомів $N_d(q)$.

Просторово-неоднорідний розподіл адатомів модулює поверхневу енергію, що приводить до виникнення латеральної механічної напруги

$$\sigma_{xz} = \frac{\partial F(N(x))}{\partial x}, \quad (16)$$

яка компенсується напругою зсуву в середовищі [15].

Межова умова виражає баланс латеральних напруг:

$$\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \Big|_{z=0} = \left(\frac{\partial F}{\partial N_d} \right) \frac{\partial N_{1d}(x)}{\partial x}, \quad (17)$$

де μ – модуль зсуву середовища.

Крім цього, в результаті взаємодії адатомів з атомами напівпровідника на поверхні виникає нормальна механічна напруга, де межова умова має вигляд

$$\left(\frac{\partial u_z}{\partial z} + (1-2\beta) \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) \Big|_{z=0} = \frac{(\theta_d + V_{d-d}) N_{1d}(x)}{\rho c_l^2 a}, \quad (18)$$

де a – параметр кристалічної ґратки на по-

верхні напівпровідника; $\beta = \frac{c_t^2}{c_l^2}$; ρ – густина кристалу.

3. Дисперсійне рівняння та ширина акустичної фононої моди квазірелеєвської хвилі з урахуванням диполь-дипольної взаємодії адатомів

Для отримання дисперсійного рівняння для поверхневої акустичної хвилі, яка взаємодіє з адсорбованими атомами підставимо (15), з врахуванням (10), а також (8) і (9), у (17) і (18).

$$\begin{aligned} &(q^2 + k_t^2)^2 - 4q^2 k_t k_i = -\frac{2}{\beta} \frac{\omega^2}{c_l^2} \frac{\theta_d N_{0d}}{k_B T \rho c_l^2} \cdot \\ & \cdot \frac{D_d q^2}{-i\omega + D_d(1 + W_{dd}^{int} + \frac{3}{2k_B T} V_{0d-d}) q^2} \times \\ & \times (1 - l_d^2 q^2) \cdot \left(q^2 k_t \frac{\partial F}{\partial N_d} + (q^2 + k_t^2) \frac{\theta_d + V_{0d-d}}{2a} \right), \end{aligned} \quad (19)$$

$$\text{де } V_{0d-d} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} 2e^2 l^2 \bar{A} Z_a(\theta) N_{0d}^{3/2}.$$

Ліва частина рівняння (19) співпадає з детермінантом Релея, рівність нулю якого визначає закон дисперсії поверхневої релеєвської акустичної хвилі без наявності адсорбованих атомів [15]. Права частина рівняння (19) перенормовує дисперсійне рівняння релеєвської

акустичної хвилі за рахунок силової дії () адсорбованих атомів, які деформують приповерхневий шар кристалічної ґратки. Підставляючи в рівняння (19) $\omega = c q \xi$, отримаємо

$$(2 - \xi^2)^2 - 4\sqrt{1 - \xi^2} \sqrt{1 - \frac{c_i^2}{c_d^2} \xi^2} = -\frac{2\xi^2 \theta_d N_{0d}}{k_B T \rho c_i^2} \times$$

$$\frac{D_d q (D_d (1 + W_{dd}^{\text{int}} + \frac{3}{2k_B T} V_{0d-d}) q + i c_i \xi)}{\left(D_d (1 + W_{dd}^{\text{int}} + \frac{3}{2k_B T} V_{0d-d}) \right)^2 q^2 + c_i^2 \xi^2} \times$$

$$\times (1 - l_d^2 q^2) \left(q \sqrt{1 - \xi^2} \frac{\partial F}{\partial N_d} + (2 - \xi^2) \frac{\theta_d + V_{0d-d}}{2a} \right). \quad (20)$$

Вираз (20) має дійсну і уявну частини, які в кінцевому результаті визначають поправку до закону дисперсії релеевської хвилі і її затухання. Наявність множника q у чисельнику (20) дозволяє розв'язати це рівняння ітераціями в довгохвильовій області $qa \ll 1$.

Позначимо ліву частину рівняння (20) функцією $f(\xi)$, яку розвинемо в ряд Тейлора в околі точки

$$f(\xi_0 + \delta\xi) \approx f(\xi_0) + f'(\xi_0) \delta\xi, \quad (21)$$

де $f(\xi_0) = 0$ – розв'язок рівняння $f(\xi) = 0$.

Тоді поправка $\delta\xi$ визначається правою частиною (20) із заміною $\xi \rightarrow \xi_0$.

$$\delta\xi = -\frac{1}{f'(\xi_0)} \frac{2\xi_0^2 \theta_d N_{0d}}{k_B T \rho c_i^2} \times$$

$$\frac{D_d^2 q^2 (1 + W_{dd}^{\text{int}} + \frac{3}{2k_B T} V_{0d-d})}{\left(D_d (1 + W_{dd}^{\text{int}} + \frac{3}{2k_B T} V_{0d-d}) \right)^2 q^2 + c_i^2 \xi_0^2} \times$$

$$\times (1 - l_d^2 q^2) \left(q \sqrt{1 - \xi_0^2} \frac{\partial F}{\partial N_d} + (2 - \xi_0^2) \frac{\theta_d + V_{0d-d}}{2a} \right)$$

$$- i \frac{1}{f'(\xi_0)} \frac{2c_i \xi_0^3 \theta_d N_{0d}}{k_B T \rho c_i^2} \times$$

$$\times \frac{D_d q}{\left(D_d (1 + W_{dd}^{\text{int}} + \frac{3}{2k_B T} V_{0d-d}) \right)^2 q^2 + c_i^2 \xi_0^2} \times$$

$$\times (1 - l_d^2 q^2) \left(q \sqrt{1 - \xi_0^2} \frac{\partial F}{\partial N_d} + (2 - \xi_0^2) \frac{\theta_d + V_{0d-d}}{2a} \right). \quad (22)$$

Числовий аналіз показує, що $f'(\xi) > 0$ у всій області зміни ξ .

Виділивши дійсну та уявну частини у (22), з урахуванням $\omega = c_i q \xi + c_i q \delta\xi$, отримаємо вирази для закону дисперсії $\omega'(q)$ поверхневої пружної акустичної хвилі та її ширини $\omega''(q)$, що зумовлена взаємодією адсорбованих атомів із самоузгодженою квазірелеевською хвилею із врахуванням як нелокальної пружної взаємодії імплантованої домішки з атомами матриці [16], так і сил дзеркального зображення [14]

$$\omega'(q) = c_i q \xi_0 \left[1 - \frac{1}{f'(\xi_0)} \frac{2\xi_0^2 \theta_d N_{0d}}{k_B T \rho c_i^2} \frac{D_d^2 q^2 (1 + W_{dd}^{\text{int}} + \frac{3}{2k_B T} V_{0d-d})}{\left(D_d (1 + W_{dd}^{\text{int}} + \frac{3}{2k_B T} V_{0d-d}) \right)^2 q^2 + c_i^2 \xi_0^2} \right] \times$$

$$\times (1 - l_d^2 q^2) \left(q \sqrt{1 - \xi_0^2} \frac{\partial F}{\partial N_d} + (2 - \xi_0^2) \frac{\theta_d + V_{0d-d}}{2a} \right); \quad (23)$$

$$\omega''(q) = -c_i^2 \frac{1}{f'(\xi_0)} \frac{2\xi_0^3 \theta_d N_{0d}}{k_B T \rho c_i^2} \frac{D_d q^2}{\left(D_d (1 + W_{dd}^{\text{int}} + \frac{3}{2k_B T} V_{0d-d}) \right)^2 q^2 + c_i^2 \xi_0^2} \times$$

$$\times (1 - l_d^2 q^2) \left(q \sqrt{1 - \xi_0^2} \frac{\partial F}{\partial N_d} + (2 - \xi_0^2) \frac{\theta_d - V_{0d-d}}{2a} \right). \quad (24)$$

4. Числовий розрахунок закону дисперсії і ширини поверхневої пружної акустичної моди з урахуванням диполь-дипольної взаємодії адатомів

Розрахунок залежності закону дисперсії $\omega'(q) = \text{Re } \omega(q)$ поверхневої пружної акустичної хвилі та ширини $\omega''(q) = \text{Im } \omega(q)$ акустичної моди проводився для напівпровідника GaAs (110) при наступних значеннях параметрів:

$$l_d = 2,9 \text{ нм}; \quad a = 0,565 \text{ нм}; \quad c_l = 4400 \text{ м/с};$$

$$c_t = 2475 \text{ м/с}; \quad \rho = 5320 \text{ кг/м}^3; \quad \theta_d = 10 \text{ еВ};$$

$$N_{0d} = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}; D_d = 5 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}; \frac{\partial F}{\partial N_d} = 0,1 \text{ eV}.$$

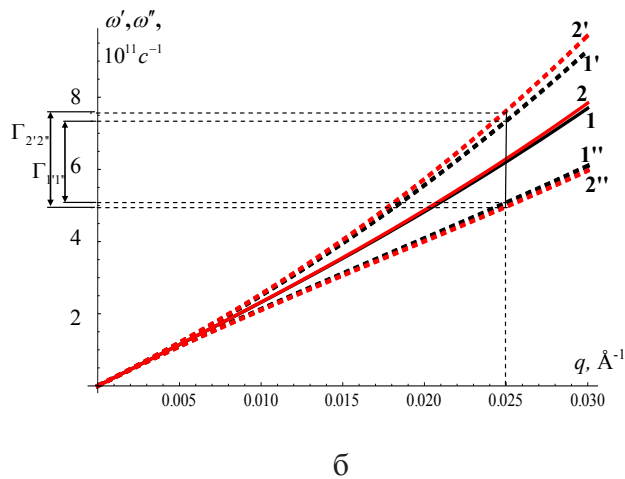
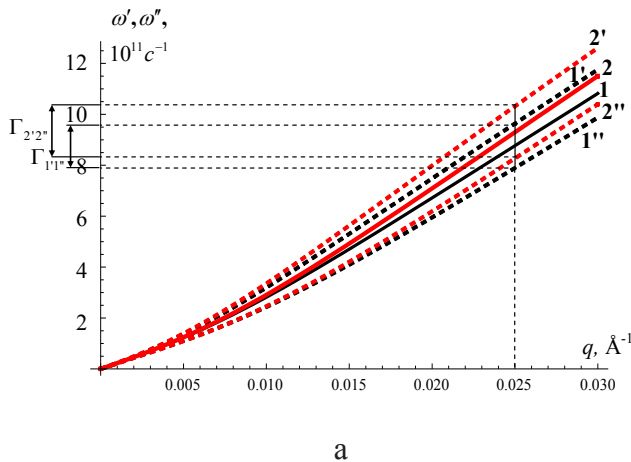


Рис. 1. Дисперсійна залежність $\omega'(q)$ (криві 1, 2) та ширини $\omega''(q)$ (криві 1'', 2'') поверхневої акустичної фононної моди, взаємодіючої з адсорбованими молекулами O_2 як з врахуванням диполь-дипольної взаємодії (криві 2, 2''), так і без неї (криві 1, 1'') без врахування нелокальної взаємодії () адмолекули з атомами матриці): а – при температурі $T=100 \text{ K}$; б – при температурі $T=300 \text{ K}$.

Значення характеристичної довжини взаємодії адатома з атомами ґратки знайдене з умови мінімуму вільної енергії кристала з адсорбованими атомами [8].

На рис. 1, 2 наведені результати розрахунку закону дисперсії $\omega'(q)$ (рис. 1, 2, криві 1, 2) поверхневої акустичної моди та залежності її ширини $\omega''(q)$ (рис. 1, 2, криві 1'', 2'') від модуля хвильового вектора q , зумовленої вза-

ємодією молекул O_2 , адсорбованих на поверхні GaAs (110), із самоузгодженою акустичною квазірелесівською хвилею, як з врахуванням диполь-дипольної взаємодії адсорбованих молекул (рис. 1, 2, криві 2, 2''), так і без її врахування (рис. 1, 2, криві 1, 1''). У роботах [13, 17] зазначено, що у випадку адсорбції молекул O_2 на поверхню напівпровідника має місце електронегативна адсорбція, тобто молекула O_2 приймає негативний заряд ($Z_a \approx -0,5$) з довжиною адсорбційного зв'язку $l=2 \text{ Å}$.

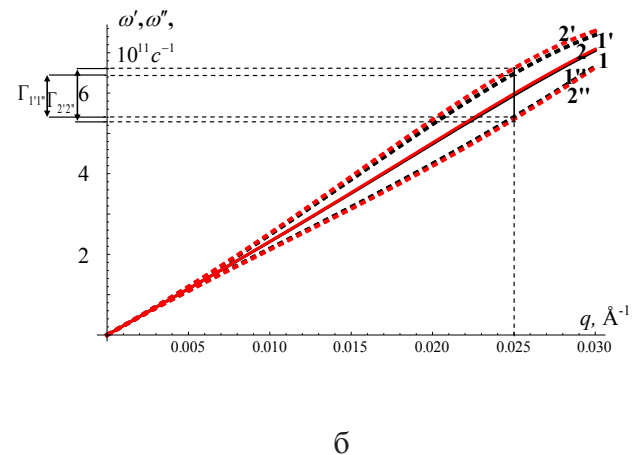
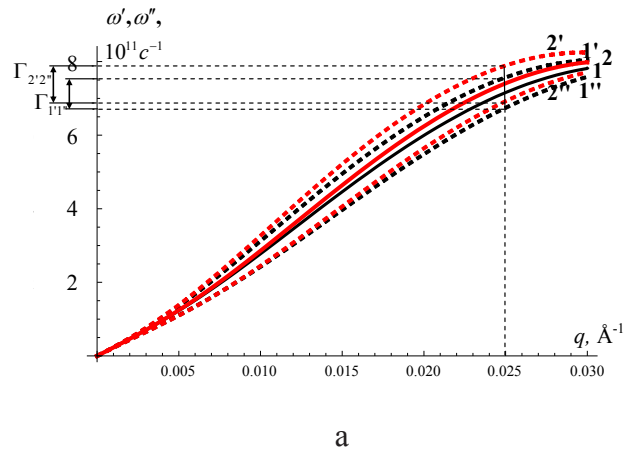


Рис. 2. Дисперсійна залежність $\omega'(q)$ (криві 1, 2) та ширини $\omega''(q)$ (криві 1'', 2'') поверхневої акустичної фононної моди, взаємодіючої з адсорбованими молекулами O_2 як з врахуванням диполь-дипольної взаємодії (криві 2, 2''), так і без неї (криві 1, 1'') з врахуванням нелокальної взаємодії ($l_d = 29 \text{ Å}$) адмолекули з атомами матриці): а – при температурі $T=100 \text{ K}$; б – при температурі $T=300 \text{ K}$.

Аналіз графічних залежностей $\omega'(q)$, $\omega''(q)$ (рис. 1, 2) показує, що у довгохвильовому наближенні ($ql \ll 1$) як диполь-дипольна взаємодія адмолекул O_2 , так і зростання температури субстрату приводять до збільшення ширини поверхневої акустичної фононої моди. Зокрема, при $q=0,025\text{Å}^{-1}$, $T=100\text{ K}$ диполь-дипольна взаємодія адмолекул приводить до збільшення ширини акустичної моди на $\Delta\Gamma = \Gamma_{2'2''} - \Gamma_{1'1''} = 20\text{ мкеВ}$ та 10 мкеВ при

та $l_d = 29\text{ Å}$, відповідно, а при $T=300\text{ K}$ – на 26 мкеВ та 12 мкеВ відповідно.

Необхідно зазначити, що при адсорбції атомів лужних металів () диполь-дипольна взаємодія адатомів на поверхні GaAs (110) приводить до зменшення енергетичної ширини поверхневої акустичної фононої моди.

Збільшення температури субстрату від 100 K до 300 K за наявності диполь-дипольної ($V_{d-d} \neq 0$) та нелокальної взаємодії адатомів (29 Å) енергетична ширина фононої моди зростає на 19 мкеВ при $q=0,025\text{Å}^{-1}$. Тоді як за відсутності нелокальної взаємодії () значення енергетичної ширини зростає на 40 мкеВ . Таким чином, збільшення температури субстрату приводить до зростання енергетичної ширини акустичної фононої моди.

Отримані вирази для закону дисперсії поверхневої акустичної хвилі Релея $\omega'(q, N)$ (23) та ширини фононої моди $\omega''(q, N)$ (24) на адсорбованій поверхні кристалу можуть бути використані для оцінки середньої концентрації адсорбованих атомів та деформаційного потенціалу, попередньо вимірявши величини зміни дисперсії $\Delta\omega'(q, N)$ та ширини фононої моди $\Delta\omega''(q, N)$, які є характеристиками статистично-шороховатої адсорбованої поверхні кристалу.

5. Висновки

1. З урахуванням диполь-дипольної взаємодії адсорбованих атомів та сил дзеркального зображення розвинуто в довгохвильовому наближенні теорію дисперсії поверхневих

акустичних квазірелеєвських хвиль в межах нелокальної пружної взаємодії адсорбованого атома з атомами матриці.

2. Показано, що як диполь-дипольна взаємодія адсорбованих молекул O_2 , так і збільшення температури субстрату приводять до зростання енергетичної ширини поверхневої акустичної фононої моди.

3. Встановлено, що при адсорбції атомів лужних металів () диполь-дипольна взаємодія адатомів на поверхні GaAs (110) приводить до зменшення енергетичної ширини поверхневої акустичної фононої моди.

Список використаної літератури

- [1]. V. V. Kosachev, Yu. N. Gandurin, S. E. Murav'ev. Acoustic wave-based non-destructive control of the damaged layer and roughness parameters of the free surface of an anisotropic solid // Phys. Solid State 54 (10), pp. 2112-2116 (2012).
- [2]. G. L. Bir, G. E. Pikus, Symmetry and strain-induced effects in semiconductors. Wiley, NY. 484 p. (1974).
- [3]. V. A. Pogrebnyak, V. M. Yakovenko, I. V. Yakovenko. Electronic surface states at the irregular interface of media // Phys. Lett. A 209 (1-2), pp. 103-106 (1993); doi: 10. 1016/0375-9601(95)00791-2.
- [4]. R. M. Peleshchak, M. Ya. Seneta. Interaction between a surface acoustic wave and adsorbed atoms // Condens. Mat. Phys. 19 (4), pp. 43801:1-9 (2016); doi: 10. 5488/CMP. 19. 43801.
- [5]. R. M. Peleshchak, M. Ya. Seneta. Dispersion law and the dependence of the surface acoustic mode width on the concentration of adsorbed atoms // Ukr. J. Phys. 62 (3), pp. 256-262 (2017); doi: 10. 5488/CMP. 19. 43801.
- [6]. O. M. Braun, V. K. Medvedev. Interaction between particles adsorbed on metal surfaces // Sov. Phys. Usp. 32 (4), pp. 328-348 (1989); doi: 10. 1070/PU1989v032n04ABEH002700.
- [7]. V. I. Emel'yanov, K. I. Eremin. Threshold nucleation of a nanometer-scale periodic adatom structure with the participation of a static surface acoustic wave // JETP Lett., 2002, 75 (2), pp. 98-101; doi:10. 1134/1. 1466485.
- [8]. R. M. Peleshchak, O. V. Kuzyk, O. O.

Dan'kiv. Temperature regimes of formation of nanometer periodic structure of adsorbed atoms in GaAs semiconductors under the action of laser irradiation // *Condens. Mat. Phys.* 18 (4), pp. 43801: (2015); doi: 10. 5488/CMP. 18. 43801.

[9]. S. Yu. Davydov, S. V. Troshin. Adsorption on metals and semiconductors: Anderson-Newns and Haldane-Anderson models // *Phys. Solid State* 49 (8), pp. 1583-1588 (2007); doi: 10. 1134/S1063783407080318.

[10]. J. P. Muscat, D. M. Newns. The interpretation of work-function variation in alkali chemisorption from the atomic viewpoint // *J. Phys. C: Solid State Phys.* 7, pp. 2630-2644 (1974).

[11]. F. D. M. Haldane, P. W. Anderson. Simple model of multiple charge states of transition-metal impurities in semiconductors // *Phys. Rev. B* 13, pp. 2553-2559 (1976); doi: 10. 1103/PhysRevB. 13. 2553

[12]. S. Yu. Davydov, A. V. Pavlyk. Calculation

of the variation in the work function caused by adsorption of metal atoms on semiconductors // *Semiconductors* 35 (7), pp. 796-799 (2001); doi: 10. 1134/1. 1385715.

[13]. S. Y. Davydov, V. A. Moshnikov, A. A. Fedotov. Gas adsorption on semiconducting oxides: A change in the work function // *Tech. Phys. Lett.* 30 (9), pp. 727-729 (2004); doi: 10. 1134/1. 1804577.

[14]. M. A. Krivoglaz, *X-Ray and Neutron Diffraction in Nonideal Crystals*. Springer, M. 466 p. (1996).

[15]. L. D. Landau, E. M. Lifshitz, *Theory of elasticity*. Pergamon Press, NY. 165 p. (1970).

[16]. I. A. Kunin, *Nonlocal Theory of Elasticity*. Polish Academy of Sciences, W. 416 p. (1975).

[17]. V. E. Henrich, P. A. Cox, *The surface science of metal oxides*. Cambridge University Press, C. 478 p. (1994).

Стаття надійшла до редакції 08.05.2017 р.

PACS 81.07.Bc, 66.30.Lw

DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.2.106606>

INFLUENCE OF ADATOMS DIPOLE-DIPOLE INTERACTION ON THE DISPERSION LAW AND ACOUSTIC PHONON MODE WIDTH OF QUASI-RAYLEIGH WAVE

M. Ya. Seneta, R. M. Peleshchak

Department of general physics
Ivan Franko Drohobych State Pedagogical University
Stryiska Str., 3, Drohobych, Lviv Region, 82100
E-mail: marsen18@i.ua

Summary

The dispersion theory of surface elastic acoustic wave is developed in the work within the long-wave approximation. This surface wave emission occurs the semiconductor GaAs (110) surface, which is covered by adsorbed atoms of metal (or molecules O₂).

The dispersion equation and the acoustic phonon mode width of the quasi-Rayleigh wave are received. The dipole-dipole interaction and the interaction related by mirror image forces acting on the crystal surface, and the interaction between the adatoms and the substrate atoms and the surface acoustic wave through the deformation potential, are taken into account.

The dipole-dipole interaction between the adsorbed atoms of metal (or molecules of gas) on the surface of the semiconductor GaAs (110) was calculated within the generalized Haldane-Anderson model of semiconductor, which takes into account the electrostatic adatoms interaction.

A numerical calculation of the dependence of surface acoustic quasi-Rayleigh wave frequency on wave vector and the acoustic phonon mode width is realized.

The dipole-dipole interaction of O_2 molecules adsorbed on the GaAs (110) surface at the temperatures 100 K and 300 K is taking into account.

It is shown that the dipole-dipole interaction of adsorbed molecules O_2 on GaAs (110) and the temperature increase from 100 K to 300 K lead to the increase of the elastic surface acoustic mode width.

Keywords: dipole-dipole interaction, adatoms, mirror image forces, acoustic quasi-Rayleigh wave

PACS 81.07.Bc, 66.30.Lw

DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.2.106606>

ВПЛИВ ДИПОЛЬ-ДИПОЛЬНОЇ ВЗАЄМОДІЇ АДАТОМІВ НА ЗАКОН ДИСПЕРСІЇ ТА ШИРИНУ АКУСТИЧНОЇ ФОНОННОЇ МОДИ КВАЗІРЕЛЕЄВСЬКОЇ ХВИЛІ

М. Я. Сенета, Р. М. Пелещак

Кафедра загальної фізики
Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка
вул. Стрийська, 3, Дрогобич, Львівська обл., 82100
E-mail: marsen18@i.ua

Реферат

У роботі в межах довгохвильового наближення розвинуто теорію дисперсії поверхневої пружної акустичної хвилі, що розповсюджується на поверхні напівпровідника GaAs (110), яка покрита адсорбованими атомами металу (або молекулами O_2).

Отримані дисперсійне рівняння та ширина акустичної фононної моди квазірелеєвської хвилі з врахуванням диполь-дипольної взаємодії, взаємодії, пов'язаної з силами дзеркального зображення, прикладеними до поверхні кристала, та взаємодії адатомів з атомами підкладки і з поверхневою акустичною хвилею через деформаційний потенціал.

Диполь-дипольна взаємодія адсорбованих атомів металу (або молекул газу) на поверхні напівпровідника GaAs (110) розраховувалась у межах узагальненої моделі напівпровідника Халдейна-Андерсона, яка враховує електростатичну взаємодію адатомів.

Проведено числовий розрахунок залежності частоти поверхневої акустичної квазірелеєвської хвилі від хвильового вектора та ширини акустичної фононної моди з врахуванням диполь-дипольної взаємодії адсорбованих молекул O_2 на поверхні GaAs (110) при температурах 100 K і 300 K.

Показано, що як диполь-дипольна взаємодія адсорбованих молекул O_2 на GaAs (110), так і зростання температури від 100 K до 300 K приводить до збільшення ширини поверхневої пружної акустичної моди.

Ключові слова: диполь-дипольна взаємодія, адатоми, сили дзеркального зображення, акустична квазірелеєвська хвиля

BIOSENSORS

БІОСЕНСОРИ

УДК: 543.06 + 577.15 + 543.555

DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.2.106608>

РОЗРОБКА НОВОГО БІОСЕНСОРА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ АРГІНІНУ В ФАРМАЦЕВТИЧНИХ ПРЕПАРАТАХ

*О. О. Солдаткін^{1,2}, В. О. Приліпко³, М. А. Куйбіда³, І. І. Хоменко^{1,4}, О. П. Солдаткін^{1,2},
С. В. Дзядевич^{1,2}*

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

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

³Національний авіаційний університет,
пр. Космонавта Комарова, 1, 03058, м. Київ, Україна

⁴Центр інтелектуальної власності та передачі технологій НАН України,
вул. Володимирська, 54, 01601, м. Київ, Україна.

e-mail: alex_sold@yahoo.com, wikysik20@gmail.com, kuibidamaria20@gmail.com,
khomenko@nas.gov.ua, a_soldatkin@yahoo.com, dzyad@yahoo.com

РОЗРОБКА НОВОГО БІОСЕНСОРА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ АРГІНІНУ В ФАРМАЦЕВТИЧНИХ ПРЕПАРАТАХ

О. О. Солдаткін, В. О. Приліпко, М. А. Куйбіда, І. І. Хоменко, О. П. Солдаткін, С. В. Дзядевич

Анотація. В роботі розроблено новий кондуктометричний біосенсор на основі двох ферментів (аргіназа та уреаза) для визначення аргініну. Для відпрацювання методики іммобілізації обох ферментів при розробці біосенсору для визначення аргініну проведено вибір найбільш прийнятної методи іммобілізації за допомогою уреазу. Проведено оптимізацію основних параметрів іммобілізації (концентрації обох ферментів в складі біосенсора, концентрацію глутарового альдегіду, час інкубації). Далі вивчено вплив параметрів розчину на роботу біосенсора (іонна сила буферного розчину, буферна ємність та рН розчину) та підібрано оптимальні умови його функціонування. Крім того, в роботі було досліджено основні характеристики кожного

біосенсора, такі як відтворюваність та операційна стабільність сигналів розробленого біосенсора, тобто вивчалось, як змінюється величина відгука біосенсора при безперервній роботі протягом робочого дня та протягом тижня.

З використанням розробленого біосенсора на основі коіммобілізованих уреази та аргінази провели визначення концентрації аргініну в деяких лікарських препаратах. Отримані результати добре корелювали із концентраціями аргініну, заявленими фармацевтичними підприємствами.

Ключові слова: аргінін, аргіназа, уреаза, біосенсор, кондуктометрія

DEVELOPMENT OF NEW BIOSENSOR FOR ARGININE DETERMINATION IN PHARMACEUTICALS

O. O. Soldatkin, V. O. Prilipko, M. A. Kuibida, I. I. Khomenko, A. P. Soldatkin, S. V. Dzyadevych

Abstract. In this work, a new conductometric bienzyme (arginase and urease) based biosensor was developed for arginine determination. First, the most suitable method of urease immobilization was chosen. To elaborate the technique of immobilization of both enzymes, its main parameters (the concentrations of both enzymes and GA, incubation time) were optimized. Further, an influence of the solution parameters (the buffer ionic strength, capacity and pH) on the biosensor operation was studied, the working conditions were optimized. Additionally, the signal reproducibility and operational stability at continuous work, which are the main characteristics of biosensors, were studied over one working day and during a week.

Using the developed biosensor based on co-immobilized urease and arginase, the examination of arginine concentration was performed in some medicines. The obtained results were in good correlation with the values stated by the producers of pharmaceuticals.

Keywords: arginine, arginase, urease, biosensor, conductometry

РАЗРАБОТКА НОВОГО БИОСЕНСОРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АРГИНИНА В ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ ПРЕПАРАТАХ

A. A. Солдаткин, В. А. Прилипко, М. А. Куйбеда, И. И. Хоменко, А. П. Солдаткин, С. В. Дзядевич

Аннотация. В работе разработан новый кондуктометрический биосенсор на основе двух ферментов (аргиназа и уреаза) для определения аргинина. Для отработки методики иммобилизации обоих ферментов при разработке биосенсора для определения аргинина проведено выбор наиболее приемлемого метода иммобилизации с помощью уреазы. Проведена оптимизация основных параметров выбранной методики иммобилизации (концентрации обоих ферментов в составе биосенсора, концентрация глутарового альдегида, время инкубации). Далее изучено влияние параметров раствора на работу биосенсора (ионная сила буферного раствора, буферная емкость и pH раствора) и подобраны оптимальные условия его функционирования. Кроме того, в работе были исследованы основные характеристики каждого биосенсора, такие как воспроизводимость и операционная стабильность сигналов разработанного биосенсора,

изучено как меняется величина сигнала биосенсора при непрерывной работе в течение рабочего дня и в течение недели.

С использованием разработанного биосенсора на основе коиммобилизованных уреазы и аргиназы провели определение концентрации аргинина в некоторых лекарственных препаратах. Полученные результаты хорошо коррелировали с концентрациями аргинина, заявленными фармацевтическими предприятиями.

Ключевые слова: аргинин, аргиназа, уреазы, биосенсор, кондуктометрия

1. Вступ

L-Аргінін (δ -гуанідин- α -аміновалеріанова кислота) – умовно незамінна амінокислота, яка служить попередником для біосинтезу багатьох біологічно активних сполук [1]. Для людини аргінін є напівнезамінною амінокислотою, тобто існують біохімічні шляхи для її біосинтезу, але в певні періоди життя: інтенсивного росту, розвитку, а також при деяких захворюваннях, вони не можуть забезпечити організм достатньою кількістю цієї амінокислоти, через це вона повинна потрапляти в організм із їжею [1]. Аргінін входить до складу білків, ця амінокислота також важлива в інших метаболічних шляхах клітини, наприклад, синтез нітроген (II) оксиду, поліамінів, проліну, глутамату, креатину, агматину та орнітину [2]. Близько 60% спожитої амінокислоти метаболізується в шлунково-кишковому тракті, і тільки 40% потрапляє у кров в незмінному стані. [3]. Необхідно насичати тканини організму цією амінокислотою, тому в щоденний раціон харчування слід включати продукти, що містять максимальну кількість аргініну. На першому місці за вмістом аргініну в продуктах стоїть їжа рослинного походження, а саме: гарбузове насіння (5353 мг), арахіс (3506 мг), насіння кунжуту (3326 мг), мигдальний горіх (2492 мг), кедрові горішки (2413 мг) [4]. Крім харчових продуктів концентрацію аргініну в крові можливо збільшувати за рахунок деяких фармацевтичних препаратів.

На сьогодні фармацевтичні виробники пропонують низьку препаратів на основі амінокислоти аргінін. Вони застосовуються від перевтоми, цукрового діабету, безпліддя, депресії, також при астеничних станах, захворюванні нирок, артритів і артрозах, хворобах судин і серця та при наявності новоутворень в різних органах тощо. На жаль, при виробни-

цтві цих препаратів може здійснюватися неналежний контроль концентрації аргініну в них. Крім того, на фармацевтичному ринку часто з'являються фальсифіковані препарати. Відповідно доцільним є розробка пристрою, який зміг би експресно визначати концентрацію аргініну в фармпрепаратах. Таким пристроєм може бути кондуктометричний біосенсор на основі ферментів аргінази та уреаз.

На даний момент у світі є багато повідомлень про розробку біосенсорів для визначення аргініну [5]. За результатами патентно-інформаційного пошуку під час створення методики розробки нового біосенсору для визначення аргініну в фармацевтичних препаратах було встановлено, що на дату проведення патентних досліджень запропонований біосенсорний метод був новим, мав винахідницький рівень і був промислово придатним, тобто відповідав критеріям правової охорони винаходів в Україні. Серед розробок, що були знайдені під час патентного пошуку є низка варіантів біосенсорів на основі різних типів електрохімічних перетворювачів, переважна більшість з яких базується на амперометричному та потенціометричному методах аналізу. При розробці амперометричних біосенсорів часто використовують одноферментні системи на основі оксидази L- та D-амінокислот або ж декарбоксилази аргініну. Нажаль, дані типи біосенсорів не є достатньо селективними, особливо для визначення аргініну в складних багатокомпонентних зразках (кров, соки тощо). Є відомості про розробку амперометричного біосенсора для кількісного визначення аргініну на основі аргінази, уреаз та електроосажденного поліаніліну (ПА) [6]. Для конструювання чутливого до іонів амонію хемосенсора на ПА-платформі використано Nafion як компенсатор негативного заряду, що виникає в процесі анодної полімеризації ПА. У випад-

ку розробки потенціометричних біосенсорів на основі ІСПТ часто використовується двох-ферментна система на основі аргінази/уреази [7-9]. Вагомим недоліком такої біосенсорної системи є певна втрата чутливості у зв'язку з використанням кількох ферментів, крім того, неможливість аналізу складних зразків, що містять сечовину. Відомий біосенсор на основі іон-селективного електроду для визначення L-аргініну у фруктових соках, що базується на використанні лише одного ферменту, – аргініндеїмінази [10]. Нажаль, для функціонування він потребує технологічно складного електроду порівняння і має ряд недоліків таких як світлочутливість, складність технології його подальшої мініатюризації, неможливість використання недорогої тонкоплівчастої технології виготовлення.

Як не дивно, найменш розповсюджений тип біосенсорів для визначення аргініну базується на кондуктометричному методі визначення. Обидва біосенсори, як на основі двох ферментів (аргіназа/уреаза) [11], так і одного - аргініндеїмінази [12], характеризувались гарною чутливістю до аргініну. Кондуктометричні перетворювачі мають ряд істотних переваг у порівнянні з іншими електрохімічними датчиками. Зокрема, це відсутність технологічно складного електроду порівняння, відсутність світлочутливості, можливість мініатюризації і використання недорогої тонкоплівчастої технології виготовлення.

Нажаль, жоден з багатьох відомих біосенсорів не дійшов до стадії комерціалізації, тому розробка нових перспективних біосенсорів для визначення аргініну є вельми актуальною задачею.

2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

2.1. Матеріали

У роботі використовували ферменти: уреазу з бобів сої з активністю 66 од. акт/мг, фірми „Fluka” (Німеччина) та аргіназу з печінки бика з активністю 105 од. акт/мг, фірми Sigma-Aldrich Chemie (США). Сироватковий альбумін бика (БСА, фракція V), 50% водний розчин глутарового альдегіду (ГА), гліцерин, аргінін та сечовина фірми Sigma-Aldrich Chemie (Німеччина).

В роботі використовували робочі буфера: 5 мМ Тріс ($(\text{HOCH}_2)_3\text{CNH}_2$, рН 8,1 та 5 мМ фосфатний буфер рН 7,4 вітчизняного виробництва. Інші неорганічні сполуки, що використовувалися в роботі, були вітчизняного виробництва та мали ступінь чистоти „х.ч.” та „ч.д.а.”.

2.2. Кондуктометричні перетворювачі

В роботі використовувались кондуктометричні перетворювачі, виготовлені згідно наших рекомендацій в Інституті фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова (м. Київ, Україна). Вони представляють собою підкладку із ситалу (сплавленого Al_2O_3) розміром 5×30 мм, на яку нанесена пара золотих гребінчастих електродів. Для кращої адгезії металів до підкладки використовувався підшар титану завтовшки 0,1 мкм. Більш детальну інформацію про конструкцію та зовнішній вигляд використаних в роботі перетворювачах можна знайти в попередній роботі [13].

2.3. Схема експериментальної установки для кондуктометричних вимірювань

Для вимірювання зміни провідності в приелектродному шарі кондуктометричного перетворювача в роботі була використана експериментальна установка для кондуктометричних вимірювань. При роботі цієї кондуктометричної установки, для підвищення чутливості сенсора та мінімізації шумів за рахунок неспецифічних впливів, використовувався диференційний режим вимірювань. Схему цієї кондуктометричної установки та опис її роботи можна знайти в попередній роботі [14].

2.4. Методики іммобілізації ферментів

Адсорбція уреази на силікаліті. Першою методикою, що порівнювались в роботі, була іммобілізація ферменту методом адсорбції на силікаліті [15]. Спочатку необхідно було сформувати шар силікаліту, а далі зверху нанести шар ферментного гелю на основі уреази. Для нанесення силікаліту на поверхню перетворювача використовували 10 % розчин силікаліту у 5 мМ фосфатному буфері, рН 7,4. 0,15 мкл розчину силікаліту наносили на активну об-

ласть кожної пари електродів, після чого перетворювач нагрівали до 200°C впродовж 6 хв. Така температура не впливала на силікаліт та робочі характеристики перетворювача. В результаті проведених маніпуляцій на активних областях електродів формувалася шар силікаліту. Далі для формування ферментного шару на одну пару електродів наносили 0,15 мкл гелю на основі 5% уреазі, 5% БСА та 10% гліцерину у 20 мМ фосфатному буфері, рН 7,4, на іншу (референтну) пару електродів – 10 % БСА у такому ж буфері, та залишали перетворювач на повітрі за кімнатної температури до повного висихання електродів (20 хв).

Імобілізація уреазі в насичених парах глутарового альдегіду. Іншою методикою, що використовувалася в експерименті, була імобілізація уреазі в насичених парах глутарового альдегіду [16]. Для виготовлення робочих біоселективних мембран на основі уреазі використовували розчин з вмістом: 5% уреазі, 5% БСА та 10% гліцерину у 20 мМ фосфатному буфері, рН 7,4. Суміш для приготування референтної мембрани готували таким же чином, але замість ферменту брали тільки БСА, кінцева концентрація якого складала еквівалентну кількість білку в мембрані – 10%. Отримані розчини наносили на робочі частини перетворювача за допомогою мікропіпетки до повного покриття робочої поверхні електродів. Далі перетворювачі з нанесеними мембранами інкубували в насичених парах глутарового альдегіду (ГА) протягом 25 хвилин. Потім мембрани висушували протягом 5 хвилин на повітрі за кімнатної температури. Після цього біосенсиори відмивали робочим буферним розчином від надлишку незв'язаного ГА та інших компонентів мембран.

Імобілізація уреазі в краплі глутарового альдегіду. Для виготовлення робочих мембран за допомогою імобілізації в краплі ГА використовували розчин: 10% уреазі та 10% БСА, у 20 мМ фосфатному буфері, рН 7,4, з 20% гліцерином [17]. Суміш для приготування референтної мембрани готували таким же чином, але замість ферменту брали тільки БСА (20%). Перед нанесенням на поверхні перетворювачів розчини для референтної та робочої мембран змішували з 2% водним розчином ГА у пропорції 1:1. Одразу після цього суміші

наносили на робочі поверхні кондуктометричних гребінчастих електродів (0,15 мкл на кожну) та висушували протягом 45 хв. на повітрі за кімнатної температури. Після висихання мембран біосенсиори занурювали у робочий буфер для вимивання надлишку ГА та інших компонентів мембран.

Імобілізація уреазі на нітроцелюлозі. Також застосовувалася методика імобілізації уреазі на нітроцелюлозі, розроблена та детально описана в [18]. Єдиною відмінністю методики від першоджерела було використання 1 % розчину нітроцелюлози замість 5 %, оскільки в останньому випадку значно знижувалася чутливість перетворювача. Після модифікації поверхні перетворювача нітроцелюлозою на одну з пар електродів наносили 0,15 мкл 5 % розчину уреазі з 5% БСА та 10% гліцерину у в 20 мМ фосфатному буфері, рН 6,5, на іншу пару (референтну) – 0,15 мкл 10 % розчину БСА в 20 мМ фосфатному буфері, рН 6,5. Потім біосенсиори висушували та відмивали у робочому буфері від незв'язаного ферменту.

Фотополімеризація уреазі в PVA/SbQ. Останнім методом імобілізації уреазі, застосованому для порівняння, була фотополімеризація уреазі в PVA/SbQ [19]. Для формування біоселективної мембрани на одну з пар електродів наносили 0,3 мкл 5 мМ фосфатного буфера, рН 6,5, що містив 2,5 % уреазі з 2,5% БСА, 25 % PVA/SbQ та 10 % гліцерину, на іншу пару електродів (референтну) наносили 0,3 мкл такого ж розчину з 5 % БСА замість уреазі, після чого перетворювач опромінювали ультрафіолетом протягом 30 хв. за допомогою ультрафіолетової лампи KF-4М для формування мембран. Потім перетворювачі відмивали у робочому буфері від незв'язаного ферменту.

Коімобілізація уреазі та аргінази в краплі глутарового альдегіду. Для виготовлення біосенсора, чутливого до аргініну, необхідно було приготувати біосенсор на основі двох ферментів – аргінази та уреазі. Першою імобілізували уреазу за методикою описаною вище «Імобілізація уреазі в краплі глутарового альдегіду». Далі поверх першої мембрани наносили мембрану на основі аргінази: 10% фермента та 10% БСА, у 20 мМ фосфатному

буфері, рН 7,4, з 20% гліцериним. Суміш для приготування референтної мембрани готували таким же чином, але замість ферменту брали тільки БСА (20 %). Перед нанесенням на поверхні перетворювачів розчини для референтної та робочої мембран змішували з 0,1-0,5 % водним розчином ГА у пропорції 1:1. Одразу після цього суміші наносили на робочі поверхні кондуктометричних гребінчастих електродів (0,15 мкл на кожну) та висушували протягом 45 хв. на повітрі за кімнатної температури. Після висихання мембран біосенсиори занурювали у робочий буфер для вимивання надлишку ГА та інших компонентів мембран.

2.5. Методика вимірювання

Виміри проводились у 5 мМ фосфатному буфері, рН 7,4, та 5 мМ трис буфері, рН 8,1 за кімнатної температури у відкритій комірці 2 мл при постійному перемішуванні. Концентрації субстратів в комірці задавали додаванням до робочої комірки аліквот концентрованих розчинів субстратів. Усі дослідження проводились у трьох-чотирьох серіях. Неспецифічні зміни вихідного сигналу, пов'язані з коливаннями температури, рН середовища, електричними завадами, подавлялися завдяки використанню у роботі диференційного режиму вимірювань.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1. Вибір оптимального методу іммобілізації уреазу при розробці біосенсорів для визначенні аргініну

Для вибору оптимального методу іммобілізації, що буде використаний при розробці біосенсора для визначення аргініну, необхідно було перевірити перспективність різних традиційних методів іммобілізації, що використовуються в біосенсоріці. При розробці біосенсора для визначення аргініну використовується два фермента аргіназу та уреазу, але оскільки саме уреазу в більшій мірі відповідає за кінцеву зміну провідності, яку буде реєструвати кондуктометричний перетворювач, то необхідно досягти оптимальної роботи саме цього ферменту. Для порівняння застосову-

валися методики іммобілізації уреазу в парах та краплі глутарового альдегіду, адсорбції на нітроцелюлозі і силікаліті, та фотополімеризації в PVA/SbQ. Для кращого порівняння, у всіх методах іммобілізації було використано однакову кількість ферменту.

За результатами досліджень для кожного уреазного біосенсору на основі різних методик іммобілізації побудовано калібрувальні графіки (рис.1) для наглядного порівняння результатів. Вплив таких важливих аналітичних характеристик біосенсора, як чутливість, мінімальна границя визначення, лінійний діапазон роботи, шум та дрейф базової лінії, було зібрано в табл. 1 для усіх варіантів іммобілізації.

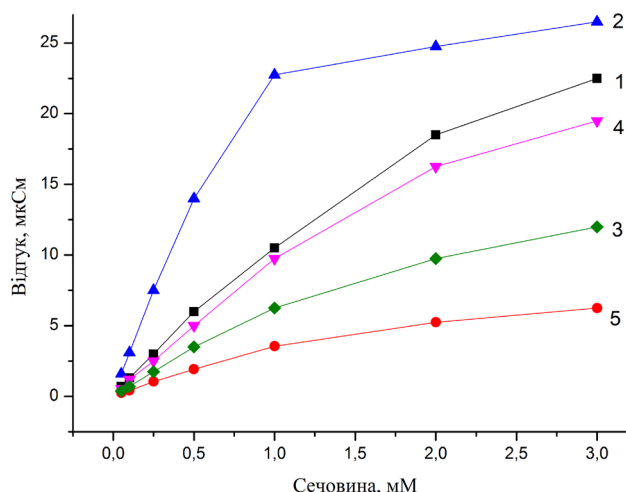


Рис. 1. Калібрувальні криві біосенсорів на основі різних методів іммобілізації уреазу (в парах (1) та краплі (2) глутарового альдегіду, адсорбції на нітроцелюлозі (3) і силікаліті (4), та фотополімеризації в PVA/SbQ (5)). Вимірювання проводились в 5 мМ фосфатному буфері, рН=7.4.

Методики адсорбції уреазу на силікаліті та іммобілізації в парах ГА характеризувалися найкращим лінійним діапазоном роботи біосенсорів на їх основі, але, наприклад, практичне використання методу адсорбції на силікаліті для двохшарового нанесення уреазу та аргінази малоймовірне. З іншого боку, біосенсиори на основі іммобілізації уреазу в краплі глутарового альдегіду були більш чутливими та мали нижчу мінімальну границю визначення сечовини, тому у подальшому вони будуть найбільш зручним при розробленні біоферментного біосенсору для визначення аргініну.

Таблиця 1

Порівняння характеристик біосенсорів на основі різних методів іммобілізації

Тип іммобілізації	Чутливість (мкСм/мМ)	Мінімальна границя визначення (мМ)	Верхня границя лінійного діапазону роботи, (мМ)	Дрейф (мкСм /хв)	Шум (мкСм)	Особливості процедури іммобілізації
В парах ГА	12,3±6,9	0,02	до 2	0,15	0,825	Токсичність випарів ГА
В краплі ГА	23,4±3,4	0,001	до 0.5	0,084	0,079	Зручність проведення
На нітро-целюлозі	2,7±1,5	0,062	до 1	0,25	0,564	Малоефективне зв'язування
На силікаліті	8±5,6	0,007	до 2	0,047	0,199	Багатоетапність іммобілізації
В PVA/SbQ	6,2±3,7	0,009	до 1	0,074	0,194	Світлочутливість фотополімеру

3.2. Оптимізація основних параметрів процесу іммобілізації аргінази та уреазы в краплі глутарового альдегіду

В першій частині роботи було обрано метод іммобілізації в краплі ГА, що буде використано при розробці біосенсора для визначення аргініну на основі вже двох ферментів (аргіназа та уреазы). Відповідно наступним етапом має бути оптимізація основних параметрів вибраного методу іммобілізації для створення біферментного біосенсора для визначення аргініну. Відомо, що для оптимізації методики іммобілізації слід підібрати концентрації обох ферментів в складі біосенсора, концентрацію ГА, час інкубації та методологію послідовності процедури іммобілізації, за яких спостерігаються найкращі характеристики отриманих біосенсорів.

Для визначення найефективнішої концентрації уреазы, при якій спостерігаються найбільші сигнали біосенсора було проведено дослідження таких концентрацій уреазы в складі біоселективного елементу біосенсора: 0,25%; 0,5%; 1%; 3%; 5%. Результати експерименту по вивченню залежності величини відгуку біосенсора на різні концентрації сечовини від

концентрації уреазы в біомембрані приведено на рис. 2. По отриманим результатам видно, що при зміні концентрації ферменту з 0,25 % до 0,5% відгуки біосенсора зростають в рази, при подальшому збільшенні до 5 % ферменту в мембрані відгуки збільшуються більш повільно. Найбільші сигнали біосенсорів отримано при концентрації уреазы 5%.

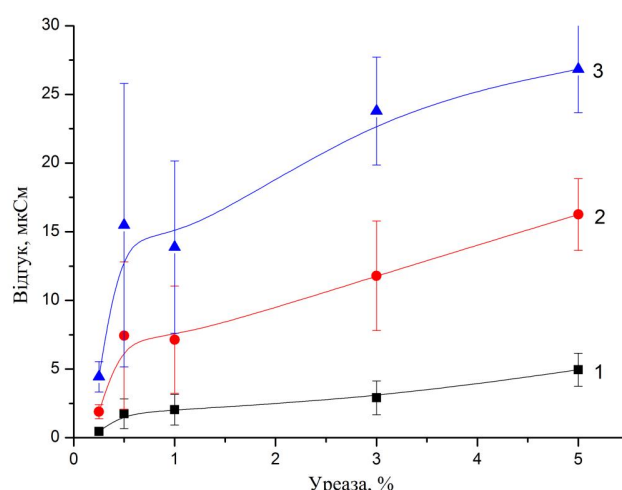


Рис. 2. Графік залежності величини відгуків біосенсорів від концентрації уреазы в складі біомембрани за різних концентрацій сечовини: 0,2 мМ (1), 1 мМ (2), 4 мМ (3). Вимірювання проводились в 5 мМ фосфатному буфері, рН 7,4.

Для визначення оптимальної концентрації аргінази у біоселективному елементі біосенсора, було перевірено відгуки біосенсорів на різні концентрації аргініну, за різних концентрацій аргінази: 1,5%; 2,5%; 3%; 5%; 6,6%; 7,5%. Згідно отриманого графіку (рис. 3) можна побачити, що найбільші відгуки біосенсорів на основі двох ферментів спостерігаються при концентрації аргінази в складі біосенсора - 5%. Дана оптимальна концентрація і використовувалась в подальших експериментах.

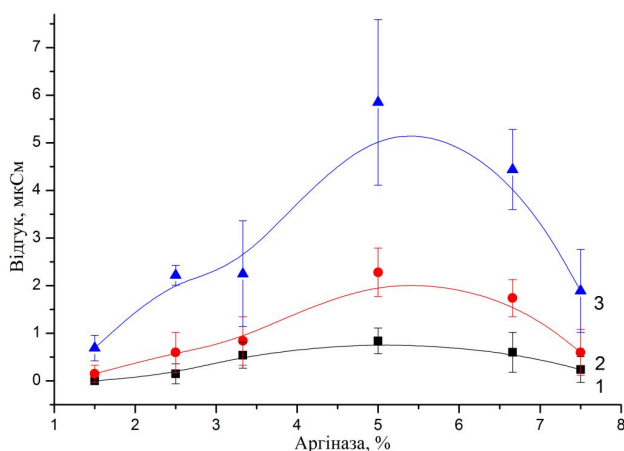


Рис. 3. Графік залежності величини відгуків біосенсорів від концентрації аргінази в біомембранах за різних концентрацій аргініну: 0,025 мМ (1), 0,1 мМ (2), 0,75 мМ (3). Концентрація уреазі в мембрані – 5 %. Вимірювання проводились в 5 мМ фосфатному буфері, рН=7,4.

Наступним завданням було перевірити як впливає концентрація глутарового альдегіду та тривалість процесу іммобілізації на роботу біосенсорів. Відповідно, було здійснено перевірку залежності величини відгуків біосенсора на різні концентрації аргініну від концентрації глутарового альдегіду під час іммобілізації (рис. 4). Згідно графіку можна дійти висновку, що концентрації ГА від 0,1% до 0,5%, є найефективнішими для процесу іммобілізації ферментів, тому при створенні біосенсорів на основі двох ферментів (суміш уреазі та аргінази) надалі використовували саме такі концентрації ГА.

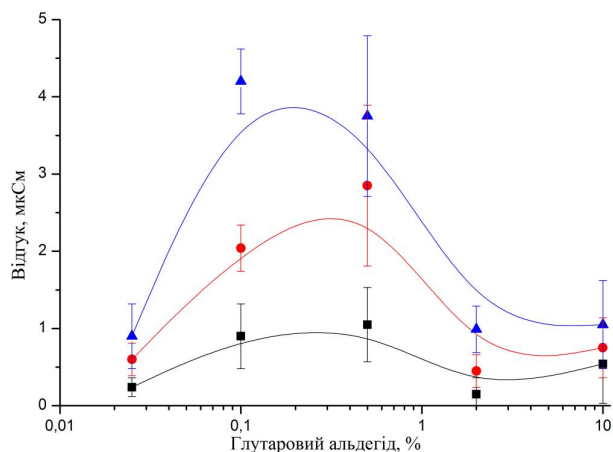


Рис. 4. Графік залежності величини відгуків біосенсорів від використаної під час іммобілізації концентрації глутарового альдегіду. Концентрації аргініну: 0,1 мМ (1), 0,4 мМ (2), 0,75 мМ (3). Концентрація кожного з ферментів в мембрані – 5 %. Вимірювання проводились в 5 мМ фосфатному буфері, рН 7,4.

Крім того, в роботі було перевірено, як впливає тривалість іммобілізації на чутливість створеного біосенсора до аргініну. Виявилось, що оптимальним часом формування ферментних мембран на поверхні кондуктометричного перетворювача за допомогою глутарового альдегіду було 30 хвилин.

3.3. Вивчення впливу параметрів розчину на роботу біосенсора

Параметри роботи біосенсора можуть залежати як від його власних характеристик, так і від характеристик розчину, в якому проводять вимірювання. Наступним етапом даної роботи було дослідження впливу параметрів робочого буферного розчину на функціонування запропонованого біосенсора для визначення аргініну, що включає визначення залежності величини відгуків біосенсорів від іонної сили, буферної ємності та рН буферу.

Визначення впливу іонної сили на відгуки біосенсора. Особливістю усіх кондуктометричних біосенсорів є те, що величина їх відгуків сильно залежить від іонної сили розчину, в якому проводяться вимірювання. Тому було проведено дослідження впливу іонної сили (концентрації KCl) на величину відгуків роз-

робленого біосенсора. Вимірювали відгуки на аргінін концентрацією 1 мМ при поступовому збільшенні концентрації KCl від 1 мМ до 120 мМ (рис. 5).

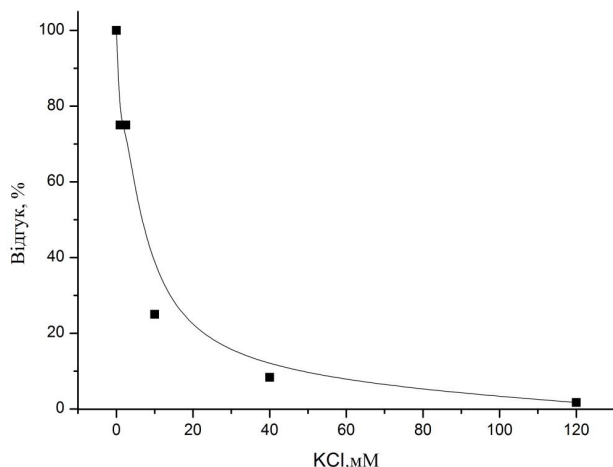


Рис. 5. Залежність величини відгуків біосенсора від іонної сили робочого буферного розчину. Концентрація аргініну – 1 мМ. Вимірювання проводились в 5 мМ фосфатному буфері, рН 7,4.

Як видно з графіку, відгуки біосенсора значно зменшуються при збільшенні іонної сили розчину, а відповідно в подальших експериментах з реальними пробами необхідно контролювати іонну силу для зменшення похибок вимірювань.

Визначення впливу буферної ємності на відгуки біосенсора. Величина відгуків кондуктометричних біосенсорів залежить також від буферної ємності розчину, в якому проводяться вимірювання, тому було здійснено дослідження впливу буферної ємності на величину відгуків біосенсора. Вимірювали величину відгуків на 1 мМ аргінін при різних концентраціях буферного розчину: 1 мМ; 2,5 мМ; 5 мМ; 10 мМ; 25 мМ; 50 мМ (рис. 6).

З графіка видно, що відгуки біосенсора значно більші при низьких концентраціях буферного розчину, але відомо, що за низьких концентрацій буфер втрачає свої властивості, тому для подальших досліджень використовували 5 мМ буферний розчин.

Визначення впливу рН на відгуки біосенсору. Як відомо, внаслідок іммобілізації ферменту може змінюватись рН-оптимум його роботи. Крім того, запропонований біосенсор основа-

ний на двох ферментах, кожен з яких має свій рН оптимум. Тому, щоб підібрати оптимальні умови функціонування біосенсора, було досліджено залежність величини відгуків біосенсора від рН робочого розчину. При проведенні цього експерименту використовувався універсальний буфер, що має однакову буферну ємність в широкому діапазоні значень рН. Відгуки отримували на аргінін концентрацією 1 мМ (рис. 7).

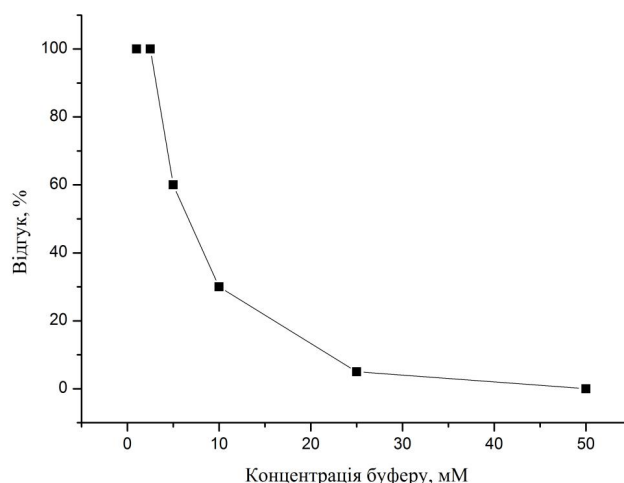


Рис. 6. Залежність величини відгуків біосенсора від буферної ємності робочого розчину. Концентрація аргініну – 1 мМ. Вимірювання проводились у фосфатному буфері, рН 7,4.

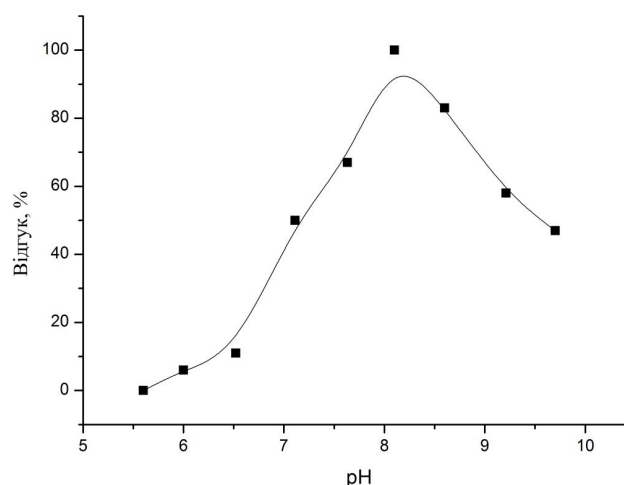


Рис. 7. Залежність величини відгуків біосенсора від рН робочого буферного розчину. Вимірювання проводились в універсальному буфері за кімнатної температури. Концентрація аргініну – 1 мМ.

За даними графіку можна судити, що найбільші відгуки біосенсора були при роботі в буферному розчині з рН 8,1. В подальшій роботі використовувався буфер саме з цим значенням рН (5 мМ тріс буфер, рН 8,1).

3.4. Визначення відтворюваності та операційної стабільності біосенсора

Для роботи будь-якого біосенсора дуже важливими характеристиками є відтворюваність та операційна стабільність сигналу. Для перевірки відтворюваності відгуків запропонованого біосенсора на аргінін, ми впродовж деякого часу отримували відгуки біосенсора на 1 мМ аргінін з інтервалом в 10-15 хвилин, при цьому біосенсор весь час між вимірюваннями залишався у буфері за постійного перемішування (рис. 8). Як можна побачити з графіку, біосенсор характеризувався гарною відтворюваністю сигналів. Похибка вимірювання не перевищувала 5%.

Щоб визначити операційну стабільність біосенсора, впродовж 4-х днів отримували по 4 послідовні відгуки на аргінін концентрацією 1 мМ з інтервалом в 10-15 хв., між серіями відгуків біосенсор зберігався в сухому стані при температурі від +2 до +6 °С (рис. 9). Впродовж всього експерименту спостерігається незначне зменшення середнього відгуку на аргініну. Проте в цілому, розроблений біосенсор для визначення аргініну характеризувався високою операційною стабільністю протягом 4-х днів роботи.

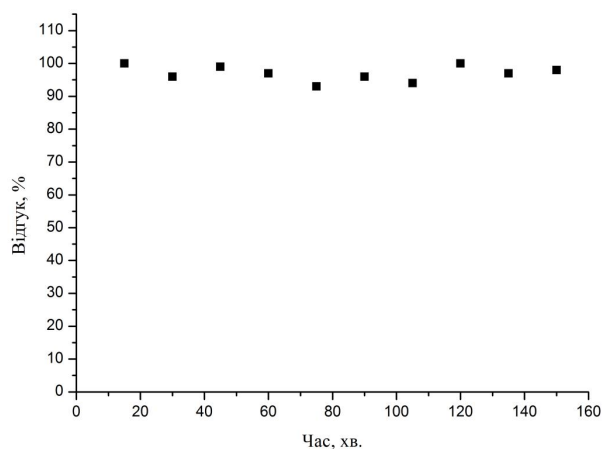


Рис. 8. Відтворюваність сигналів біосенсора. Вимірювання проводили у 5 мМ тріс буфері, рН 8,1, концентрація аргініну – 1 мМ.

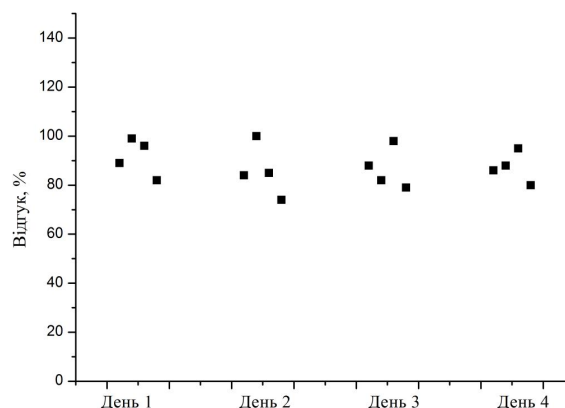


Рис. 9. Операційна стабільність сигналів біосенсору протягом 4-х днів. Вимірювання проводились у 5 мМ тріс буфері, рН 8,1, концентрація аргініну – 1 мМ.

3.5. Вимірювання концентрації аргініну в зразках лікарських препаратів з використання розробленого біосенсору

Для біосенсорної перевірки концентрації аргініну було відібрано 3 препарати: Veyron (Франція), Тівомакс (Україна), Глутаргін (Україна). Для визначення концентрацій аргініну було застосовано метод стандартних додавань. В нашому варіанті метод стандартних додавань полягає у тому, що спочатку додавали досліджуванний розчин з невідомою концентрацією аргініну (аліквота фармацевтичного препарату). Далі додавали три порції стандартного розчину з відомою концентрацією аргініну. По отриманим відгукам будувалась пряма. Для побудови графіку та аналізу результатів було використано програму OriginPro, з використанням якої проведено розрахунок концентрації аргініну в досліджуваному розчині (пробі фармпрепарату).

Далі до рівняння прямої отриманої за даними відгуків біосенсору $y=ax+b$, підставляли значення a, b та розраховували за рівнянням значення x при $y=0$. Знайшовши значення x розраховували концентрацію аргініну в аліквоті, тобто в досліджуваному препараті з урахуванням розведення. Вимірювання кожного препарату робили в 7-и повторностях.

За результатами біосенсорного аналізу по 3-м фармацевтичним препаратам побудовано таблицю 2, в якій отримані концентрації аргініну в препаратах порівняно з концентраціями, зазначеними фармацевтичними підприємствами.

Таблиця 2

Порівняння результатів біосенсорного аналізу аргініну в фармпрепаратах з даними, вказаними виробниками

Назва препарату	Концентрація аргініну, вказана виробником, мМ	Виміряна концентрація аргініну, мМ
«Veyron»	1050	1026 ± 153
«Тівомакс»	200	238 ± 31
«Глутаргін»	70	66 ± 19

4. Висновки

Для розробки біосенсора для визначення концентрації аргініну були проведено низку досліджень. Спочатку було порівняно декілька традиційних методів іммобілізації ферментів та обрано іммобілізацію в краплі ГА для розробки біосенсора на основі уреази та аргінази. Далі в роботі проведено підбір оптимальних умов іммобілізації, а саме підібрано концентрації ГА та ферментів в складі біомембрани та тривалість процесу іммобілізації. В роботі вивчено вплив параметрів робочого розчину (іонна сила, буферна ємність та рН) на функціонування біосенсора для визначення аргініну. Крім того, було досліджено відтворюваність та операційну стабільність розробленого біосенсора протягом 4-х днів роботи.

Розроблені біосенсори були використані для аналізу концентрації аргініну в фармацевтичних препаратах. Отримані результати добре корелюють з концентраціями, зазначеними виробниками цих препаратів.

Подяка

Робота виконана за фінансової підтримки НАН України в рамках комплексної науково-технічної програми «Сенсорні прилади для медико-екологічних та промислово-технологічних потреб: метрологічне забезпечення та дослідна експлуатація» та проекту УНТЦ-НАНУ 6177.

Список використаної літератури

[1]. D. L. Nelson, M. M. Cox. *Lehninger Principles of Biochemistry* W. H. Freeman, 2008, 1294 p.

[2]. S. M. Morris Jr. Arginine: beyond protein // *Am J Clin Nutr* 83(2), pp. 508S-512S (2006).

[3]. G. Wu, S. M. Morris Jr. Arginine metabolism: nitric oxide and beyond // *Biochem J* 15, pp. 197–200 (1998).

[4]. D. Voet, J. G. Voet. *Biochemistry*. 4th Edition. Wiley, 2011. 1520 p.

[5]. Г. З. Гайда, Н. Є. Стасюк, М. В. Гончар. Методи аналізу L-аргініну // *Biotechnologia acta*, V. 7(1), pp. 31-39 (2014).

[6]. N. Stasyuk, O. Smutok, G. Gayda, B. Vus, M. Gonchar, Ye. Koval'chuk. Bi-enzyme L-arginine-selective amperometric biosensor based on ammonium-sensing polyaniline-modified electrode // *Biosens Bioelectron* 37(1), pp. 46–52 (2012).

[7]. S. Karacaoglu, S. Timur, A. Telefoncu. Arginine selective biosensor based on arginase immobilized in gelatin // *Artif Cells Blood Subst Immob Biotechnol* 31, pp. 357–363 (2003).

[8]. S. Komaba, Y. Fujino, T. Matsuda, K. Osaka, I. Satoh. Biological determination of Ag (I) ion and arginine by using the composite film of electroinactive polypyrrole and polyion complex // *Sens Actuator B* 52, pp. 78–83 (1998).

[9]. Lvova L., Legin A., Vlasov Y., Cha G. S., Nam H. Multicomponent analysis of Korean green tea by means of disposable all-solid-state potentiometric electronic tongue micro system // *Sens Actuator B* 95, pp. 391–395 (2003).

[10]. N. Verma, A. K. Singh, P. J. Kaur, Biosensor based on ion selective electrode for detection of L-arginine in fruit juices // *Anal Chem* 70 pp. 1111-1115 (2015).

[11]. O. Y. Saiapina, S. V. Dzyadevych, N. JaffrezicRenault, O. P. Soldatkin. Development and optimization of a novel conductometric bi-

enzyme biosensor for L-arginine determination // *Talanta* 92, pp. 58–64 (2012).

[12]. O. O. Soldatkin, D. M. Oliinyk, I. S. Kucherenko, S. V. Marchenko, M. A. Kuibida, V. O. Prylipko, O. P. Soldatkin, S. V. Dzyadevych. Konduktometrychnyi biosensor na osnovi arhinindeiminazy dlia kilkisnoho analizu arhininu v ridynakh biolohichnoho pokhodzhennia // patent Ukrainy Biul. No 7 vid 10. 04. 2017 (*in Ukrainian*).

[13]. S. V. Dzyadevych, O. P. Soldatkin. Naukovi ta tekhnolohichni zasady stvorennia miniatiurnykh elektrokhimichnykh biosensoriv. Kyiv. Naukova dumka. 2006 s. 71-72 (*in Ukrainian*).

[14]. O. O. Soldatkin, I. S. Kucherenko, V.M.Pyeshkova, A.L.Kukla, N.Jaffrezic-Renault, A. V. El'skaya, S. V. Dzyadevych, A. P. Soldatkin. Novel conductometric biosensor based on three-enzyme system for selective determination of heavy metal ions // *Bioelectrochemistry* 83, pp. 25-30 (2012).

[15]. I. S. Kucherenko, O. O. Soldatkin, B. O. Kasap, S. Ozturk, B. Akata, A. P. Soldatkin, S. V. Dzyadevych. Elaboration of Urease

Adsorption on Silicalite for Biosensor Creation // *Electroanalysis* 24(6) pp. 1380 – 1385 (2012).

[16]. A. P. Soldatkin, S. V. Dzyadevych, Y. I. Korpan, V. N. Arkhipova, G. A. Zhylyak, S. A. Piletsky, T. A. Sergeeva, T. L. Panasyuk, A. V. El'skaya // *Biopolym Cell* 14 pp. 268–277 (1998).

[17]. O. O. Soldatkin, O. A. Nazarenko, O. S. Pavliuchenko, O. L. Kukla, V. M. Arkhipova, S. V. Dzyadevych, O. P. Soldatkin, H. V. Yelska. Optymizatsiia roboty fermentnykh bioselektivnykh elementiv v skladi potentsiometrychnoho multybiosensora // *Biopolimery i klityna* 24(1), s. 42-50 (2008) (*in Ukrainian*).

[18]. L. -T. Yin, Y. -T. Lin, Y. -C. Leu, C. -Y. Hu. Enzyme immobilization on nitrocellulose film for pH-EGFET type biosensors // *Sensor Actuat B* 148, pp. 207–213 (2010).

[19]. A. P. Soldatkin, J. Montoriol, W. Sant, C. Martelet, N. Jaffrezic-Renault. A novel urea sensitive biosensor with extended dynamic range based on recombinant urease and ISFETs // *Biosens Bioelectron* 19, pp. 131–135 (2003).

Стаття надійшла до редакції 12.06.2017 р.

UDC: 543.06 + 577.15 + 543.555

DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.2.106608>

DEVELOPMENT OF NEW BIOSENSOR FOR ARGININE DETERMINATION IN PHARMACEUTICALS

*O. O. Soldatkin^{1,2}, V. O. Prilipko³, M. A. Kuibida³, I. I. Khomenko^{1,4}, A. P. Soldatkin^{1,2}
S. V. Dzyadevych^{1,2}*

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

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

³National Aviation University, Kosmonavta Komarova Str., 1, 03058, Kyiv, Ukraine

⁴Center of intellectual property and technology transfer of NAS of Ukraine, 54 Volodymyrska str., 01601, Kyiv, Ukraine

Summary

Arginine is a semi-essential amino acid, which means that there are biochemical ways for its biosynthesis, but in certain periods of life (e.g. at intense growth and development) and at some diseases the amount of amino acid biosynthesized in the organism is insufficient, therefore it should be provided by food. At present, pharmaceutical manufacturers offer a number of preparations based on the amino acid arginine. Unfortunately, there is no proper control of arginine concentration in the produced preparations, which results in the risk of the presence of counterfeit drugs in the pharmaceutical market. Therefore, the development of a portable device for determination of arginine concentration in pharmaceuticals is greatly needed.

The **aim** of this work was the development of a new biosensor for arginine determination in pharmaceutical preparations.

Methods: The conductometric method of analysis was used. The gold interdigitated electrodes deposited on sital substrate served as conductometric transducers. Two-layer co-immobilisation of urease and arginase on the transducer surface was performed by covalent cross-linking of enzymes with BSA by glutaraldehyde.

Results: The most suitable method of urease immobilization was chosen to develop the technique of immobilization of both enzymes. The main parameters of the developed technique of immobilization (concentrations of both enzymes and GA, incubation time) were optimized. An influence of the buffer parameters (solution ionic strength, capacity and pH) on the biosensor operation was studied. The signals reproducibility and operational stability of the developed biosensor were investigated. Using the developed biosensor the arginine concentration was measured in some medications.

Conclusions: A new conductometric biosensor based on two enzymes (arginase and urease) was developed for arginine determination. The developed biosensor can be successfully used to analyze the arginine concentration in pharmaceuticals. The obtained results correlated well with the values stated by the producers.

Keywords: arginine, arginase, urease, biosensor, conductometry

УДК: 543.06 + 577.15 + 543.555

DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.2.106608>

РОЗРОБКА НОВОГО БІОСЕНСОРА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ АРГІНІНУ В ФАРМАЦЕВТИЧНИХ ПРЕПАРАТАХ

*О. О. Солдаткін^{1,2}, В. О. Приліпко³, М. А. Куйбіда³, І. І. Хоменко^{1,4}, О. П. Солдаткін^{1,2},
С. В. Дзядевич^{1,2}*

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

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

*³Національний авіаційний університет,
пр. Космонавта Комарова, 1, 03058, м. Київ, Україна*

*⁴Центр інтелектуальної власності та передачі технологій НАН України,
вул. Володимирська, 54, 01601, м. Київ, Україна.*

Реферат

Аргінін є напівнезамінною амінокислотою, тобто існують біохімічні шляхи для її біосинтезу, але в певні періоди життя, такі як інтенсивний ріст, розвиток, а також при деяких захворюваннях, вони не можуть забезпечити організм достатньою кількістю цієї амінокислоти, через це вона повинна потрапляти в організм із їжею. На сьогодні фармацевтичні виробники пропонують низку препаратів на основі амінокислоти аргінін. На жаль, при виробництві може здійснюватись неналежний контроль концентрації аргініну, і на фармацевтичному ринку часто з'являються фальсифіковані препарати. Відповідно доцільним є розробка пристрою, який зміг би експресно визначати концентрацію аргініну в фармпрепаратах.

Метою даної роботи була розробка нового біосенсору для визначення аргініну в фармацевтичних препаратах.

Методи дослідження: В роботі використовували кондуктометричний метод аналізу. Як кондуктометричні перетворювачі в роботі використовували золоті гребінчасті електроди, нанесені на ситалову підкладку. Коїмобілізацію уреазу та аргіназу на поверхню перетворювача проводили шляхом ковалентного зшивання ферментів з БСА за допомогою глутарового альдегіду.

Результати дослідження: При розробці біосенсора для визначення аргініну, при розробці методики іммобілізації двох ферментів, було проведено вибір найбільш прийняттого методу іммобілізації уреазу. Проведено оптимізацію основних параметрів вибраної методики іммобілізації (концентрації обох ферментів в складі біосенсора, концентрацію ГА, час інкубації). Вивчено вплив параметрів розчину на роботу біосенсора (іонна сила буферу, буферна ємність та рН розчину). Досліджено відтворюваність та операційну стабільність сигналів розробленого біосенсора. З використанням розробленого біосенсора провели дослідження концентрації аргініну в деяких лікарських препаратах.

Висновки: В роботі розроблено новий кондуктометричний біосенсор на основі двох ферментів (аргіназу та уреазу) для визначення аргініну. Розроблений біосенсор можна з успіхом використовувати для аналізу концентрації аргініну у фармпрепаратах. Отримані результати гарно корелювали із концентраціями аргініну, заявленими фармацевтичними підприємствами.

Ключові слова: аргінін, аргіназа, уреазу, біосенсор, кондуктометрія

РЕЦЕНЗІЯ НА КНИГУ ДЖІНО СЕГРЕ «ЗВИЧАЙНІ ГЕНІЇ: ЯК ДВА ДИВАКИ ТВОРИЛИ СУЧАСНУ НАУКУ». Перекл. з англ.

О. Гординчук, Г. Лелів. – Київ, К.І.С., 2017. – 392 с.

У кожній пристойній книгарні на Заході великий сегмент посідає «не-белетристика», зокрема, й науково-популярні книжки, присвячені природничим наукам. У наших добрих книгарнях (на загал, значно менш численних, аніж у близькій Варшаві чи далекому Вашингтоні) останніми роками помітно побільшало пристойного рівня україномовної науково-популярної гуманітаристики. Але книжки такого штибу з фізики чи біології можна перелічити буквально на пальцях. І тому поява в українському перекладі «Звичайних геніїв» Джіно Сегре (попри італійське походження автора, наголос в його прізвищі слід ставити «по-французькому», на останній склад), - книги, що здобула помітний розголос у своїй оригінальній англomовній версії, без сумніву варта окремої прихильної згадки.

Її автор – професор-емерит (нар. 1938 року) фізики та астрономії Пенсильванського університету, колишній високопосадовець Національного наукового фонду США, лауреат багатьох престижних відзнак, а, на додачу, ще й небіж нобелівського лауреата з фізики Еміліо Сегре (що вже від юних літ гарантувало йому широке поле контактів с провідними науковцями світу). Але професор Сегре відомий не тільки й не так працями із теорії елементарних частинок, але й прекрасними популярними книжками «Дещо про градуси: що температура оповідає про минуле й майбутнє нашого роду, планети та Всесвіту» (2002), «Холодильник Ейнштейна» (2003), «Фауст у Копенгагені» (2007), «Папа фізики: Енріко Фермі» (2016).

«Звичайні генії» з'явилися друком у 2011-му й були присвячені постатям двох визначних науковців двадцятого століття: Джорджа Гамова (1904-1968), який вперше збагнув, як розширення Всесвіту в перші миті його існування могло утворити набір елементів, з яких він складається сьогодні, і Макса Дельбрюка

(1906-1981), який, вивчаючи віруси-бактеріофаги, заклав основи сучасної геноміки. Обом ученим подобалося бути піонерами (Дельбрюку належить афоризм «Уникайте модних досліджень!», втілюючи який, він сам трансформувався з перспективного фізика на генетика). Обоє були диваками й романтиками. І, водночас, якщо вірити Сегре, вони були «звичайними геніями», схожими своїм способом думання на більшість якісних науковців (натомість Ейнштейн, Гейзенберг, Дірак, Паулі були «незвичайними», принципово відмінними від загалу). Що ж, можливо, тим корисніша виявиться розповідь про пошуки Гамова й Дельбрюка для наукової молоді: адже «незвичайного генія» наслідувати завідомо безперспективно, а натомість «звичайного» – і можливо, й корисно.

Ширше – ця книжка про захопливий інтелектуальний поступ людства в ХХ столітті на тлі надзвичайно драматичних суспільно-політичних обставин. Адже уродженця Одеси Гамова звали насправді не Джо, а Георгій – але він мусив тікати зі сталінського СРСР, аби захистити свою особисту й наукову свободу. Ученому пощастило – після розпачливих спроб відплисти з Криму до Туреччини на легкому розбірному човні, він зумів урешті-решт легально виїхати на клопотання Ланжевена на Сольвеївський конгрес – і стати останньою людиною, що потрапила на Захід до того, коли ізоляція радянської науки зробилася на майже два десятиліття абсолютною. Натомість Макс Дельбрюк, син відомого німецького історика, мусив залишити Німеччину після того, як до влади прийшов Гітлер. Обоє знайшли притулок і можливість наукової роботи в США.

Початок ХХ століття ознаменував створення спершу загальної теорії відносності, а потім – квантової механіки, які розв'язали кризу в фізиці, давши задовільний опис явищ мікро- і макросвіту. На основі результатів квантової механіки було створено сучасну електроніку, а на основі теорії відносності – атомну бомбу, які докорінно змінили багато рис людської цивілізації.

Цей розвиток фізики був стрімкий, але не прямолінійний. Автор нагадує, що ніхто інший як Ейнштейн запровадив був у свої рівняння «космологічну сталу», щоб домогтися стабільності Всесвіту. Проте Едвін Габл на-

прикінці 1920-х остаточно довів: Всесвіт нестабільний, він розширюється, при цьому швидкість «розбігання» його об'єктів пропорційна відстані від ними. І, хоча поняття «Великого вибуху» було запроваджене супротивниками ідеї розширення, в іронічному контексті, – скоро воно зробилося серйозним і панівним. І саме Гамов, поєднуючи знання з космології, загальної теорії відносності та ядерної фізики, дослідив, що відбувається у Всесвіті після «першої миті». Ще в 1946 році він обґрунтував концепцію, згідно з якою нейтрони об'єднуються в нейтронні комплекси, а ті – згодом перетворюються на різні атоми.

Гамову пощастило пояснити, як утворюються найлегші атоми – водню та гелію. Появи важчих атомів він пояснити не зміг. Пізніше стало зрозуміло, що ці атоми можуть утворюватися за надвисоких тисків і густин при колапсі ядер масивних зір (саме за таких умов три ядра атома гелію можуть стрітися в одному місці й утворити ядро атому вуглецю), - а тоді, коли зоря вибухає як наднова, вони викидаються в космос. Це зробили вже після Гамова, - але слава піонера класичної космології назавжди лишилась за ним.

Ще складніше було з біологією. Схильний до філософських висновків Нільс Бор ще в 1929 році стверджував, що між фізикою і біологією лежить неперехідна межа: «існування життя має розглядатися як початковий факт, який неможливо пояснити [з погляду фізики], і який має розглядатися як відправна точка біології». Натомість Макс Дельбрюк у своїх роботах з реплікації та генної структури вірусів (за які отримав Нобелівську премію з фізіології та медицини 1969 року) показав: місточок між фізикою і живим таки існує. Учений вважав, що в біології немає «абсолютних» (тобто безліч разів повторюваних на той самий спосіб) явищ, на яких базується фізика. Але водночас він був переконаний: «аналіз має проводитися на власних умовах життя живої клітини, а теорії потрібно формулювати без страху, що вони суперечитимуть молекулярній фізиці». Дельбрюк вважав, що прихід фізиків до біології корисний саме тому, що вони творитимуть тут новий інтелектуальний підхід. Цей підхід учений демонстрував власними роботами.

Вже під старість учений прочитав у Калтеху курс лекцій, які пізніше об'єднав у книжці з назвою «Розум з речовини?» До неї він взяв епіграф славетного данського філософа XIX століття К'єркегора, де філософ іронізує з дослідника, який намагається зафіксувати появу свідомості з допомогою мікроскопу. Натомість Дельбрюк переконаний: нам таки потрібно «дивитися в мікроскоп», аби спробувати зрозуміти, звідки беруться свідомість, розум, мова, поняття істини, логіка, математика й науки.

Водночас така позиція зовсім не виключає того, про що писав у збірнику, присвяченому ювілеєві Дельбрюка, визначний молекулярний біолог XX століття Хантер Стент: адже людський мозок «як обмежена машина може виявитися нездатним під час остаточного аналізу пояснити самого себе. В такому разі виявиться парадокс: існують процеси, що їх – хоча вони й підкоряються явно законам фізики – ніколи не зрозуміти». Слід визнати: розвиток науки за ті десятиліття, які минули по смерті Дельбрюка, так і не дав остаточної відповіді на це запитання. Автор рецензії пригадує слова визначного українського нейрофізіолога Платона Костюка, який, присвятивши життя вивченню діяльності мозку і маючи тут результати нобелівського рівня, незадовго до смерті скрушно зізнавався, що не певен, чи зможе людство колись «помацати» інструментами бодай найпростішу окрему думку...

Переклад книги професора Сегре корисний для молодих українських науковців не тільки переліком важливих фактів (на жаль, історії науки в більшості навіть класичних наших університетів зараз не читають). Він корисний і талановитим зображенням самого процесу наукового пошуку. Ось як Сегре описує квінтесенцію зробленого Дельбрюком: його «бачення гена як молекулярної структури, що підкоряється правилам квантової механіки, і те, що він визначив, який організм є доволі простий, щоб простежити процес його реплікації, створили підґрунтя, щоб взятися до того, що сьогодні зветься молекулярною біологією. У цій битві він стратег, критик і командир, який очолив загін, що за два десятиліття виріс із кількох бійців до сотень. Коли битву нарешті виграли, перемога дісталася йому не

в тому вигляді, в якому він сподівався її побачити, але перемогти вдалося саме завдяки його проникливості та дисципліні». Щось подібне можна сказати про багатьох визначних «звичайних геніїв».

Звісно, книга Сегре має недоліки, винувати за які випадає не так автора, як історичні обставини. Так, Гамов для Сегре однозначно «росіянин», а Україна – тільки терен південної Росії, де громадянська війна відбувалася особливо затято. Але, перш ніж висловлювати претензії до професора-емерита Сегре, гадаю, нам для початку варто з'ясувати питання з власними науковцями, «в Україні й поза нею сущими», які досі зараховують себе до певної майже гомогенної «російськомовної спільноти» (пов'язаної сакральними «скрепами», звісно ж, з Росією). А заодно виявляти значно більше активності в написанні саме англomовних статей для провідних західних видань, де пояснювати зв'язок з Україною не лише Гамова, але й Ландау, Корольова, Кондратюка-Шаргея та інших визначних постатей нашого минулого, які Росія досі беззастережно монополізує.

Слід віддати належне видавництву «К.І.С.»: ці «українські сюжети» Гамова (і висвітлені ним у відомій автобіографії «Моя світова лінія», де учений прямо пише про своє походження за матір'ю від запорожців, і там не згадані) ретельно зафіксовані в примітках. А вони таки варті згадування: молодші брати рідного діда Гамова, Петро (історик), Андрій (священик, учитель), Теофан (видавець і перший редактор журналу «Кієвская старіна») Лебединцеви були добрими знайомими Тараса Шевченка, а дружина Теофана Юлія – хрещеною матір'ю Михайла Грушевського.

Взагалі, слід ще раз із вдячністю сказати про високу культуру видань видавництва «К.І.С.» – тут і добре укладені примітки (значна частина належить саме перекладачам), і вичерпний показчик, і добре відредагований переклад (який вигідно різниться від дуже часто скандально халтурних перекладів видавництва «Фоліо» - писати так дає право безнадійно спаплюжений «близькосхідний том» блискучої «Історії цивілізацій» за редакцією

Умберто Еко, де за недбалістю перекладачів і редакторів часто взагалі незрозуміло: а про що ж ідеться в оригіналі?)

Єдиною проблемою для читача може виявитися правописна система видавництва, яка насправді доволі далеко відбігає як від сучасного нормативного правопису, так і від харківського правопису 1928 року. Але цю проблему буде, очевидно, розв'язано тільки з завершенням роботи урядової правописної комісії, яка, нарешті, має запропонувати сучасну прийнятну для всіх версію загальнообов'язкових правописних норм.

І насамкінець. Без науково-популярної літератури високого рівня розвиток науки неможливий. Сьогодні видання такої літератури є справою ентузіастів (до яких належить і керівник видавництва «К.І.С.» Юрій Марченко, відомий довгою і плідною співпрацею з Українським фізичним товариством). Дуже добре було б, якби надалі в рамках уже створеного Інституту книги, і створюваного Національного фонду досліджень було б передбачено спеціальні грантові програми підтримки видання перекладних та оригінальних науково-популярних книжок – насамперед природничо-наукового спрямування.

Максим Стріха, доктор фізико-математичних наук

ДО 70-РІЧЧЯ ЧЛЕНА-КОРЕСПОНДЕНТА НАН УКРАЇНИ О. Є. БЕЛЯЄВА



25 червня виповнюється 70 років доктору фізико-математичних наук, професору, члену-кореспонденту НАН України, лауреату Державної премії України, лауреату премії Академії наук України, Білорусі і Молдови і премій НАН України імені В. Є. Лашкарьова та імені Н. Д. Моргуліса, директору Інституту фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України **Олександру Євгеновичу Беляєву**.

Беляєв О. Є. народився в м. Києві. В 1972 році закінчив фізичний факультет Київського державного університету (зараз Київський національний університет) імені Тараса Шевченка за спеціальністю рентгенометалофізика. Свій науковий шлях розпочав у 1973 р. інженером Інституту напівпровідників АН УРСР (тепер Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України). У 1980 р. він захистив кандидатську, а в 1991 р. докторську дисертації. В 2006 р. його обрано членом-кореспондентом НАН України. З 2003 р. О. Є. Беляєв – заступник директора, а

з 2015 р. директор Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України.

О. Є. Беляєв – відомий вчений в галузі фізики напівпровідників. Ним проведено систематичні дослідження процесів електропереносу і рекомбінації нерівноважних носіїв заряду в вузькощілинних немагнітних і напівмагнітних твердих розчинах при наявності флуктуації основних параметрів напівпровідників, спостережено індукований магнітним полем перехід метал-неметал андерсонівського типу в вузькощілинних твердих розчинах на основі сполук типу $A^{IV}B^{VI}$ та перехід в стан з мінімальною металічною провідністю в без щілинному $Cd_{1-x}Hg_xTe$. Для напівмагнітних напівпровідників p -типу встановлено, що термодинамічні флуктуації локальної намагніченості призводять до стрибкового переносу заряду з участю збуджених за спіном рівнів акцептора, а нерівноважний розподіл носіїв у флуктуаційно уширеній домішковій зоні, що виникає при ударній іонізації домішок у вказаних матеріалах, призводить до струмової бістабільності S -типу.

Окремий цикл робіт О. Є. Беляєва було присвячено вивченню природи і властивостей домішкових центрів, що формують метастабільні і резонансні стани у напівпровідниках, в результаті чого підтвердилась модель сильної граткової релаксації для DX -центрів в твердих розчинах $Al_xGa_{1-x}As$, виявлено також у залишковій фотопровідності прояв водневоподібних станів, пов'язаних зі вторинними мінімумами зони провідності. Найбільш важливим результатом цього циклу є визначення абсолютного положення екстремумів зон Γ_6 та Γ_8 в залежності від складу.

Методи ємнісної і магніто-тунельної спектроскопії, розвинуті Беляєвим О. Є. та його учнями, суттєво розширили експериментальні можливості в дослідженні низьковимірних систем (квантових ям, квантових дріотів, квантових точок). В даний час Беляєв О. Є. та очолюваний ним відділ досліджує вплив спонтанної і p 'єзо-поляризації в гетероструктурах на основі нітридів металів підгрупи Al на формування двовимірного електронного газу на межі поділу $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ та на процеси струмопереносу в таких структурах.

За час своєї наукової діяльності О. Є. Беляєв опублікував понад 300 наукових праць,

в тому числі 9 монографій, неодноразово і успішно доповідав свої роботи на конференціях високого міжнародного рівня, під його керівництвом захищено 13 кандидатських та одна докторська дисертації, ряд його учнів успішно працюють в провідних наукових лабораторіях різних країн близького і далекого зарубіжжя. Він є почесним доктором Східно-європейського національного університету імені Лесі Українки.

З 2003 р. він очолює відділ електричних і гальваномагнітних властивостей напівпровідників. В 2004-2014 рр. був заступником академіка-секретаря Відділення фізики і астрономії НАН України. Характерною ознакою фундаментальних досліджень Беляєва О. Є. є їх практична направленість, про що свідчить активна співпраця з НДІ “Оріон” (м. Київ) та іншими виробничо-промисловими підприємствами.

Беляєв О. Є. є головою спеціалізованої вченої ради із захисту докторських дисертацій в ІФН ім. В. Є. Лашкарьова НАН України та членом спеціалізованої вченої ради при Волинському державному університеті ім. Лесі Українки. Він член Українського фі-

зичного товариства, Американського фізичного товариства, Міжнародного товариства оптичних інженерів. Беляєв є членом редакційної колегії нашого журналу, а також журналів “Semiconductor Physics, Quantum and Optoelectronics” та “Технология и конструирование в электронной аппаратуре”.

З Олександром Євгеновичем наш університет має давню і плідну співпрацю як у проведенні спільних досліджень, так і проведенні багатьох Міжнародних науково-технічних конференцій.

Беляєв О. Є. доклав також чимало зусиль для створення на базі нашого університету і Інституту фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України Міжвідомчого науково-навчального фізико-технічного центру МОН і НАН України, який успішно працює уже 9-й рік.

Ми цінуємо нашу з Вами дружбу і підтримку!

Тож бажаємо Вам, вельмишановний і дорогий Олександрє Євгеновичу, наснаги, нових вагомих здобутків на науковій ниві в ім'я і на благо України, зичимо козацького здоров'я в подальшому житті, натхнення і енергії на довгі роки!

Редколегія

ІНФОРМАЦІЯ ДЛЯ АВТОРІВ. ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ У ЖУРНАЛ

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

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

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

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

Редакція журналу просить авторів при надправленні 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 надрукований на окремому аркуші і мати розмір, що не перевищує 160x200 мм. Для тексту на рисунках використовуйте шрифт 10pt. Одиниці виміру повинні бути позначені після коми (не в круглих дужках). Усі рисунки повинні бути пронуме-

ровані 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 conclu-

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

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

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

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

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

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

Manuscripts should be sent to:

Lepikh Yaroslav Illich, The Vice Editor, 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. Elektronny i dyrki v poluprovodnikah. Nauka, M. 450 s. (1972).

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

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

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

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

Each figure should be printed on a separate page and have a size not exceeding 160x200 mm.

For text inside figures, use 10pt. Measurement units should be indicated after a comma (not in blankets). All figures are to be numbered in order of its appearance in the text, with sections denoted as (a), (b), etc. Placing the figure numbers and captions inside figures is not allowed. On the backside, write with a pencil the paper title, author(s) name(s) and figure number, and mark the topside with an arrow.

Photographs should be submitted as original prints. Color printing is possible if its cost is covered by the authors or their sponsors.

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

Authors bear full responsibility for irreproachable language make out of the text, especially for a correct scientific terminology (it should be verified

under terminological dictionaries of the appropriate speciality).

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

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

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

Not accepted manuscripts will not be returned.

Комп'ютерне верстання – О. І. Карлічук

Підп. до друку 27.06.2017. Формат 60×84/8.
Ум.-друк. арк. 11,63. Тираж 300 пр. Зам. № 1604.

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