

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

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

**СЕНСОРНА
ЕЛЕКТРОНІКА
І МІКРОСИСТЕМНІ
ТЕХНОЛОГІЇ
2018 — Т. 15, № 1**

**SENSOR
ELECTRONICS
AND MICROSYS-
TEM TECHNOLOGIES
2017 — VOL. 15, № 1**

Науково-технічний журнал

Scientific and Technical Journal

Заснований 13.11.2003 року.
Виходить 4 рази на рік

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

УДК 681.586

UDC 681.586

Засновник Одеський національний
університет імені І. І. Мечникова

Founded by Odessa I. I. Mechnikov
National University

За підтримки Українського фізичного товариства

At support of the Ukrainian Physical Society

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 8131

Certificate of State Registration KB № 8131

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

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

Журнал реферується РЖ «Джерело»
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

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

Видається за рішенням Вченої ради
Одеського національного університету
імені І. І. Мечникова
Протокол № 7 від 20.03.2018 р.

Publishes on the resolution of Odessa
I. I. Mechnikov National University
Scientific Council. *Transaction № 7,
March, 20, 2018*

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

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

Редакційна колегія

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

відповідальний секретар

О. Є. Бєляєв (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)
І. А. Кравченко (Одеса, Україна)
Є. Д. Крушкін (Іллічівськ, Україна)
Вільхо Лантто (Оулу, Фінляндія)
В. Г. Литовченко (Київ, Україна)
С. В. Ленков (Київ, Україна)
Є. В. Малахов (Одеса, Україна)
І. Г. Неівестний (Новосибірськ, Росія)
О. О. Птащенко (Одеса, Україна)
Д. Д. Ряботягов (Одеса, Україна)
С. М. Рябченко (Київ, Україна)
О. П. Солдаткін (Київ, Україна)
М. Ф. Стародуб (Київ, Україна)
Й. М. Стахіра (Львів, Україна)
М. В. Стріха (Київ, Україна)
О. В. Третяк (Київ, Україна)
А. Чаудхрі (Чандігар, Індія)

Editorial Board

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

responsible editor

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

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

ЗМІСТ

CONTENTS

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

V. I. Boichuk, R. Ya. Leshko, D. S. Karpyn

SURFACE STATES IN THE SPHERICAL NANOCRYSTALS CdSe, CdTe..... 5

В. І. Бойчук, Р. Я. Лешко, Д. С. Карпін

ПОВЕРХНЕВІ СТАНИ У СФЕРИЧНИХ НАНОКРИСТАЛАХ CdSe, CdTe

Сенсори фізичних величин
Physical sensors

L. I. Anatyshchuk, O. I. Ivashchuk, R. R. Kobylanskyi, I. D. Postevka, V. Yu. Bodiaka, I. Ya. Hushul, Yu. Ya. Chuprovskya

ABOUT THE INFLUENCE OF AMBIENT TEMPERATURE ON THE READINGS OF MEDICAL PURPOSE THERMOELECTRIC SENSORS 17

Л. І. Анатичук, О. І. Іващук, Р. Р. Кобілянський, І. Д. Постевка, В. Ю. Бодяка, І. Я. Гушул, Ю. Я. Чупровська

ПРО ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА НА ПОКАЗИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ СЕНСОРІВ МЕДИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

A. V. Kozynets

COMPARATIVE ANALYZE OF THE EFFICIENCY OF THE SENSOR STRUCTURES BASED ON “DEEP” SILICON *p-n* JUNCTION WITH ACTIVE LAYERS OF DIFFERENT ELECTRICAL CONDUCTIVITY TYPE..... 30

О. В. Козинець

ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЕФЕКТИВНОСТІ СЕНСОРНИХ СТРУКТУР НА ОСНОВІ ГЛИБОКИХ КРЕМНІЄВИХ *p-n* ПЕРЕХОДІВ З АКТИВНИМИ ОБЛАСТЯМИ, ЯКІ МАЮТЬ РІЗНИЙ ТИП ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОВІДНОСТІ

Оптичні, оптоелектронні і радіаційні сенсори

Optical and optoelectronic and radiation sensors

L. V. Levash, O. A. Rosnovskiy, V. B. Samoylov

PORTABLE PYROELECTRIC POWER METER OF LASER RADIATION 38

Л. В. Леваш, О. А. Росновський, В. Б. Самойлов

ПОРТАТИВНИЙ ПІРОЕЛЕКТРИЧНИЙ ВИМІРЮВАЧ ПОТУЖНОСТІ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

V. V. Halyan, I. A. Ivashchenko, A. H. Kevshyn, I. D. Olekseyuk, A. P. Tretyak, P. V. Tishchenko

NON-CONTACT OPTICAL THERMAL SENSORS BASED ON $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$ SINGLE CRYSTALS... 44

В. В. Галян, І. А. Іващенко, А. Г. Кевшин, І. Д. Олексеюк, А. П. Третяк, П. В. Тищенко

БЕЗКОНТАКТНІ ОПТИЧНІ ТЕРМОСЕНСОРИ НА ОСНОВІ МОНОКРИСТАЛУ $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$

Матеріали для сенсорів
Sensor materials

V. Kazukauskas, G. L. Myronchuk, R. Garbacauskas, O. V. Parasyuk, S. Savicki, O. V. Novosad, S. P. Danylchuk, L. V. Piskach

LOW-TEMPERATURE PHOTOCONDUCTIVITY AND THERMOSTYMLATED CONDUCTIVITY OF $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ SINGLE CRYSTALS.... 53

*В. Кажукаускас, Г. Л. Мирончук,
Р. Гарбачаускас, О. В. Парасюк, С. Савіцкі,
О. В. Новосад, С. П. Данильчук, Л. В. Піскач*

НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНА
ФОТОПРОВІДНІСТЬ ТА
ТЕРМОСТИМУЛЬОВАНА ПРОВІДНІСТЬ
МОНОКРИСТАЛІВ $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$

**Зміст журналу за 2017 рік
(Том. 14, №1-4) 63**

**8ма Міжнародна науково-технічна
конференція “Сенсорна електроніка та
мікросистемні технології” (СЕМСТ-8)... 69**

**8th International Scientific and Technical
Conference “Sensor Electronics and
Microsystem Technologies (SEMST-8)” 72**

**Інформація для авторів.
Вимоги до оформлення
статей у журнал 75**

**Information for contributors. The
requirements on papers preparation..... 78**

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

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

PACS 68.65.HB, 73.22.-F, 78.67.BF УДК 539.261
DOI 10.18524/1815-7459.2018.1.126342

ПОВЕРХНЕВІ СТАНИ У СФЕРИЧНИХ НАНОКРИСТАЛАХ CdSe, CdTe

В. І. Бойчук, Р. Я. Лешко, Д. С. Карпин

Кафедра фізики
Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка
вул. Стрийська 3, Дрогобич, Львівська обл., 82100

ПОВЕРХНЕВІ СТАНИ У СФЕРИЧНИХ НАНОКРИСТАЛАХ CdSe, CdTe

В. І. Бойчук, Р. Я. Лешко, Д. С. Карпин

Анотація. Чисельними методами визначено енергію електронних поверхневих станів, що зумовлені поляризаційними зарядами, які виникають на гетеромежах. Знайдено умови їх існування. Зокрема показано, що для гетеросистем з більшою різницею діелектричних проникностей, відповідні поверхневі стани існують у більшій області зміни розмірів нанокристала. Показано, що зі збільшенням розмірів нанокристала кожен дискретний енергетичний рівень, що відщеплюється від неперервного спектру в підбар'єрній області може ставати поверхневим електронним рівнем в поляризаційній ямі. Визначено, які саме стани стають поверхневими і для яких розмірів нанокристала. Проведено порівняння отриманих результатів для різних нанокристалів.

Ключові слова: квантова точка, поверхневий стан, поляризаційна пастка, потенціал самодії

SURFACE STATES IN THE SPHERICAL NANOCRYSTALS CdSe, CdTe

V. I. Boichuk, R. Ya. Leshko, D. S. Karpyn

Abstract. The energy of surface states has been define, which causes by the polarization charges on the interfaces, by numerical methods. It has been found conditions of their existence. Especially, it has

been show that for heterosystems with large difference between dielectric permittivities the according surface states exist in the large nanocrystal size range. It has been obtain, that the nanocrystal size increase, every energy level, which splits from the continues spectrum, in the quantum well can become the surface state in the polarization quantum well. It has been define, which states become the surface states. The obtained results have been compared with those ones for different nanocrystals.

Keywords: quantum dot, surface state, polarization trap, selfinteraction potential

ПОВЕРХНОСТНЫЕ СОСТОЯНИЯ В СФЕРИЧЕСКИХ НАНОКРИСТАЛЛАХ CdSe, CdTe

В. И. Бойчук, Р. Я. Лешко, Д. С. Карпин

Аннотация. Численными методами определены энергию поверхностных состояний, обусловленных поляризационными зарядами, которые возникают на гетерограницах. Найдены условия их существования. В частности показано, что для гетеросистем с большей разницей диэлектрических проницаемостей, соответствующие поверхностные состояния существуют в большей области изменения размеров нанокристалла. Показано, что с увеличением размеров нанокристалла каждый дискретный энергетический уровень отщепляется от непрерывного спектра и в подбарьерной области может становиться поверхностным электронным уровнем в поляризационной яме. Определено, какие именно состояния становятся поверхностными, и для каких размеров нанокристалла. Проведено сравнение полученных результатов для различных нанокристаллов.

Ключевые слова: квантовая точка, поверхностные состояние, поляризационная ловушка, потенциал самодействия

1. Вступ

На даний час сучасна електроніка і оптоелектроніка дуже широко використовує низькорозмірні гетеросистеми. Подальше їх дослідження призведе до створення нових і покращення існуючих приладів на основі наночастинок. Квантово-розмірні ефекти у таких системах зумовлюють існування дискретної структури енергетичних спектрів квазічастинок, що відображається на усіх інших властивостях гетеросистем [1-5].

У зв'язку з тим, що нанокристали (квантові точки) *CdS*, *CdSe*, *CdTe* демонструють значні перспективи щодо їх використання у оптоелектронних приладах, біологічних індикаторах, значна увага дослідників звернута до розробки нових технологій виготовлення стабільних та якісних наногетеросистем на основі зазначених сполук. Дослідженню їх фотолюмі-

несцентних властивостей присвячено немало робіт [4-15]. Результати вимірювань показали, що нанокристали у полімерних матрицях можуть містити власні дефекти, які є причиною люмінесценції в червоній та зеленій області оптичного спектру.

Важливу роль для оптичних властивостей квантових точок (КТ) відіграє поверхня нанокристалу (межа поділу гетеросистеми). Збільшення відношення кількості поверхневих атомів до кількості атомів в об'ємі при зменшенні розмірів КТ супроводжується посиленням ролі поверхневих станів в спектрах люмінесценції та поглинання. Незважаючи на те, що в КТ часто важко встановити природу поверхневих станів, у багатьох випадках випромінювання в червоній області спектру зумовлене електронними переходами з участю поверхневих пасток [14].

Існують різні причини виникнення поверхневих станів. Зокрема, як причину визнано обірвані електронні зв'язки або наявність адсорбованих атомів [11-12]. Менше дослідженим є питання про існування поверхневих станів, які виникають внаслідок взаємодії заряджених квазічастинок зі зв'язаними поверхневими зарядами, що виникають на межі поділу гетероструктури [17-19]. Зокрема, у [19] показано, що зазначені поверхневі стани КТ CdS у матриці SiO_2 повинні проявлятися при дослідженні спектрів поглинання (люмінесценції) гетеросистеми CdS/SiO_2 у видимій частині спектру.

У запропонованій роботі розглянуто гетеросистеми $CdSe/SiO_2$, $CdTe/SiO_2$ з сферично-симетричними КТ. Обчислено енергію поверхневих станів електронів, що виникають в матриці біля поверхні КТ. Проведено порівняння умов існування поверхневих станів у гетеросистемах, вказано діапазони розмірів їх існування та визначено коефіцієнт поглинання, що зумовлений переходами у поверхневі стани.

2. Модель гетеросистеми. Постановка задачі та її розв'язання

Розглянуто гетеросистему, яка складається з діелектричної матриці, що є масивним кристалом SiO_2 , у яку поміщено нанокристал сферичної форми, радіусом a . Електрон характеризується у кожному середовищі своєю ефективною масою (m_1^* , m_2^*). Кожне середовище описується своєю діелектричною проникністю (ε_1 , ε_2).

Біля межі поділу середовищ існує перехідний шар, де діелектрична проникність змінюється від значення ε_1 в КТ до ε_2 у матриці. У цьому випадку, якщо повторити викладки роботи [16], можна отримати енергію взаємодії заряду з поляризаційними зарядами (потенціал самодії) у вигляді:

$$V_p(r) = \frac{\gamma}{4\varepsilon(r)} \int_0^\infty dr_0 \frac{\operatorname{th}\left(\frac{r_0 - a}{L}\right) + \frac{r_0}{L} \operatorname{sech}\left(\frac{r_0 - a}{L}\right)}{r_0^2 - r^2}, \quad (1)$$

$$\varepsilon(r) = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} \left[1 - \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \operatorname{th}\left(\frac{r - a}{L}\right) \right], \quad (2)$$

Ці формули та усі наступні записуються з використанням атомної системи одиниць ($m_0 = 1$, $\hbar = 1$, $e = 1$). Проведений на основі формули (1) аналіз (рис.1) показує, що ширина перехідного шару буде величиною порядку сталої ґратки a_0 , якщо параметр L задовольняє умові $L < a_0$.

Потенціал обмеження для електрона гетеросистеми вибрано у вигляді:

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

Використовуючи метод ефективної маси, гамільтоніан електрона гетеросистеми записано у вигляді:

$$\hat{H} = -\frac{1}{2} \nabla \frac{1}{m(r)} \nabla + U(r) + V_p(r). \quad (4)$$

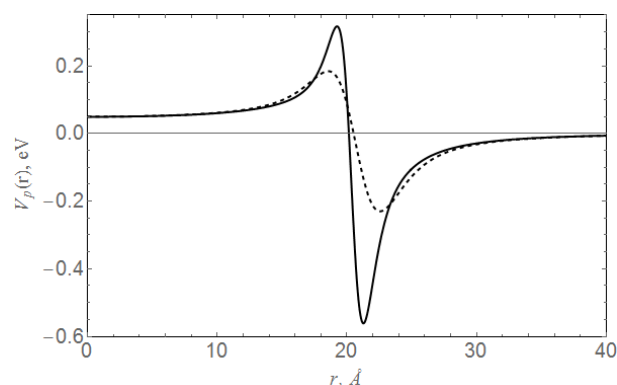


Рис. 1. Потенціальна енергія самодії електрона у гетеросистемі $CdSe/SiO_2$. Суцільна крива – $L = a_0/4$, штрихова крива – $L = a_0/2$. Радіус КТ – 20 Å.

З вигляду потенціальної енергії електрона $V_p(r)$ (рис.1.) видно, що у приповерхневій області у матриці можуть існувати поверхневі стани, тобто квазічастинка може локалізуватися у поляризаційній пастці. Глибина потенціальної ями $\min(V_p(r))$ є більшою для меншого значення параметра L . Подальша мета цієї роботи – знаходження умов існування цих станів (умов локалізації електронних станів у поляризаційній пастці).

Враховуючи сферичну симетрію задачі, розв'язок рівняння Шредінґера з гамільтоніаном (4) подано у вигляді добутку радіальної та кутової частин:

$$\psi(\vec{r}) = R(r)Y(\theta, \varphi) = \frac{\chi(r)}{r}Y(\theta, \varphi), \quad (5)$$

де $Y(\theta, \varphi)$ – сферичні функції. Підстановкою (5) у рівняння Шредінгера отримано такі рівняння в КТ і матриці:

$$\chi_i''(r) + 2m_i^* \left(-U(r) - V_p(r) - \frac{l(l+1)}{r^2} + E \right) \chi_i(r) = 0, \quad i = 1, 2, \quad (6)$$

де l – орбітальне квантове число. Для знаходження розв'язку рівнянь (6) в обох середовищах використано два чисельні методи: метод стрільби та фазовий метод [20], які адаптовано для випадку стрибкоподібної ефективної маси з метою забезпечення неперервності хвильової функції та потоку густини ймовірності на гетеромежах.

2.1. Метод стрільби

Для першої області (область КТ) рівняння (6) чисельно розв'язується від точки $r=0$ до $r=a$, причому крайові умови у точці $r=0$ такі:

$$\chi_1(0, l, E) = 0, \quad \left. \frac{d}{dr} \chi_1(r, l, E) \right|_{r=0} = 1. \quad (7)$$

Перша умова забезпечує фізичні умови поведінки розв'язку у нулі, а друга умова з (7) еквівалентна вибору сталого коефіцієнта у розв'язках. Таким чином, якщо розв'язувати рівняння (6) у середині КТ, то можна отримати

$$\chi_1 = C_1 \chi_1(r, l, E) \quad \text{або} \quad R_1 = C_1 R_1(r, l, E), \quad (8)$$

де E та l будуть входити у розв'язок як параметри, а значення C_1 буде залежати від вибору другої умови (7).

Щоб розв'язати рівняння у другій області (матриці), потрібно шукати розв'язок від точки $r=A_0$ до $r=a$ (справа на ліво), де A_0 – велика відстань. Вибрано такі крайові умови у точці $r=A_0$:

$$\chi_2(A_0, l, E) = 0, \quad \left. \frac{d}{dr} \chi_2(r, l, E) \right|_{r=A_0} = -1. \quad (9)$$

Фізичний та математичний зміст умов є аналогічним до умов (7). Відповідно отримаємо вираз

$$\chi_2 = C_2 \chi_2(r, l, E, A_0) \quad \text{або} \quad R_2 = C_2 R_2(r, l, E, A_0). \quad (10)$$

Застосовуючи умови неперервності радіальної складової хвильової функції та радіальної складової потоку густини ймовірності, отримаємо лінійну однорідну систему рівнянь відносно C_1, C_2 , яка є сумісною, якщо її визначник дорівнює нулю:

$$F(a, l, E, A_0) = \begin{vmatrix} R_1(a, l, E) & -R_2(a, l, E, A_0) \\ \left. \frac{1}{m_1^*} \frac{d}{dr} R_1(r, l, E) \right|_{r=a} & -\left. \frac{1}{m_2^*} \frac{d}{dr} R_2(r, l, E, A_0) \right|_{r=A_0} \end{vmatrix} = 0. \quad (11)$$

Практично пошук розв'язку реалізовано за таким алгоритмом:

- вибирається l (тип стану s, p, d, ...);
- вибирається число A_0 ;
- вибирається значення E , що лежить в діапазоні $(0; U_0)$;
- обчислюється усі R_i (наприклад, у Wolfram Mathematica стандартним солвером NDSolve), потім $F(a, l, E, A_0)$.

Повторюючи в), г), отримаємо залежність $F(a, l, E, A_0)$ від енергії. Відповідно нулі функції і будуть розв'язками рівняння Шредінгера. Далі, збільшуючи A_0 , повторюємо в), г), знаходимо нулі $F(a, l, E, A_0)$, змінюючи енергію. Добиваємося потрібної точності. Маючи енергію системи, чисельно знаходимо усі невідомі коефіцієнти і хвильові функції.

Описаний метод має недолік, який стосується вибору значення $\left. \frac{d}{dr} \chi_i(r, l, E) \right|_{r=A_0}$ на межах визначення координати. Оскільки похідна у точці описує тангенс кута нахилу дотичної до осі, то у точці 0 і A_0 знак похідної визначатиме куди вгору чи вниз йде зростання хвильової функції при зміні r . Це може відобразитися на точності результатів при малих A_0 . Саме тому у роботі застосовано ще і фазовий чисельний метод, що використовується для таких задач.

2.2. Фазовий метод

У методі використано те, що поведінка розв'язку якісно відома. Він має осцилюючий характер, причому амплітуда може сильно залежати від координати. Відповідно до методу [20], вводиться амплітуда ρ і фаза φ за допомогою співвідношення

$$\chi_i(r) = \rho_i(r) \sin[\varphi_i(r)]. \quad (12)$$

Ця умова неоднозначно визначає фазу і амплітуду, тому ще потрібно, щоб ρ і φ підкорялися ще одній умові:

$$\chi'_i(r) = \rho_i(r) \cos[\varphi_i(r)]. \quad (13)$$

Диференціюючи (12) і (13) по r і порівнюючи їх між собою, отримаємо два співвідношення:

$$\chi''_i(r) = \rho'_i(r) \cos[\varphi_i(r)] - \varphi'_i(r) \rho_i(r) \sin[\varphi_i(r)], \quad (14)$$

$$\rho'_i(r) \sin[\varphi_i(r)] = (1 - \varphi'_i(r)) \rho_i(r) \cos[\varphi_i(r)]. \quad (15)$$

З (12)-(15) виключаються $\chi_i(r)$ і $\chi''_i(r)$. Після нескладних перетворень рівняння (6) розщепиться на два рівняння – для фази і амплітуди:

$$\rho'_i(r) = -\rho_i(r) [q_i(r) + \lambda_i - 1] \sin[\varphi_i(r)] \cos[\varphi_i(r)], \quad (16)$$

$$\varphi'_i(r) = \cos^2[\varphi_i(r)] + [\lambda_i + q_i(r)] \sin^2[\varphi_i(r)], \quad (17)$$

де

$$\lambda_i = 2m_i^* E, \quad q_i(r) = 2m_i^* \left(-U(r) - V_p(r) - \frac{l(l+1)}{r^2} \right).$$

Граничні умови в області $0 \leq r \leq A_0$ приписуються фазі у вигляді:

$$\varphi_1(0) = 0, \quad \varphi_2(A_0) = \pi \cdot j, \quad j = 0, 1, 2, \dots \quad (18)$$

Далі необхідно чисельно розв'язати диференціальне рівняння першого порядку (17) в двох областях. В першій області рівняння слід розв'язати зліва на право з умовою $\varphi_1(0) = 0$. Отримано

$$\varphi_1 = \varphi_1(r, l, E). \quad (19)$$

У другій області рівняння слід розв'язати справа на ліво з використанням умови $\varphi_2(A_0) = \pi \cdot j$. Можна отримати

$$\varphi_2 = \varphi_2(r, l, E, j, A_0). \quad (20)$$

Амплітуду треба визначити з рівняння (16), шляхом розділення змінних (за умови відомої фази). Розв'язок рівняння для амплітуди має вигляд експоненти з невідомою сталою інтегрування у кожній області D_i .

З граничних умов для $R(r)$

$$R_1(a) = R_2(a),$$

$$\left. \frac{1}{m_1^*} \frac{d}{dr} R_1(r) \right|_{r=a} = \left. \frac{1}{m_2^*} \frac{d}{dr} R_2(r) \right|_{r=a}$$

отримаємо умови для фази і амплітуди. Неперервність хвильової функції задається співвідношенням:

$$D_1 \rho_1(a) \sin[\varphi_1(a)] = D_2 \rho_2(a) \sin[\varphi_2(a)]. \quad (21)$$

Для знаходження другої граничної умови обчислено

$$\begin{aligned} R'_i(r) &= \frac{r \chi'_i(r) - \chi_i(r)}{r^2} = \frac{r \rho_i(r) \cos[\varphi_i(r)] - \rho_i(r) \sin[\varphi_i(r)]}{r^2} = \\ &= \frac{\rho_i(r)}{r^2} \{ r \cos[\varphi_i(r)] - \sin[\varphi_i(r)] \}. \end{aligned}$$

Відповідно

$$D_1 \frac{\rho_1(a)}{m_1^*} \{ a \cos[\varphi_1(a)] - \sin[\varphi_1(a)] \} = \quad (22)$$

$$= D_2 \frac{\rho_2(a)}{m_2^*} \{ a \cos[\varphi_2(a)] - \sin[\varphi_2(a)] \}.$$

З умови нетривіального розв'язку системи (21)–(22) отримується функція $G(a, l, E, j, A_0)$ і рівняння, що аналогічне до (11):

$$G(a, l, E, j, A_0) = 0. \quad (23)$$

Перевага методу полягає у наступному: чисельно розв'язується рівняння першого порядку і немає проблем з визначенням тангенса кута нахилу дотичної.

Практично пошук розв'язку реалізовано так:

а) вибирається l (тип стану s, p, d, ...);

б) вибирається число A_0 ;

в) вибирається значення E , що лежить в діапазоні $(0; U_0)$;

г) обчислюється усі φ_i (наприклад, у Wolfram Mathematica стандартним солвером NDSolve), потім ρ_i і в підсумку $G(a, l, E, j, A_0)$.

Повторюючи в), г), отримаємо залежність $G(a, l, E, j, A_0)$ від енергії. Відповідно нулі функції і будуть розв'язками рівняння Шредінгера. Далі, збільшуючи, A_0 , повторюємо в), г), знаходимо нулі $G(a, l, E, j, A_0)$, змінюючи енергію. Добиваємося потрібної точності.

Маючи енергію системи, чисельно знаходимо усі невідомі коефіцієнти і хвильові функції.

Якщо ж знехтувати поляризаційними зарядами (потенціалом самодії у (4)), то рівняння Шредінгера має точний розв'язок, наприклад формула (10) з [19].

Результати застосування обох чисельних методів та точні розв'язки (без урахування $V_p(r)$) подано у наступному параграфі.

3. Аналіз отриманих результатів

Описані два чисельні методи застосовано для визначення енергії електрона КТ гетеросистем $CdSe/SiO_2$, $CdTe/SiO_2$. Параметри кристалів подано у таблиці на основі даних з [21].

	m^*	ϵ	U_0 , eV
$CdSe$	0.130	9.29	3.630
$CdTe$	0.095	10.40	3.765
SiO_2	1.000	2.10	---

Нехтуючи $V_p(r)$ у (4), було визначено енергію електрона гетеросистеми на основі точних розв'язків рівняння Шредінгера і чисельними методами. Відповідно параметр A_0 ми підбирали так, щоб чисельні розв'язки і точні розв'язки були однаковими. Потім знайдений параметр A_0 застосовували до знаходження станів електрона у гетеросистемі, враховуючи потенціал самодії. Результати обчислень енергії $E_{n,l}$, $n = 1, 2, 3, \dots, l = 0, 1, 2, \dots$, що проведено чисельним фазовим методом з врахуванням (1) (суцільні криві) і без його врахування (штрихові криві), подано на рис.2–3. Жирною чорною кривою, що перетинає усі криві енергії, позначено дно поляризаційної ями $\min(V_p(r))$ як функцію радіуса нанокристалу a . Відповідно усі стани, енергії яких лежать вище дна поляризаційної ями, можуть бути поверхневими. Однак ця умова є необхідною, але недостатньою. Енергії таких станів чітко виділено на рис.2б і рис. 3б.

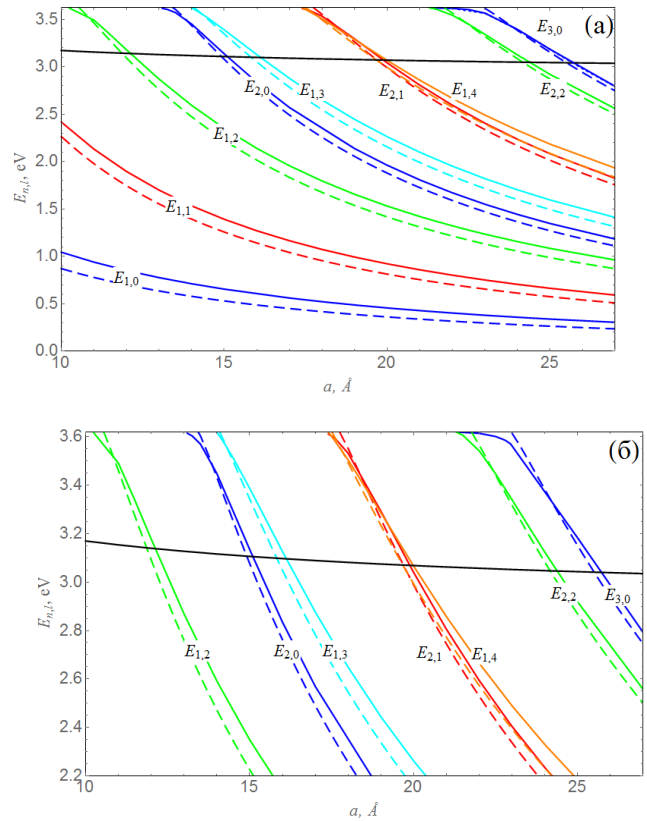


Рис. 2. Енергетичний спектр електрона у гетеросистемі $CdSe/SiO_2$. Штрихові криві – без урахування поляризаційних зарядів, суцільні – з врахуванням. Рис. а) у масштабі по осі ординат $(0; U_0)$, рис. б) у масштабі по осі ординат $(2.2; U_0)$. Жирна чорна крива показує залежність енергії дна поляризаційної ями від радіуса КТ.

Видно, що ріст радіуса КТ гетеросистеми ($CdSe/SiO_2$, $CdTe/SiO_2$) супроводжується монотонним зменшенням енергії усіх станів електрона. Причому в основній області зміни радіуса КТ врахування потенціалу самодії спричиняє збільшення енергії частинки (суцільні криві лежать вище за штрихові). Однак в області $[\min(V_p), U_0]$ для рівнів $E_{1,2}, E_{2,0}, E_{1,3}, E_{2,1}, E_{1,4}, E_{2,2}, E_{3,0}$ існують такі величини a , що потенціал $V_p(r)$ зменшує енергію електрона порівняно з випадком $V_p(r) = 0$. Таке співвідношення між енергіями, що отримано обома чисельними методами, вказує на те, що електрон є зв'язаним з поляризаційною ямою – перебуває у поляризаційній пастці. Зокрема для $CdSe/SiO_2$ стан з енергією $E_{1,2}$ стає поверхневим, коли $a \in [10; 11] \text{Å}$, а наприклад, стан з енергією $E_{3,0}$ є поверхневим, коли $a \in [22; 23.5] \text{Å}$. Аналогічно для $CdTe/SiO_2$

стан з $E_{1,2}$ є поверхневим, коли $a \in [12; 13] \text{ \AA}$, а стан з $E_{3,0}$ – при $a \in [25.5; 27] \text{ \AA}$. Для обох гетеросистем існують області зміни радіуса, коли поверхневими є інші з названих станів з енергіями $E_{2,0}, E_{1,3}, E_{2,1}, E_{1,4}, E_{2,2}$.

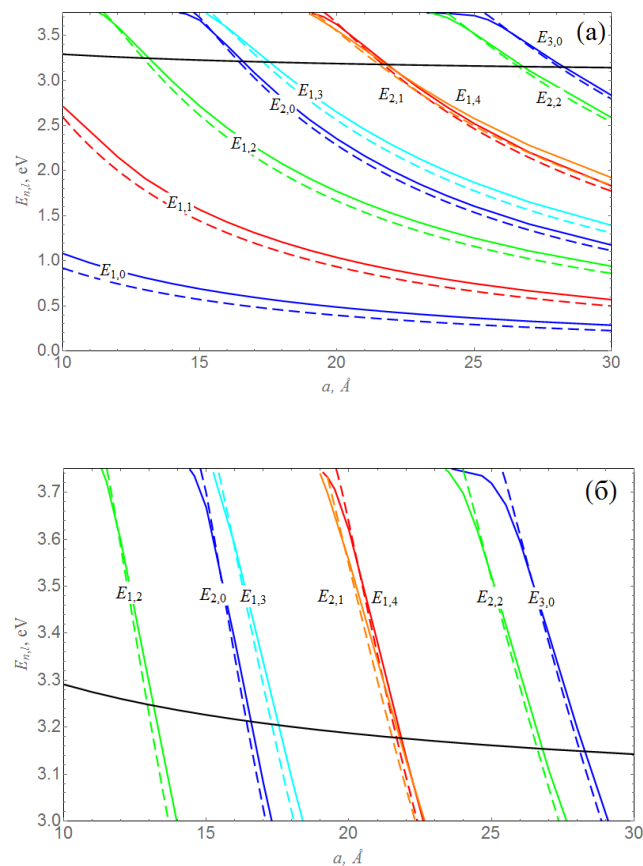


Рис. 3. Енергетичний спектр електрона у гетеросистемі CdTe/SiO_2 . Штрихові криві – без урахування поляризаційних зарядів, суцільні – з врахуванням. Рис. а) у масштабі по осі ординат $(0; U_0)$, рис. б) у масштабі по осі ординат $(3; U_0)$. Жирна чорна крива показує залежність енергії дна поляризаційної ями від радіуса КТ.

Підтвердження зробленого висновку можна отримати після аналізу густини ймовірності перебування електрона у гетеросистемі. На рис.4–5 подано, як приклад, графіки густини ймовірності як функції r для 3s-стану. З графіків видно, що два числових розрахунки дають близькі результати (криві 1 і 2) навіть для густин ймовірності. На рис. 4(а-б) і рис. 5(а-б) штриховим кривим (кривим 3) відповідає густина ймовірності для електрона у

випадку $V_p(r) = 0$. З рис.4-5 видно, що радіуси $a = 23 \text{ \AA}$ та $a = 22 \text{ \AA}$ для гетеросистеми CdSe/SiO_2 і $a = 26 \text{ \AA}$ та $a = 25.5 \text{ \AA}$ для гетеросистеми CdTe/SiO_2 відповідають випадку, коли енергія 3s-стану електрона в моделі $V_p \neq 0$ є меншою від випадку $V_p = 0$. Отже, потенціал самодії дає змогу електрону у конкретному стані при відповідних розмірах КТ локалізуватися у при поверхневій області (поляризаційній пастці).

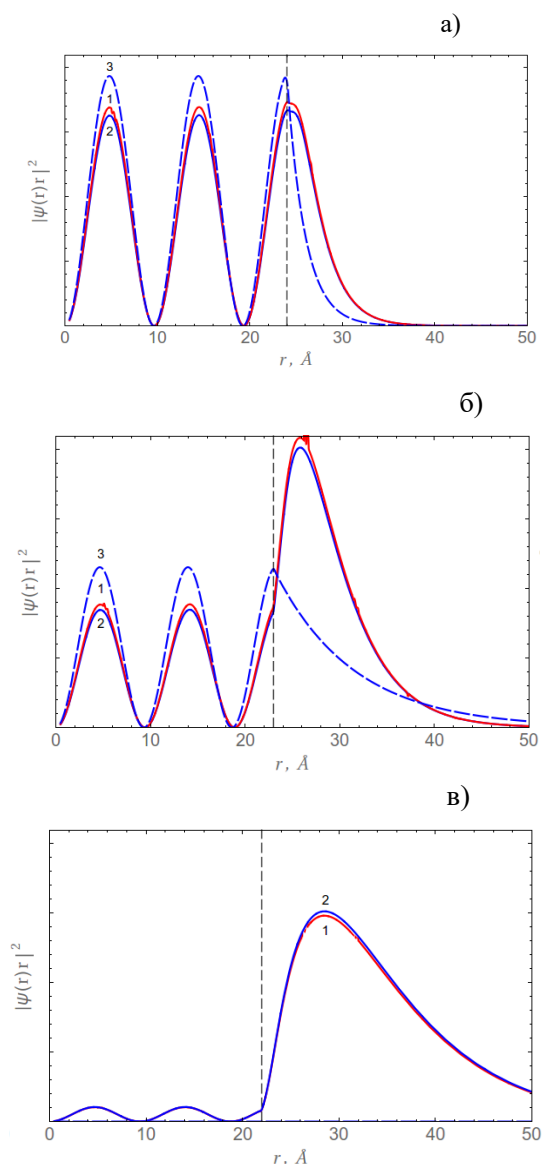


Рис. 4. Густина ймовірності для електрона у гетеросистемі CdSe/SiO_2 . Крива 1 – метод стрільби, крива 2 – фазовий метод, штрихова крива 3 – без урахування поляризаційних зарядів. Рис. а) – розмір КТ $a=24 \text{ \AA}$, рис. б) – розмір КТ $a=23 \text{ \AA}$, рис. в) – розмір КТ $a=22 \text{ \AA}$.

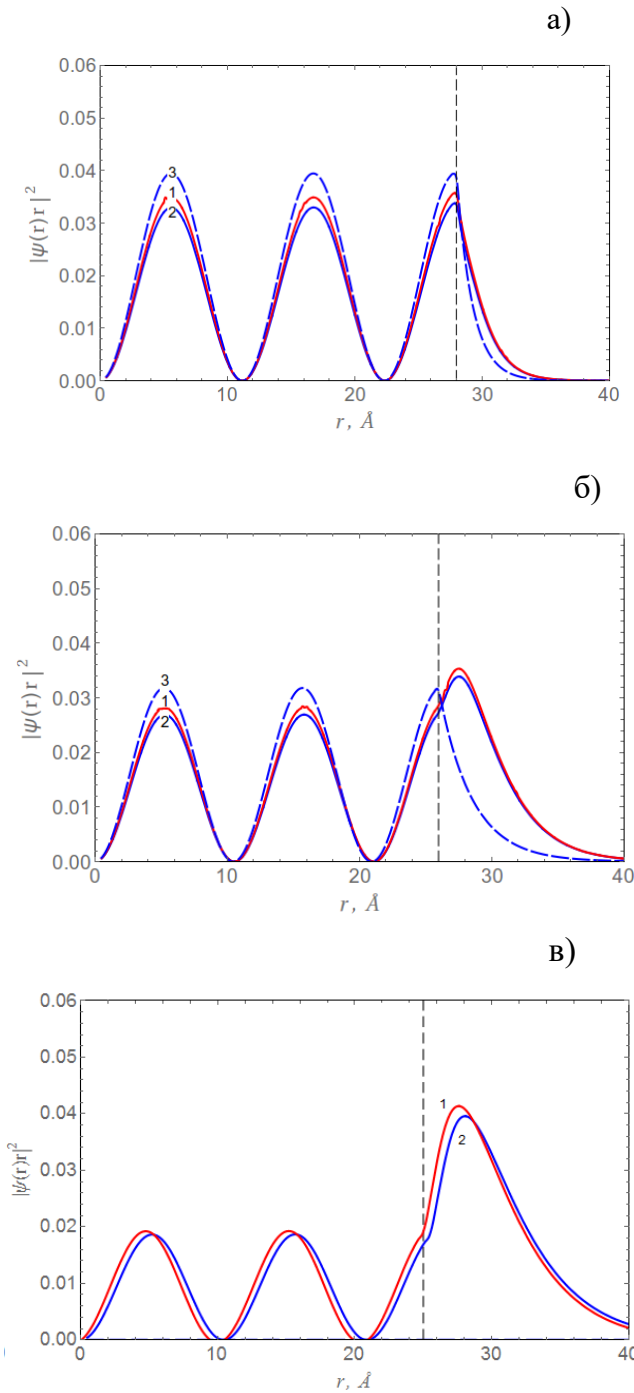


Рис. 5. Густина ймовірності для електрона у гетеросистемі CdTe/SiO_2 . Крива 1 – метод стрільби, крива 2 – фазовий метод, штрихова крива 3 – без урахування поляризаційних зарядів. Рис. а) – розмір КТ $a=28 \text{ \AA}$, рис. б) – розмір КТ $a=26 \text{ \AA}$, рис. в) – розмір КТ $a=25.5 \text{ \AA}$.

На основі визначених станів було обчислено лінійний коефіцієнт міжрівневого поглинання лінійно поляризованої електромагнітної

хвилі частоти ω згідно з формулою[22-24]:

$$\alpha_{I,I}(\omega) = \omega \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon}} \frac{N |d_{I,I}|^2 \hbar \Gamma}{(E_I - E_I - \hbar \omega)^2 + (\hbar \Gamma)^2}, \quad (18)$$

де ϵ_0 – електрична стала, μ_0 – магнітна стала, $\hbar \Gamma$ – параметр, що відповідає за різні фактори розсіювання; у роботі використано типові його значення, як у [22], концентрація носіїв гетеросистеми $N = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ [23], $d_{I,II}$ – дипольний момент міжрівневого переходу зі стану I в стан II . Результати обчислень подано на рис.6-7.

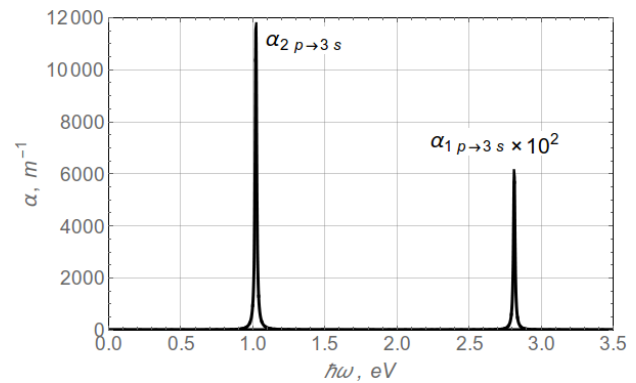


Рис. 6. Лінійний коефіцієнт міжрівневого поглинання світла для гетеросистеми CdSe/SiO_2 . Радіус КТ $a=22 \text{ \AA}$.

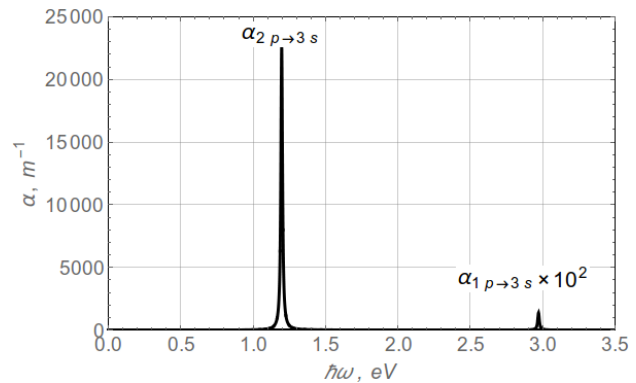


Рис. 7. Лінійний коефіцієнт міжрівневого поглинання світла для гетеросистеми CdTe/SiO_2 . Радіус КТ $a=25.5 \text{ \AA}$.

На графіках подано залежність коефіцієнта поглинання від енергії падаючого кванта. Розглянуто такі розміри КТ, коли 3s-стан є поверхневим. Обчислено дипольно дозволених переходи у стан 3s зі станів, енергія яких є мен-

ша від енергії цього поверхневого стану. Як видно з рисунків, можливі переходи у різних діапазонах енергій за участю поверхневого 3s-стану. Зокрема, переходи 1p-3s лежать у короткохвильовій області і їх максимуми значно менші від переходів 2p-3s, енергія яких зміщена у сторону довших хвиль порівняно з 1p-3s переходом. Якісно схожі залежності енергій переходів отримано і для CdS/SiO_2 у нашій попередній роботі [19].

4. Висновки

Отже, у роботі чисельними методами проведено обчислення електронного енергетичного спектру КТ гетеросистем $CdSe/SiO_2$ та $CdTe/SiO_2$ з урахуванням потенціалу самодії електрона. Встановлено, що врахування цього потенціалу дає можливість пояснити існування поверхневих електронних станів, в яких електрон локалізується у матриці поблизу поверхні КТ. Показано, що енергетичний спектр електрона зазначених гетеросистем є трьох типів. Він є неперервним, коли енергія електрона більша за висоту бар'єру на межі КТ-матриця. Меншій енергії електрона відповідають енергетичні рівні поверхневих станів. Ще менші енергії задають внутріточкові електронні стани.

Встановлено критерій за енергією поділу станів на поверхневі та внутріточкові. Енергія кожного поверхневого рівня носія заряду є меншою за енергію електрона відповідного стану в моделі, коли потенціал самодії не враховано. Внутріточкові стани характеризуються тим, що поверхневі зв'язані заряди збільшують енергію кожного енергетичного рівня електрона.

Показано, що зі збільшенням радіуса КТ гетеросистеми кожен дискретний енергетичний рівень, який відщеплюється від неперервного спектру в підбар'єрній області, є поверхневим електронним рівнем в поляризаційній ямі. В області зміни радіуса КТ від 10 Å до 30 Å в обох гетеросистемах такими рівнями є $E_{1,2}, E_{2,0}, E_{1,3}, E_{2,1}, E_{1,4}, E_{2,2}, E_{3,0}$. Існують визначені області зміни радіусів, коли ці стани є поверхневими. Кожен діапазон зміни радіуса КТ, коли конкретний стан є поверхневим, є малим, однак його величина зростає зі збільшенням радіуса КТ. При зростанні радіуса КТ конкрет-

ний енергетичний рівень переходить з розряду енергетичного рівня поверхневого стану електрона в енергетичний рівень внутріточкового стану частинки.

Зазначені висновки підтверджено аналізом залежності густини ймовірності перебування електрона в просторі від його відстані до центру.

Порівняння енергетичного спектру електрона гетеросистеми $CdSe/SiO_2$ та $CdTe/SiO_2$ дає можливість зробити такі висновки. По-перше, при однакових радіусах КТ енергія енергетичних рівнів електрона в КТ $CdSe$ є більшою за енергію відповідних рівнів КТ $CdTe$. По-друге, радіуси КТ $CdTe$, при яких конкретний рівень є поверхневим, є більшими за радіуси КТ $CdSe$. Ці результати пов'язані з тим, що ефективна маса електрона $CdSe$ є більшою за ефективну масу електрона кристалу $CdTe$.

Для встановлення ролі поверхневих станів розглянуто конкретний випадок $a = 22$ Å для $CdSe$ та $a = 25.5$ Å для $CdTe$, коли 3s-стан є поверхневим. Обчислено коефіцієнт поглинання світла при переході електрона з внутріточкових станів 1p, 2p в поверхневий стан 3s. Для обох гетеросистем пік поглинання світла для електронного переходу з меншою енергією (1p-3s) є на три порядки більшим, ніж пік для переходу 2p-3s. Перші піки гетеросистем відповідають діапазону інфрачервоних хвиль, а другий – діапазону фіолетових хвиль.

Список використаної літератури

- [1]. Yekimov A. I. Kvantovyy razmernyy effekt v trekhmernykh mikrokristallakh poluprovodnikov / A. I. Yekimov, A. A. Onushchenko // Pisma v ZhETF. – 1981. – Т. 34. – № 6. – S. 363-366.
- [2]. Efros Al. L. Mezhoznoe pogloshchenie sveta v poluprovodnikovom share / Al. L. Efros, A. L. Efros // FTP. – 1982. – Т. 16. – № 7. – S. 1209-1214.
- [3]. Kayanuma Y. Quantum-size-effects of interaction electrons and holes in semiconductor microcrystals with spherical shape / Y. Kayanuma // Phys. Rev. B. – 1989. – V. 38. – №. 14. – P. 9797-9805.
- [4]. Nandakumar P. Optical absorption and photoluminescence studies an CdS quantum dots in Nafion / P. Nandakumar and C. Vijayan, Y. V.

G. S. Murti // J. of Appl. Phys. – 2002. – V. 91, №3. – P. 1509-1514.

[5]. Demchenko D. O. Optical transitions and nature of Stokes shift in spherical *CdS* quantum dots / D. O. Demchenko and Lin-Wang Wang // arXiv:cond-mat/0603563v1 [cond-mat. mtrl-sci] 21 Mar 2006.

[6]. Skobeeva, V. M. Opticheskie svoystva nanokristallov sulfida kadmiya, poluchennykh zol-gel metodom v zhelatine / V. M. Skobeeva, V. A. Smyntyna, O. I. Sviridova [i dr.] // Zhurnal prikladnoy spektroskopii. – 2008. – T. 75, № 4. – S. 556-562.

[7]. Smyntyna V. Vplyv poverkhni nanokystaliv CdS na jikhni ljuminescentni vlastyivosti / V. Smyntyna, B. Semenenko, V. Skobeeva [ta in. .] // Elektronika ta informacijni tekhnologhiji. – 2012. – V. 2. – S. 45-50.

[8]. Smyntyna V. A. Lyuminescentnye svoystva nanokristallov sulfida kadmiya, legirovannykh atomami litiya i alyuminiya / V. A. Smyntyna, V. M. Skobeeva, N. V. Malushin // Sensorna Elektronika i Mikrosystemni Tekhnologhiji. – 2011. – T. 2, № 8. – S. 55.

[9]. Smyntyna V. The nature of emission centers in *CdS* nanocrystals / V. Smyntyna, V. Skobeeva, N. Malushin // Radiation Measurements. – 2007. – V. 42. – P. 693-696.

[10]. Synthesis route and optical characterization of *CdS:Mn*/ polyvinyl alcohol nanocomposite / VI. Fediv, G. Yu. Rudko, A. I. Savchuk, E. G. Gule, A. G. Voloshchuk // Semiconductor physics, quantum electronics and photoelectronics. – 2012. – Vol. 15, № 2. – P. 117-123.

[11]. Optychni ta strukturno-defektni kharakterystyky nanokystaliv CdS:Cu i CdS:Zn, syntezovanykh v polimernykh matrycjakh / D. V. Korbutjak, S. V. Tokarev, S. I. Budzuljak, A. O. Kuryk, V. P. Kladjko, Ju. O. Polishhuk, O. M. Shevchuk, Gh. A. Iljchuk, V. S. Tokarev // Fiz. i khim. tverd. tila. – 2013. – T. 14, № 1. – S. 222-227.

[12]. Savchuk A. J. Vplyv leghuvannja kolojidnykh nanochastok CdS domishkoju Mn na spektry fotoljuminescenciji / A. J. Savchuk, V. V. Makovij // Naukovyj visnyk Cherniveckogho nacionaljnogho universytetu. – 2012. – T. 2, V. 1. – Fizyka. Elektronika. – S. 66-68.

[13]. Korbutjak D. V. Svitlovyprominjujuchi vlastyivosti kvantovykh

tochok napivprovodnykovykh spolk A₂B₆ / D. V. Korbutjak, O. V. Kovalenko, S. I. Budzuljak y dr. // UFZh. – 2012. – T. 7, #1. – S. 48-95.

[14]. Romcevic M. . Photoluminescence of highly doped *Cd_{1-x}Mn_xS* nanocrystals / M. Romcevic, N. Romcevic, R. Kostic // J. of Alloys and Compounds. – 2010. – Vol. 497. – P. 46-54.

[15]. Korbytyak D. V. Colloidal *CdTe* and *CdSe* quantum dots: Technology of preparing and optical properties / D. V. Korbytyak, S. M. Kalytchuk, I. I. Geru // J. Nanoelectronics and optoelectronics. – 2009. – V. 4, № 1. P. 1-6.

[16]. Boychuk V. I. Vliyanija promezhutochnogo sloya s peremennoy ot koordynaty dielektricheskoy pronitsaemostyu na energiyu osnovnogo sostoyaniya elektrona v sfericheskoy slozhnoy nanogeterosisteme / V. I. Boychuk, R. Yu. Kubay // FTT. – 2001. – T. 43, № 2. – S. 226-232.

[17]. Boichuk V. I. The effect of the polarization charges on the optical properties of a spherical quantum dot with an off-central hydrogenic impurity / V. I. Boichuk, I. V. Bilynskiy, R. Ya. Leshko // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. — 2011. — Vol. 45, № 2. — P. 476–482.

[18]. Boichuk V. I. Optical properties of a spherical quantum dot with two ions of hydrogenic impurity / V. I. Boichuk, I. V. Bilynskiy, R. Ya. Leshko // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. — 2013. — Vol. 54. — P. 281–287.

[19]. Boichuk V. I. Light absorption of small *CdS* quantum dots/ V. I. Boichuk, R. Ya. Leshko, D. S. Karpyn // Sensor Electronics and Microsystem Technologies . — 2017. — Vol. 14, N1. – P. 21–30.

[20]. Kalitkin N. N. Chislennyye metody. – M. : Nauka – 1978, 512 s.

[21]. Otfried Madelung. Semiconductors: Data Handbook. – Springer Science & Business Media, 2004 – P. 691.

[22]. Vahdani M. R. K. Linear and nonlinear optical properties of a hydrogenic donor in lens-shaped quantum dots / M. R. K. Vahdani, and G. Rezaei // Physics Letters A. – 2009. – V. 373, № 34. – P. 3079–3084.

[23]. Rezaei G. . Nonlinear optical properties of a hydrogenic impurity in an ellipsoi-

dal finite potential quantum dot / G. Rezaei, M. R. K. Vahdani, and B. Vaseghi // Current Applied Physics. – 2011. – V. 11, № 2. – P. 176–181. [24]. C. L. Tang, Fundamentals of Quantum Mechanics for Solid State Electronics and Optics, Cambridge University Press, Cambridge, 2005.

PACS 68.65.Hb, 73.22.-f, 78.67.Bf UDC 539.261
DOI 10.18524/1815-7459.2018.1.126342

SURFACE STATES IN THE SPHERICAL NANOCRYSTALS *CdSe*, *CdTe*

V. I. Boichuk, R. Ya. Leshko, D. S. Karpyn

Department of physics
Ivan Franko Drohobych State Pedagogical University
Stryiska Str. 3, Drohobych, Lviv region, 82100

Summary

The energy of the electron surface states has been define, which causes by the polarization charges on the interfaces of the heterosystem, by numerical methods. It has been found conditions of their existence. Especially, it has been show that for heterosystems with large difference between dielectric permittivities the according surface states exist in the large nanocrystal size range. It has been show, that there are tree types of electron spectra. It is continuous spectrum, when the electron energy is larger then potential barrier height on the interface. The energy of surface states are related with smaller electron energies. Even less energy forms the interdot electron states. It has been obtain, that the nanocrystal size increase, every energy level, which splits from the continues spectrum, in the quantum well can become the surface state in the polarization quantum well. It has been define, which states become the surface states. It is proved that there are the special ranges of the quantum dot radius when those states are surface states. Each range of change of the quantum dot radius, when a particular state is superficial, is small, but its magnitude increases with the radius of a nanocrystal increases. When the quantum dot radius increases, the specific energy level passes from the level of the electron energy of the surface state to the energy level of the interdot state of the particle. The above conclusions were confirmed by the analysis of the dependence of the probability density density of an electron in space from its distance to the center. The obtained results have been compared with those ones for different nanocrystals (*CdSe/SiO₂* i *CdTe/SiO₂*).

Keywords: quantum dot, surface state, polarization trap, selfinteraction potential

ПОВЕРХНЕВІ СТАНИ У СФЕРИЧНИХ НАНОКРИСТАЛАХ $CdSe$, $CdTe$

В. І. Бойчук, Р. Я. Лешко, Д. С. Карпин

Кафедра фізики
Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка
вул. Стрийська 3, Дрогобич, Львівська обл., 82100

Реферат

Чисельними методами визначено енергію поверхневих станів електрона у гетеросистемі з квантовими точками, що зумовлені поляризаційними зарядами, які виникають на гетеромежах. Знайдено умови їх існування. Визначено, що для гетеросистем з більшою різницею діелектричних проникностей, відповідні поверхневі стани існують у більшій області зміни розмірів нанокристалів. Показано, що енергетичний спектр електрона є трьох типів. Він є неперервним, коли енергія електрона більша за висоту бар'єру на межі квантова точка – матриця. Меншій енергії електрона відповідають енергетичні рівні поверхневих станів. Ще менші енергії задають внутріточкові електронні стани. Встановлено, що зі збільшенням розмірів нанокристалів кожен дискретний енергетичний рівень, що відщеплюється від неперервного спектру в підбар'єрній області може ставати поверхневим електронним рівнем в поляризаційній ямі. Визначено, які саме стани стають поверхневими і для яких розмірів нанокристалів. Доведено, що існують визначені області зміни радіусів, коли ці стани є поверхневими. Кожен діапазон зміни радіуса квантової точки, коли конкретний стан є поверхневим, є малим, однак його величина зростає зі збільшенням радіуса нанокристалу. При зростанні радіуса квантової точки конкретний енергетичний рівень переходить з розряду енергетичного рівня поверхневого стану електрона в енергетичний рівень внутріточкового стану частинки. Зазначені висновки підтверджено аналізом залежності густини ймовірності перебування електрона в просторі від його відстані до центру. Також проведено порівняння отриманих результатів для двох гетеросистем ($CdSe/SiO_2$ і $CdTe/SiO_2$).

Ключові слова: квантова точка, поверхневий стан, поляризаційна пастка, потенціал самодії

СЕНСОРИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

PHYSICAL SENSORS

УДК 537.32, 618.19-006.04:612.521:612.014.43

DOI 10.18524/1815-7459.2018.1.126347

ПРО ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА НА ПОКАЗИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ СЕНСОРІВ МЕДИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

*Л. І. Анатичук^{1,2}, О. І. Іващук³, Р. Р. Кобилянський^{1,2}, І. Д. Постевка³, В. Ю. Бодяка³,
І. Я. Гушул³, Ю. Я. Чупровська³*

¹ Інститут термоелектрики НАН та МОН України, вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;
anatysh@gmail.com, romakobylianskyi@ukr.net;

² Чернівецький національний університет ім. Ю.Федьковича, вул. Коцюбинського, 2,
Чернівці, 58012, Україна;

³ Вищий державний навчальний заклад України "Буковинський державний медичний
університет", Театральна пл., 2, Чернівці, 58002, Україна; ivashchuk@bsmu.edu.ua, bodyka@i.ua

ПРО ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА НА ПОКАЗИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ СЕНСОРІВ МЕДИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

*Л. І. Анатичук, О. І. Іващук, Р. Р. Кобилянський, І. Д. Постевка, В. Ю. Бодяка, І. Я. Гушул,
Ю. Я. Чупровська*

Анотація. У роботі наведено конструкцію, принцип роботи та технічні характеристики термоелектричного приладу для вимірювання температури і густини теплового потоку, в якому передбачено зв'язок з персональним комп'ютером для збереження, обробки і візуалізації результатів вимірювань у реальному часі. Представлено результати досліджень густини теплового потоку і температури поверхні шкіри молочної залози залежно від температури навколишнього середовища. Встановлено вплив температури навколишнього середовища на покази тер-

моелектричних сенсорів медичного призначення. Визначено силу кореляційно-регресивного зв'язку між густиною теплового потоку і температурою поверхні шкіри молочної залози.

Ключові слова: термоелектричний сенсор, температура, густина теплового потоку, діагностика онкозахворювань молочної залози

ABOUT THE INFLUENCE OF AMBIENT TEMPERATURE ON THE READINGS OF MEDICAL PURPOSE THERMOELECTRIC SENSORS

L. I. Anatyshuk, O. I. Ivashchuk, R. R. Kobylianskyi, I. D. Postevka, V. Yu. Bodiaka, I. Ya. Hushul, Yu. Ya. Chuprovskaya

Abstract. The paper presents the design, operating principle and technical characteristics of thermoelectric device for measuring temperature and heat flux density which involves connection to personal computer for storage, processing and visualization of measurement results in real time. The results of studies of heat flux density and skin surface temperature of mammary gland and as a function of ambient temperature are presented. Then influence of ambient temperature on the readings of medical purpose thermoelectric sensors is established. Then intensity of correlation and regression relationship between heat flux density and skin surface temperature of mammary gland is determined.

Keywords: thermoelectric sensor, temperature, heat flux density, diagnostics of mammary gland oncological diseases

О ВОЗДЕЙСТВИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ПОКАЗАНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Л. И. Анатычук, А. И. Иващук, Р. Р. Кобылянский, И. Д. Постевка, В. Ю. Бодяка, И. Я. Гушул, Ю. Я. Чупровская

Аннотация. В работе приведены конструкция, принцип работы и технические характеристики термоэлектрического прибора для измерения температуры и плотности теплового потока, в котором предусмотрено связь с персональным компьютером для хранения, обработки и визуализации результатов измерений в реальном времени. Представлены результаты исследований плотности теплового потока и температуры поверхности кожи молочной железы зависимо от температуры окружающей среды. Установлено влияние температуры окружающей среды на показания термоэлектрических сенсоров медицинского назначения. Определено силу корреляционно-регрессивной связи между плотностью теплового потока и температурой поверхности кожи молочной железы.

Ключевые слова: термоэлектрический сенсор, температура, плотность теплового потока, диагностика онкозаболеваний молочной железы

Вступ. Для дослідження локального тепловідлення організму людини перспективними є напівпровідникові термоелектричні сенсори теплового потоку [1-8], які поєднують у собі мініатюрність, високу чутливість, стабільність параметрів у широкому інтервалі робочих температур і узгоджуються із сучасною реєструючою апаратурою. Використання таких сенсорів дозволяє досягати високої локальності та точності теплотричних вимірювань. Це, у свою чергу, дає можливість отримувати інформацію про характеристики досліджуваних об'єктів і детально їх аналізувати з метою виявлення на ранніх стадіях запальних процесів організму людини та онкозахворювань.

Важливим фактором при дослідженні теплових потоків тіла людини за допомогою термоелектричних сенсорів є точність та швидкодія реєстрації сигналів термоелектричних сенсорів. Ранні розробки реєстраторів сигналів [3-8] мають відносно високу похибку вимірювань, великі габаритні розміри, невисоку швидкодію та не мають автономних джерел живлення. Подальші розробки в цьому напрямку привели до створення сучасних електронних реєстраторів з обробкою інформації термоелектричних сенсорів теплового потоку [9-13], які мають внутрішню пам'ять для збереження результатів вимірювань та автономні джерела живлення. У роботі [14] розроблено сучасний багатоканальний термоелектричний прилад для вимірювання температури і густини теплового потоку у реальному часі з комп'ютерним програмним забезпеченням.

Однак недоліком розроблених термоелектричних сенсорів та приладів на їх основі є те, що покази таких сенсорів можуть залежати від температури оточуючого середовища. Крім того, досі недостатньо відомостей про кореляцію температури і густини теплового потоку організму людини [15-23]. Вивчення особливостей динаміки густини теплового потоку і температури поверхні шкіри молочної залози залежно від температури навколишнього середовища дозволить вдосконалити термоелектричні сенсори, що надзвичайно важливо при їх застосуванні у медичній практиці.

Мета дослідження. Визначити вплив температури навколишнього середовища на покази термоелектричних сенсорів медичного

призначення за допомогою багатоканального термоелектричного приладу для вимірювання температури і густини теплового потоку.

Матеріал і методи досліджень. В Інституті термоелектрики НАН і МОН України в рамках договору про співдружність з ВДНЗ України «Буковинський державний медичний університет» МОЗ України було розроблено термоелектричний прилад для вимірювання температури і густини теплового потоку «АЛТЕК-10008» [14]. Прилад призначений для одночасного вимірювання температури та густини теплового потоку з поверхні тіла людини контактним способом, що дає можливість виявляти на ранніх стадіях запальні процеси та онкозахворювання. Зовнішній вигляд та технічні характеристики приладу наведено на рис.1 і таблиці 1 відповідно.

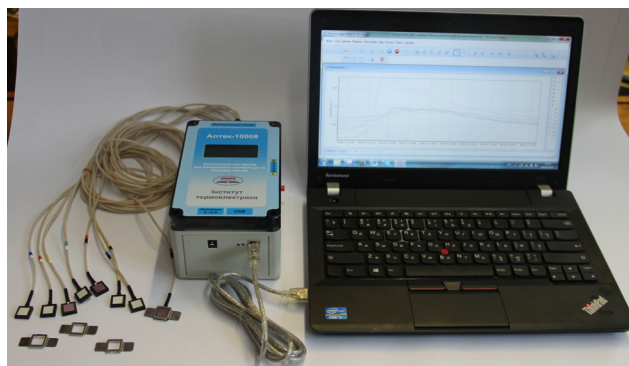


Рис. 1. Зовнішній вигляд термоелектричного приладу для вимірювання температури і густини теплового потоку «АЛТЕК-10008» [14].

Прилад складається з електронного блоку керування та 8-ми ідентичних термоелектричних зондів. Електронний блок керування представляє собою 16-канальний мікропроцесорний модуль реєстрації електричних сигналів, виконаний на основі реєстратора Triton-9004TCA. Живлення приладу може здійснюватися двома шляхами: три гальванічних елементів типу АА (4.5 В) або зовнішнє джерело живлення напругою 5 В (мережевий AC/DC-адаптера (220/5 В), USB-порт персонального комп'ютера чи ноутбука). При одночасному підключенні до приладу зовнішнього джерела живлення та гальванічних елементів відбувається підзарядка останніх.

Технічні характеристики термоелектричного приладу

№	Характеристики приладу; один. вимірювання	Значення
	Кількість зондів, шт.	8
	Габарити зонда, мм	14×14×3
	Склад зонда	датчик температури, датчик теплового потоку
	Тип датчика температури	термістор
	Габарити датчика температури, мм	2.2×2×0.7
	Тип сенсора теплового потоку	термопарна термоелектрична батарея
	Габарити термоелектричної батареї, мм	10×10×3
	Довжина з'єднувальних проводів зонда, м	1.5
	Тип електронного реєстратора	TRITON 9004TC A
	Діапазон вимірювання температури, °С	0 ÷ +50
	Точність вимірювання температури, °С	0.05
	Діапазон вимірювання густини теплових потоків, Вт/см ²	5·10 ⁻⁵ ÷ 10 ⁻¹
	Швидкодія електронного реєстратора, с	3 ÷ 5
	Живлення електронного реєстратора: а) мережевий АС/DC-адаптер, В б) три гальванічних елементи АА, В	220/5 4.5
	Можливість виведення результатів вимірювання на дисплей електронного реєстратора у реальному часі	+
	Можливість виведення результатів вимірювання на персональний комп'ютер у реальному часі	+
	Можливість збереження результатів вимірювання на карту пам'яті microSD у реальному часі	+

Прилад є повністю автономним – результати вимірювань відображаються на дисплеї в режимі реального часу та зберігаються на карту пам'яті microSD із заданим часовим інтервалом. Крім того, для зручності обробки і аналізу результатів вимірювань передбачено передачу даних по інтерфейсу USB на персо-

нальний комп'ютер за допомогою спеціально розробленої комп'ютерної програми.

Термоелектричний зонд містить розміщені в спільному корпусі датчик температури (термістор) та термопарний сенсор теплового потоку. Схема термоелектричного зонда наведена на рис.2.

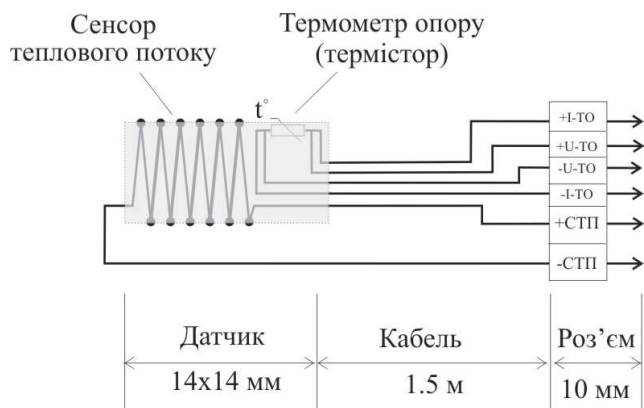


Рис. 2. Схема термоелектричного зонда.

Сенсор теплового потоку представляє собою щільно упаковану батарею термопарних елементів, виготовлених з вискоелективних напівпровідникових матеріалів на основі Ві-Те [1]. Проміжки між термопарними елементами заповнені епоксидним компаундом, а робочі поверхні батареї герметично захищені керамічними пластинами. Повна герметичність термоелектричних зондів дає можливість проводити їх якісну дезінфекцію. Для зручності заміни термоелектричного зонда передбачено його з'єднання з електронним блоком керування здійснюється через роз'єм. Кріплення термоелектричних зондів до об'єкту дослідження здійснюється за допомогою рамок з пелюстками, виготовлених з харчової нержавіючої сталі.

Для реалізації поставленої у даній роботі мети було обстежено 35 жінок віком від 21 до 22 років без патології молочних залоз та інших органів. Середній вік обстежених осіб склав $22,03 \pm 0,421$ роки.

Фазу менструального циклу не враховували, оскільки вона не призводить до вірогідних змін густини теплового потоку та температури поверхні шкіри молочної залози, проте жінок у фазі десквамації не було [24].

Вимірювання густини теплового потоку молочної залози проводили контактним способом використовуючи вказаний вище багатоканальний термоелектричний прилад «АЛ-ТЕК-10008» з програмним забезпеченням Thermologger 9004 ТС-М [14]. Термоелектричні сенсори теплового потоку (8 шт.) розташовували у горизонтальному положенні у кожному квадранті правої та лівої молочної залози.

Вимірювання проводили кожні 5 секунд, впродовж 5 хвилин, при температурах оточуючого середовища – 18 °С, 20 °С, 22 °С, 24 °С, 26 °С, 28 °С.

Температуру навколишнього середовища вимірювали за допомогою кількох спиртових термометрів, які розташовували на штативах по діагональному перерізу кімнати у 3 точках на висоті 0,2 м від підлоги, у 3 точках на висоті 1,5 м від підлоги, а також на відстані 0,2 м від стіни. Покази термометрів знімали після експозиції 10 хвилин у точці вимірювання та визначали середню температуру.

Статистичну обробку отриманих результатів досліджень проведено на персональному комп'ютері з використанням електронних таблиць Microsoft Excel та пакета програм статистичної обробки PAST. Враховуючи велику кількість показників одного спостереження, отриманих впродовж 5 хвилин вимірювання, враховували медіану (статистика, яка розділяє ранжирувану сукупність на дві рівні частини: 50% "нижні" члени ряду будуть мати значення ознаки не більше, ніж медіана, а "верхні" 50% – значення ознаки не менше, ніж медіана).

Правильність розподілу даних у вибірках перевіряли шляхом застосування критерію Shapiro-Wilk. При нормальному розподіленні незалежних груп використовували критерій (t) Стьюдента. У разі ненормального розподілення неперервних перемінних використовували критерій Манна-Уїтні (U-тест). Розбіжності отриманих результатів вважали статистично вірогідними при $p < 0,05$, що є загальноприйнятим у медико-біологічних дослідженнях.

Кореляційно-регресивний аналіз проводили шляхом оцінки параметрів лінійної функції з можливістю визначення лінійного коефіцієнта кореляції Пірсона (r) з метою дослідження можливого зв'язку між густиною теплового потоку та температурою поверхні шкіри. Направленість зв'язку визначали за знаком коефіцієнта кореляції, а силу кореляційного зв'язку за близькістю коефіцієнта кореляції до 1.

Результати експериментальних досліджень та їх обговорення. Отримані результати дослідження густини теплового потоку

лівої молочної залози, які представлені в таблиці 2, свідчать про зниження показників у кожному її квадранті, при поступовому зростанні температури навколишнього середовища.

$1,15 \pm 0,014$ раза ($p < 0,05$) при зростанні температури навколишнього середовища на кожні 2°C . При зростанні температури навколишнього середовища на 10°C відмічається зниження густини теплового потоку в $2,05 \pm 0,029$ раза ($p < 0,01$).

Таблиця 2

Значення густини теплового потоку кожного квадранта лівої молочної залози залежно від температури оточуючого середовища, ($M \pm m$), mW/cm^2

Температура оточуючого середовища	Квадранти молочної залози			
	Верхній зовнішній	Верхній внутрішній	Нижній зовнішній	Нижній внутрішній
18 °C n=33	$26,63 \pm 1,345$	$33,43 \pm 1,105$	$27,33 \pm 1,043$	$25,2 \pm 0,837$
20 °C n=35	$22,0 \pm 0,872$ $p < 0,001$	$30,86 \pm 0,595$ $p < 0,01$	$20,54 \pm 0,891$ $p < 0,001$	$20,38 \pm 0,506$ $p < 0,001$
22 °C n=33	$20,11 \pm 0,96$ $p > 0,05$	$25,81 \pm 0,831$ $p < 0,001$	$17,77 \pm 0,89$ $p < 0,05$	$17,16 \pm 0,642$ $p < 0,001$
24 °C n=33	$17,49 \pm 0,785$ $p > 0,05$	$22,64 \pm 0,655$ $p < 0,05$	$16,14 \pm 0,643$ $p > 0,05$	$16,07 \pm 0,538$ $p > 0,05$
26 °C n=31	$15,61 \pm 0,703$ $p < 0,05$	$19,91 \pm 0,799$ $p < 0,01$	$13,74 \pm 0,724$ $p < 0,05$	$14,36 \pm 0,666$ $p > 0,05$
28 °C n=31	$13,29 \pm 0,551$ $p < 0,05$	$16,65 \pm 0,513$ $p < 0,01$	$11,87 \pm 0,659$ $p > 0,05$	$12,52 \pm 0,572$ $p < 0,05$

Примітки:

1. n – кількість спостережень;
2. p – різниця проти попереднього показника в межах відповідного квадранту.

При аналізі результатів дослідження густини теплового потоку правої молочної залози, які наведені в таблиці 3, відмічається також зниження показників у кожному її квадранті, при зростанні температури навколишнього середовища. Спостерігається зниження густини теплового потоку молочної залози в

Так, при підвищенні температури навколишнього середовища на кожні 2°C , відмічається зниження густини теплового потоку в $1,16 \pm 0,014$ раза ($p < 0,05$), а при зростанні температури на 10°C – в $2,08 \pm 0,074$ раза ($p < 0,01$).

Таблиця 3

Значення густини теплового потоку кожного квадранта правої молочної залози залежно від температури оточуючого середовища, ($M \pm m$), мВ/см²

Температура оточуючого середовища	Квадранти молочної залози			
	Верхній зовнішній	Верхній внутрішній	Нижній зовнішній	Нижній внутрішній
18 °C n=33	34,99 ± 1,388	26,39 ± 2,172	28,35 ± 1,279	26,05 ± 0,832
20 °C n=35	29,09 ± 1,165 p<0,01	23,07 ± 1,758 p>0,05	22,6 ± 0,856 p<0,001	21,5 ± 0,628 p<0,001
22 °C n=33	26,62 ± 0,958 p>0,05	21,45 ± 0,879 p<0,05	19,25 ± 0,71 p<0,01	18,2 ± 0,679 p<0,01
24 °C n=33	22,94 ± 0,908 p<0,05	18,01 ± 0,791 p<0,01	17,42 ± 0,534 p<0,05	16,09 ± 0,713 p<0,05
26 °C n=31	20,48 ± 0,925 p>0,05	17,42 ± 0,794 p>0,05	15,66 ± 0,72 p<0,05	15,22 ± 0,736 p>0,05
28 °C n=33	16,53 ± 0,588 p<0,001	14,02 ± 0,54 p<0,001	13,07 ± 0,628 p<0,05	12,91 ± 0,523 p<0,05

Примітки:

1. n – кількість спостережень;
2. p – різниця проти попереднього показника в межах відповідного квадранту.

Отже, зростання температури навколишнього середовища призводить до вірогідного зменшення густини теплового потоку молочної залози, що узгоджується із законом Фур'є (1822) – кількість тепла, передана внаслідок теплопровідності, пропорційна градієнту температури, площі, через яку здійснюється передача тепла, і тривалості процесу.

Проведені дослідження показали, що зростання температури навколишнього середовища на кожні 2°C призводить до зниження густини теплового потоку молочної залози в $1,16 \pm 0,01$ раза ($p < 0,01$). Це необхідно враховувати при визначенні густини теплового потоку молочної залози з метою діагностики її патологічних станів або онкозахворювань.

Представлені в таблиці 4 результати дослідження динаміки температури поверхні шкіри лівої молочної залози залежно від температури навколишнього середовища вказують на невірогідну різницю показників при зростанні останньої з 18°C до 22°C. При підвищенні температури навколишнього середовища з 22°C до 28°C відмічається вірогідне зростання температури поверхні шкіри молочної залози в $1,08 \pm 0,004$ раза ($p < 0,05$).

Значення температури поверхні шкіри кожного квадранта лівої молочної залози залежно від температури оточуючого середовища, (M±m), °C

Температура оточуючого середовища	Квадранти молочної залози			
	Верхній зовнішній	Верхній внутрішній	Нижній зовнішній	Нижній внутрішній
18 °C n=33	31,71 ± 0,269	32,49 ± 0,171	32,12 ± 0,208	30,92 ± 0,298
20 °C n=35	31,88 ± 0,207 p>0,05	31,51 ± 0,164 p>0,05	32,06 ± 0,186 p>0,05	30,83 ± 0,241 p>0,05
22 °C n=33	32,88 ± 0,255 p>0,05	31,94 ± 0,184 p>0,05	31,37 ± 0,903 p>0,05	31,24 ± 0,231 p>0,05
24 °C n=33	32,95 ± 0,227 p>0,05	32,69 ± 0,176 p<0,01	32,85 ± 0,218 p<0,05	32,13 ± 0,226 p<0,01
26 °C n=31	33,81 ± 0,227 p<0,05	33,42 ± 0,148 p<0,01	33,51 ± 0,159 p<0,05	32,98 ± 0,157 p<0,01
28 °C n=33	34,72 ± 0,175 p<0,01	34,49 ± 0,145 p<0,001	34,5 ± 0,15 p<0,001	34,01 ± 0,147 p<0,001

Примітки:

1. n – кількість спостережень;
2. p – різниця проти попереднього показника в межах відповідного квадранту.

Результати дослідження динаміки температури поверхні шкіри правої молочної залози залежно від температури навколишнього середовища, які представлені в таблиці 5, свідчать про невірогідну різницю показників при зростанні останньої з 18°C до 22°C, за винятком верхнього внутрішнього квадранту при показниках 22°C. При зростанні температури навколишнього середовища з 22°C до 28°C відмічається зростання температури поверхні шкіри молочної залози в $1,09 \pm 0,003$ раза ($p<0,05$).

Отже, при зростанні температури навколишнього середовища до температури комфорту (20-22°C) – температура поверхні

шкіри молочної залози не змінюється. Підвищення температури навколишнього середовища до 28°C призводить до зростання температури поверхні шкіри молочної залози в $1,08 \pm 0,005$ раза ($p<0,05$). Дану особливість можна пояснити тим, що незважаючи на зміни температури навколишнього середовища, тіло людини має постійну температуру за рахунок процесів терморегуляції, зокрема теплопровідності, конвекції та випромінювання. Ці процеси припиняються при температурі навколишнього середовища понад 35°C, а ізотермія здійснюється виключно шляхом випаровування рідини з поверхні шкіри (внаслідок потовиділення).

Таблиця 5

Значення температури поверхні шкіри кожного квадранта правої молочної залози залежно від температури оточуючого середовища, ($M \pm m$), °C

Температура оточуючого середовища	Квадранти молочної залози			
	Верхній зовнішній	Верхній внутрішній	Нижній зовнішній	Нижній внутрішній
18 °C n=33	31,18 ± 0,189	31,26 ± 0,206	30,68 ± 0,213	31,94 ± 0,147
20 °C n=35	31,14 ± 0,226 p>0,05	31,29 ± 0,193 p>0,05	30,59 ± 0,201 p>0,05	31,58 ± 0,199 p>0,05
22 °C n=33	31,58 ± 0,214 p>0,05	31,88 ± 0,206 p<0,05	30,92 ± 0,221 p>0,05	31,96 ± 0,214 p>0,05
24 °C n=33	32,66 ± 0,207 p<0,001	33,55 ± 0,982 p<0,05	31,88 ± 0,173 p<0,001	32,56 ± 0,191 p>0,05
26 °C n=31	33,38 ± 0,183 p<0,01	33,36 ± 0,194 p<0,05	32,71 ± 0,117 p<0,001	33,27 ± 0,177 p<0,01
28 °C n=33	34,58 ± 0,156 p<0,001	34,49 ± 0,166 p<0,001	33,97 ± 0,142 p<0,001	34,29 ± 0,158 p<0,001

Примітки:

1. n – кількість спостережень;
2. p – різниця проти попереднього показника в межах відповідного квадранту.

У даному випадку незначне зростання температури поверхні шкіри молочної залози при підвищенні температури навколишнього середовища вище 22°C можна пояснити перешкоджанням процесу випаровування рідини під термоелектричним вимірювальним зондом (внаслідок потовиділення).

Аналізуючи результати досліджень, що представлені в таблиці 6, слід відмітити наявність прямого кореляційний зв'язку середньої сили між густиною теплового потоку і температурою поверхні шкіри молочної залози при зміні температури навколишнього середовища в межах 18÷28°C. При різних температурах навколишнього середовища сила кореляційно зв'язку невірогідно змінюється.

Таблиця 6

Кореляційно-регресивний зв'язок між густиною теплового потоку і температурою поверхні шкіри лівої та правої молочних залоз залежно від температури оточуючого середовища, ($M \pm m$)

Температура оточуючого середовища	Сила кореляційно зв'язку, n=8
18 °C	0,31 ± 0,067 p>0,05
20 °C	0,44 ± 0,044 p>0,05

продовження таблиці 6

22 °C	0,57 ± 0,077 p>0,05
24 °C	0,47 ± 0,061 p>0,05
26 °C	0,57 ± 0,034 p>0,05
28 °C	0,64 ± 0,05 p>0,05

Примітки:

1. n – кількість спостережень;
2. p – різниця проти попереднього показника.

Отже, температура навколишнього середовища не впливає на силу взаємозв'язку густини теплового потоку і температури поверхні шкіри молочної залози.

Висновки

Визначено вплив температури навколишнього середовища на покази термоелектричних сенсорів медичного призначення, зокрема величина густини теплового потоку молочної залози в $1,16 \pm 0,01$ раза ($p < 0,01$) обернено пропорційна зростанню температури навколишнього середовища на кожні 2°C.

Встановлено, що коливання температури комфорту навколишнього середовища не впливає на температуру поверхні шкіри молочної залози, проте її зростання призводить до незначного збільшення останньої, що пояснюється перешкоджанням процесу випаровування рідини (внаслідок потовиділення) під термоелектричним вимірювальним зондом.

Встановлено, що між густиною теплового потоку і температурою поверхні шкіри молочної залози існує прямий кореляційно-регресивний зв'язок середньої сили, який не залежить від температури навколишнього середовища.

Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення термоелектричних сенсорів температури і теплового потоку, що виключить вплив температури оточуючого середовища на покази таких сенсорів. Це, у свою чергу, дає можливість значно підвищити точність теплотричних вимірювань.

Термоелектричні сенсори температури і теплового потоку та прилади на їх основі є перспективними для моніторингу температурного та теплового стану організму людини, що дає можливість виявляти на ранніх стадіях запальні процеси, онкозахворювання та проводити експрес-діагностику під час масового профілактичного огляду пацієнтів.

Список використаної літератури

- [1]. L. I. Anatyichuk. Termoelementy i termoelektricheskie ustroystva: Spravochnik. Naukova dumka, K. 768 s. (1979).
- [2]. O. A. Geraschenko. Osnovy teplometrii. Naukova dumka, K. 192 s. (1971).
- [3]. L. I. Anatyichuk, N. G. Lozinskiy, P. D. Mikityuk, Yu. Yu. Rozver. Termoelektricheskiy poluprovodnikoviy teplomer // Pribory i tehnika eksperimenta, 5, p. 236 (1983).
- [4]. L. I. Anatyichuk, L. P. Bulat, D. D. Gutsal, A. P. Myagkota. Termoelektricheskiy teplomer // Pribory i tehnika eksperimenta, 4, p. 248 (1989).
- [5]. R. B. Ladyika, D. N. Moskal, V. D. Diduh. Poluprovodnikoviyie teplomeryi v diagnostike i lechenii zabolevaniy sustavov // Meditsinskaya tehnika, 6, pp. 34-35 (1992).
- [6]. R. B. Ladyika, O. N. Dakalyuk, L. P. Bulat, A. P. Myagkota. Primenenie poluprovodnikoviyih teplomerov v diagnostike i lechenii // Meditsinskaya tehnika, 6, pp. 36-37 (1996).
- [7]. B. M. Demchuk, L. Ya. Kushneryk, I. M. Rublenyk. Termoelektrychni datchyky dlya ortopediyi // Termoelektryka, 4, pp. 80-85 (2002).
- [8]. A. A. Ascheulov, L. Ya. Kushnerik. Termoelektricheskiy pribor dlya medikobiologicheskoy ekspress-diagnostiki // Tehnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature, 4, pp. 38-39 (2004).
- [9]. V. S. Hyshchuk. Elektronnyy rehistrator syhnaliv sensoriv teplovoho potoku lyudyny // Termoelektryka, 4, pp. 105-108 (2012).
- [10]. V. S. Hyshchuk. Elektronnyy rehistrator z obrobkoju syhnaliv termoelektrychnoho sensora teplovoho potoku // Termoelektry-

- ka, 1, pp. 82-86 (2013).
- [11]. V. S. Hyshchuk. Modernizovanyy pryklad dlya vymiryuvannya teplovykh potokiv lyudyny // *Termoelektryka*, 2, pp. 91-95 (2013).
- [12]. V. S. Hyshchuk, R. R. Kobylyans'kyy, R. H. Cherkez. Bahatokanal'nyy pryklad dlya vymiryuvannya temperatury i hustyny teplovykh potokiv // *Naukovyy visnyk Chernivets'koho universytetu: zbirnyk nauk. prats'. Fizyka. Elektronika*, 3(1), pp. 96-100 (2014).
- [13]. R. R. Kobylyans'kyy, V. V. Boychuk. Vykorystannya termoelektrychnykh teplomiriv u medychniy diahnostytsi // *Naukovyy visnyk Chernivets'koho universytetu: zbirnyk nauk. prats'. Fizyka. Elektronika*, 4(1), pp. 90-96 (2015).
- [14]. L. I. Anatyshchuk, O. I. Ivashchuk, R. R. Kobylyans'kyy, I. D. Postevka, V. Yu. Bodyaka, I. Ya. Hushul. Termoelektrychnyy pryklad dlya vymiryuvannya temperatury i hustyny teplovoho potoku «AL-TEK-10008» // *Termoelektryka*, 1, pp. 76-84 (2016).
- [15]. L. I. Anatyshchuk, R. R. Kobylyans'kyy. Doslidzhennya vplyvu termoelektrychnoho teplomira na vyznachennya teplovydilennya lyudyny // *Termoelektryka*, 4, pp. 60-66 (2012).
- [16]. L. I. Anatyshchuk, R. R. Kobylyans'kyy. 3D-model' dlya vyznachennya vplyvu termoelektrychnoho teplomira na tochnist' vymiryuvannya teplovydilennya lyudyny // *Naukovyy visnyk Chernivets'koho universytetu: zbirnyk nauk. prats'. Fizyka. Elektronika*, 2(1), pp. 15-20 (2012).
- [17]. L. I. Anatyshchuk, R. R. Kobylyans'kyy. Komp'yuterne modelyuvannya pokaziv termoelektrychnoho teplomira v umovakh real'noyi ekspluatatsiyi // *Termoelektryka*, 1, pp. 53-60 (2013).
- [18]. L. I. Anatyshchuk, R. H. Hiba, R. R. Kobylyans'kyy. Pro deyaki osoblyvosti vykorystannya medychnykh teplomiriv pry doslidzhenni lokal'nykh teplovydilennya lyudyny // *Termoelektryka*, 2, pp. 67-73 (2013).
- [19]. R. R. Kobylyans'kyy. Pro vplyv teplovoyi izolyatsiyi na pokazy termoelektrychnoho sensora medychnoho pryznachennya // *Naukovyy visnyk Chernivets'koho universytetu: zbirnyk nauk. prats'. Fizyka. Elektronika*, 5(1), pp. 45-49 (2016).
- [20]. R. R. Kobylyans'kyy. Komp'yuterne modelyuvannya pokaziv termoelektrychnoho sensora medychnoho pryznachennya // *Termoelektryka*, 4, pp. 69-77 (2016).
- [21]. I. D. Postevka. Suchasnyy stan problemy skryninhu raku molochnoyi zalozy (ohlyad literatury) // *Bukovyns'kyy medychnyy visnyk*, 20, 2(78), pp. 199-203 (2016).
- [22]. I. D. Postevka, I. O. Malyshevs'kyy. Rol' teplovoho potoku molochnoyi zalozy u skryninhu yiyi onkolohichnoyi patolohiyi // *Klinichna ta eksperymental'na patolohiya*, 14, 2(55), pp. 163-166 (2015).
- [23]. O. I. Ivashchuk, I. D. Postevka, V. Yu. Bodyaka. Osoblyvosti dynamiky teplovoho potoku molochnoyi zalozy urazhenoyi zloyakisnym novoutvorenyam v eksperimenti // *Klinichna ta eksperymental'na medytsyna*, 1(70), pp. 15-18 (2016).
- [24]. Postevka I. D. Osoblyvosti teplovoho potoku molochnoyi zalozy zhinok molodoho viku // *Klinichna anatomiya ta operatyvna khirurgiya*, 15, 2(56), pp. 31-35 (2016).

ABOUT THE INFLUENCE OF AMBIENT TEMPERATURE ON THE READINGS OF MEDICAL PURPOSE THERMOELECTRIC SENSORS

*L. I. Anatyshuk^{1,2}, O. I. Ivashchuk³, R. R. Kobylianskyi^{1,2}, I. D. Postevka³, V. Yu. Bodiaka³,
I. Ya. Hushul³, Yu. Ya. Chuprovska³*

¹ The Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine;

² The Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University;

³ Higher state educational institution of Ukraine “Bukovinian State Medical University”

Summary

Purpose. To determine the influence of ambient temperature on the readings of medical purpose thermoelectric sensors using a multi-channel thermoelectric device for measurement of temperature and heat flux density. **Material and methods.** 35 women aged 21 to 22 years without pathology of mammary glands and other organs were examined. The average age of examined persons was 22.03 ± 0.421 years. Measurements of temperature and heat flux density were made with the use of a thermoelectric device for measurement of temperature and heat flux density “ALTEC“-10008” developed at the Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine. **Results.** The influence of ambient temperature on the readings of medical-purpose thermoelectric sensors was determined, in particular, the value of heat flux density of mammary gland is 1.16 ± 0.01 times ($p < 0.01$) inversely proportional to a rise in ambient temperature per every 2°C . It has been established that fluctuations of ambient comfort temperature do not affect the skin surface temperature of a mammary gland, however, its rise results in a slight increase of the latter, which is explained by the obstruction of liquid evaporation process (due to sweating) under the thermoelectric measuring probe. It has been established that between heat flux density and skin surface temperature of mammary gland there exists a direct correlation and regression relationship of average intensity that does not depend on ambient temperature. **Conclusions.** The results obtained can be used for the improvement of thermoelectric temperature and heat flux sensors, which will eliminate the influence of ambient temperature on the readings of such sensors. This, in turn, will improve considerably the accuracy of thermometric measurements. Thermoelectric temperature and heat flux sensors and devices on their basis hold much promise for monitoring of temperature and thermal state of human organism, which enables early diagnosis of inflammatory processes, oncologic diseases and perform instant diagnosis during mass prophylactic examination of patients.

Keywords: thermoelectric sensor, temperature, heat flux density, diagnostics of mammary gland oncological diseases

УДК 537.32, 618.19-006.04:612.521:612.014.43
DOI 10.18524/1815-7459.2018.1.126347

ПРО ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА НА ПОКАЗИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ СЕНСОРІВ МЕДИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

*Л. І. Анатичук^{1,2}, О. І. Іващук³, Р. Р. Кобилянський^{1,2}, І. Д. Постевка³, В. Ю. Бодяка³,
І. Я. Гушул³, Ю. Я. Чупровська³*

¹ Інститут термоелектрики НАН та МОН України;

² Чернівецький національний університет ім. Ю.Федьковича;

³ Вищий державний навчальний заклад України «Буковинський державний медичний університет»

Реферат

Мета. Визначити вплив температури навколишнього середовища на покази термоелектричних сенсорів медичного призначення за допомогою багатоканального термоелектричного приладу для вимірювання температури і густини теплового потоку. **Матеріал та методи.** Було обстежено 35 жінок віком від 21 до 22 років без патології молочних залоз та інших органів. Середній вік обстежених осіб склав $22,03 \pm 0,421$ роки. Для вимірювання температури і густини теплових потоків було використано розроблений в Інституті термоелектрики НАН і МОН України термоелектричний прилад для вимірювання температури і густини теплового потоку «АЛТЕК-10008». **Результати.** Визначено вплив температури навколишнього середовища на покази термоелектричних сенсорів медичного призначення, зокрема величина густини теплового потоку молочної залози в $1,16 \pm 0,01$ раза ($p < 0,01$) обернено пропорційна зростанню температури навколишнього середовища на кожні 2°C . Встановлено, що коливання температури комфорту навколишнього середовища не впливає на температуру поверхні шкіри молочної залози, проте її зростання призводить до незначного збільшення останньої, що пояснюється перешкоджанням процесу випаровування рідини (внаслідок потовиділення) під термоелектричним вимірювальним зондом. Встановлено, що між густиною теплового потоку і температурою поверхні шкіри молочної залози існує прямий кореляційно-регресивний зв'язок середньої сили, який не залежить від температури навколишнього середовища. **Висновки.** Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення термоелектричних сенсорів температури і теплового потоку, що виключить вплив температури оточуючого середовища на покази таких сенсорів. Це, у свою чергу, дає можливість значно підвищити точність теплометричних вимірювань. Термоелектричні сенсори температури і теплового потоку та прилади на їх основі є перспективними для моніторингу температурного та теплового стану організму людини, що дає можливість виявляти на ранніх стадіях запальні процеси, онкозахворювання та проводити експрес-діагностику під час масового профілактичного огляду пацієнтів.

Ключові слова: термоелектричний сенсор, температура, густина теплового потоку, діагностика онкозахворювань молочної залози

СЕНСОРИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

PHYSICAL SENSORS

PACS 73.20, УДК 621.383

DOI 10.18524/1815-7459.2018.1.126350

ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЕФЕКТИВНОСТІ СЕНСОРНИХ СТРУКТУР НА ОСНОВІ ГЛИБОКИХ КРЕМНІЄВИХ *p-n* ПЕРЕХОДІВ З АКТИВНИМИ ОБЛАСТЯМИ, ЯКІ МАЮТЬ РІЗНИЙ ТИП ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОВІДНОСТІ

О. В. Козинець

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Інститут високих технологій,
вул. Володимирська, 64, 01003, м. Київ, Україна, alk@univ.kiev.ua

ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЕФЕКТИВНОСТІ СЕНСОРНИХ СТРУКТУР НА ОСНОВІ ГЛИБОКИХ КРЕМНІЄВИХ *p-n* ПЕРЕХОДІВ З АКТИВНИМИ ОБЛАСТЯМИ, ЯКІ МАЮТЬ РІЗНИЙ ТИП ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОВІДНОСТІ

О. В. Козинець

Анотація Показано що ефективність сенсорних структур на основі “глибоких” кремнієвих *p-n* переходів може суттєво залежить від типу електричної провідності освітлюваної області. Принцип роботи таких структур полягає у зміні ефективної швидкості поверхневої рекомбінації внаслідок впливу локального електричного поля адсорбованої речовини на приповерхневий вигин зон та на параметри рекомбінаційних центрів. На підставі модельних розрахунків показано, що зміна корисного сигналу внаслідок адсорбції полярних молекул на робочій поверхні більша у випадку освітлення базової області *n*-типу провідності. Такі структури є більш перспективними для створення сенсорів із фотоелектричним принципом перетворення у порівнянні із структурами для яких використовують освітлення області із *p*-типом провідності.

Ключові слова: кремній, глибокий *p-n* перехід, поверхнева рекомбінація, сенсорна структура

**COMPARATIVE ANALYZE OF THE EFFICIENCY OF THE SENSOR STRUCTURES
BASED ON “DEEP” SILICON *p-n* JUNCTION WITH ACTIVE LAYERS OF DIFFERENT
ELECTRICAL CONDUCTIVITY TYPE**

A. V. Kozynets

Abstract. It is shown that efficiency of sensor structures based on deep silicon *p-n* junction significantly depends on the electrical conductivity type of the illuminated region. The structures can be effective in the case of polar molecules absorption. Based on numerical modeling results, it is established that the value of sensor signal can be greater in the case of illuminated region of *n*-type conductivity (base region). It means that such structures have more significant potential for construction of the sensors with photoelectrical transducer principle in comparison with structures that have active layer of *p*-type.

Keywords: silicon, deep *p-n* junction, surface recombination, sensor structure

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕНСОРНЫХ
СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ГЛУБОКИХ КРЕМНИЕВЫХ *p-n* ПЕРЕХОДОВ С
АКТИВНЫМИ ОБЛАСТЯМИ, КОТОРЫЕ ОБЛАДАЮТ РАЗНЫМИ ТИПАМИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ**

A. B. Козинец

Аннотация. Показано, что эффективность сенсорных структур на основе глубоких кремниевых *p-n* переходов существенно зависит от типа электрической проводимости освещаемой области. На основании численных расчетов показано, что изменение полезного сигнала при адсорбции полярных молекул на рабочей поверхности может возрастать в случае освещения базовой области перехода, которая имеет проводимость *n*-типа. Поэтому, такие структуры могут быть более перспективными для создания сенсоров с фотоэлектрическим принципом преобразования в сравнении со структурами в которых реализовано освещение области с проводимостью *p*-типа.

Ключевые слова: кремний, глубокий *p-n* переход, поверхностная рекомбинация, сенсорная структура

Вступ

Створення і розробка нових трансдюсерних систем є важливим завданням сучасної твердо тільної електроніки [1,2]. Одним із нових підходів до створення сенсорних структур із фотоелектричним принципом перетворення, поряд із добре вивченими структурами типу LAPS [3] (потенціометричний сенсор із світловою адресацією), є використання глибокого кремнієвого n - p переходу. В роботах [4,5] показано, що у випадку освітлення базової області структури світлом, яке сильно поглинається в при поверхневій області, фотострум суттєво залежить від рекомбінаційних характеристик робочої поверхні. Цей ефект можна математично формалізувати використовуючи поняття ефективної швидкості рекомбінації [4-6]. Зв'язок між зміною ефективної швидкості поверхневої рекомбінації та зміною зарядового стану робочої поверхні внаслідок адсорбції можна розглядати в рамках наближень теорії Стівенсона- Кейса, яка дозволяє взяти до уваги можливі зміни поверхневого вигину зон, концентрації, перерізів захоплення та енергетичного положення рівня рекомбінації [6]. Оскільки названі рекомбінаційні характеристики поверхні можуть суттєво змінюватись внаслідок адсорбції полярних молекул запропонована структура відкриває широкі можливості для створення нового класу сенсорів. Зокрема, відповідно до теоретичних міркувань, ефективна швидкість рекомбінації досягає максимального значення у випадку близьких приповерхневих концентрацій носіїв та різко спадає коли виникає дефіцит носіїв внаслідок зміни вигину зон. Характеристикою ефективності запропонованих сенсорних структур може бути відносна зміна фотоструму внаслідок зміни ефективної швидкості рекомбінації. Адсорбційна ефективність робочої поверхні в структурах може бути збільшена внаслідок створення тонких наноструктурованих шарів. З іншого боку експериментально продемонстровано придатність таких сенсорних структур з модифікованою робочою поверхнею для детекції карбонових нанотрубок у водному розчині сульфазолу чи створення складних сенсорних систем типу електронний ніс [4,5]. Зауважимо, що "рекомбінаційний сенсор" такого типу має більш просту структуру у по-

рівнянні з LAPS та дозволяє використовувати газові аналіти.

В роботі [4] обґрунтовано вибір оптимальної довжини дифузії, рівня та профілю легування в базовій області "глибокого" p - n переходу; зокрема показано, що товщина базової області повинна бути більша або близькою до довжини дифузії неосновних носіїв, профіль легування доцільно обирати рівномірним, більшій довжині дифузії відповідає вища ефективність сенсорної структури.

Як відомо, фотострум глибокого переходу залежить від співвідношення дифузійних потоків неосновних носіїв заряду в активній області, що виникають при освітленні. Ці потоки очевидно можуть суттєво різнитися для випадків коли їх створюють носії, які мають різні коефіцієнти дифузії (електрони, дірки). Тому, з точки зору сенсорного застосування, важливо оптимізувати також і тип електричної провідності базової області кремнієвого переходу. Критерієм такої оптимізації, як вже відзначалося, є можливість отримати більшу зміну корисного сигналу внаслідок адсорбції полярних молекул на робочій поверхні в сенсорній структурі. В запропонованій роботі на основі числових розрахунків ми оцінили та порівняли ефективність сенсорних структур з базовими областями p та n типу провідності. Для визначеності зауважимо, що розглядаються випадки освітлення кремнієвого переходу з боку базової області а саме: випадок а) базова область має n -тип провідності, емітерна область має p -тип провідності; випадок б) базова область має p -тип провідності, емітерна область має n -тип провідності. Отже, глибину переходу визначає товщина базової області. Отримані результати дозволяють сформулювати певні практичні рекомендації щодо конструктивних особливостей таких структур.

Модель

У конфігурації глибокого кремнієвого p - n переходу, фотострум може суттєво залежить від рекомбінаційних властивостей поверхні. Такі явища спостерігаються у випадку освітлення структури квантами світла із області сильного поглинання. Фізичною причиною "підвищеної" чутливості фотоструму до рекомбінаційних процесів є значне просторове роз-

ділення області поглинання світла та області вбудованого заряду переходу. Дійсно, коефіцієнт поглинання означених квантів $\alpha(\lambda)$ складає 10^5 - 10^3 см⁻¹, область поглинання поблизу освітлюваної поверхні $1/\alpha(\lambda)$ не перевищує кількох мкм; з іншого боку товщина базової області зазвичай складає десятків мкм. Таким чином, реєстрація змін наскрізного фотоструму переходу дозволяє отримувати інформацію про адсорбційні процеси на поверхні освітлюваної області. В рамках модельних уявлень, вплив адсорбції полярних молекул на ефективну швидкість поверхневої рекомбінації відбувається внаслідок дії локального електричного поля “дипольних молекулярних структур”. Такий вплив може змінювати приповерхневий вигин зон та рекомбінаційні параметри рівнів (або навіть системи рівнів з неперервним розподілом за енергією), які існують на поверхні. Зокрема, зміна приповерхневого вигину зон викликає зміни концентрацій носіїв поблизу поверхні, а тому може відбуватися перехід від режимів акумуляції або збіднення до режиму близьких значень концентрацій носіїв, що забезпечує максимальну швидкість рекомбінації (чи знавпаки). Експериментально показано, що зміни швидкості поверхневої рекомбінації s у випадку адсорбції полярних молекул на поверхні германію складають один два порядки. Наші дослідження свідчать, що зміни фотоструму в глибоких кремнієвих переходах внаслідок адсорбції полярних молекул води також можна описати змінами s що лежать в означеному діапазоні [8]. В подальших теоретичних розрахунках доцільно розглядати певний фіксований діапазон: початкове значення можна покласти $s_1 \sim 10^3$ см/с $s_2 \sim 10^5$ см/с.

Позначимо товщину базової області переходу (глибину переходу) символом d . Розрахуємо тепер відношення фотострумів для переходу із базовою областю з n -типом провідності у наближеннях низького рівня інжекції. Фотострум, який колектується з базової області можна записати у вигляді [7]

$$i_p(s) \cong \frac{e \cdot F \cdot \alpha \cdot l_p}{\alpha^2 \cdot l_p^2 - 1} \left[\frac{(s \cdot l_p / D_p) + \alpha \cdot l_p - \exp(-\alpha \cdot d) [(s \cdot l_p / D_p) \cdot ch(d/l_p) + sh(d/l_p)]}{(s \cdot l_p / D_p) \cdot sh(d/l_p) + ch(d/l_p)} - \alpha \cdot l_p \exp(-\alpha \cdot d) \right], \quad (1)$$

де D_p - коефіцієнт дифузії дірок l_p - довжина дифузії дірок F -густина потоку квантів. У випадку сильного поглинання $\alpha(\lambda)l \gg 1$, $\alpha(\lambda)d \gg 1$, величина загального фотоструму визначається поглинанням виключно у приповерхневому шарі, і з виразу (1) після деяких спрощень отримуємо:

$$i(s) \cong \frac{1 + \frac{S}{\alpha(\lambda)D_p}}{s \frac{l_p}{D_p} sh\left(\frac{d}{l_p}\right) + ch\left(\frac{d}{l_p}\right)}. \quad (2)$$

Таким чином для відношення фотострумів (ефективності сенсорної структури) маємо вираз:

$$\frac{i_p(s_1)}{i_p(s_2)} = \frac{1 + \frac{s_1}{\alpha(\lambda)D_p}}{s_1 \frac{l_p}{D_p} sh\left(\frac{d}{l_p}\right) + ch\left(\frac{d}{l_p}\right)} \cdot \frac{s_2 \frac{l_p}{D_p} sh\left(\frac{d}{l_p}\right) + ch\left(\frac{d}{l_p}\right)}{1 + \frac{s_2}{\alpha(\lambda)D_p}}. \quad (3)$$

У випадку, якщо базова область має p -тип провідності загальний фотострум переходу формують електрони, що є неосновними носіями. Отже, відношення струмів можна подати у вигляді аналогічному виразу (3) змінивши відповідні позначення коефіцієнта, довжини дифузії та позначення фотострумів. Таким чином отримуємо

$$\frac{i_n(s_1)}{i_n(s_2)} = \frac{1 + \frac{s_1}{\alpha(\lambda)D_n}}{s_1 \frac{l_n}{D_n} sh\left(\frac{d}{l_n}\right) + ch\left(\frac{d}{l_n}\right)} \cdot \frac{s_2 \frac{l_n}{D_n} sh\left(\frac{d}{l_n}\right) + ch\left(\frac{d}{l_n}\right)}{1 + \frac{s_2}{\alpha(\lambda)D_n}}. \quad (4)$$

Результати та обговорення

Розглянемо дві ідентичні сенсорні структури, з базовим областями p та n типу провідності. Припустимо спочатку, що довжини дифузії неосновних носіїв в базових областях таких структур однакові (або близькі за значенням). В загальному випадку довжина дифузії, коефіцієнт дифузії та час життя неосновних носіїв

пов'язані простим співвідношенням [7]

$$l_{n,p}^2 = D_{n,p} \tau_{n,p} \quad (5)$$

Час життя та дифузійна довжина неосновних носіїв, як відомо, залежать від інтенсивності рекомбінаційних процесів в об'ємі напівпровідникової пластини. В залежності від технологічних особливостей вирощування монокристалів кремнію та/або із збільшенням рівня легування, кількість об'ємних дефектів може зростати. Це збільшує рекомбінаційні втрати та веде до зменшення часу життя та дифузійної довжини неосновних носіїв. Відзначимо, для прикладу, що час життя в кремнієвих пластинках високої якості досягає десятків мкс, а довжина дифузії складає сотні мкм. Коефіцієнти дифузії D_n, D_p (та пов'язані співвідношеннями Ейнштейна рухливості μ_n, μ_p) також чутливі до наявності дефектів в пластині. Максимальні значення D_n та D_p для помірно легованих пластин різняться в 3 рази і складають $40 \text{ см}^2/\text{с}$ та $13 \text{ см}^2/\text{с}$ відповідно; однак ці величини можуть зменшуватися із збільшенням рівня легування пластини до $10^{18}\text{-}10^{19} \text{ см}^{-3}$ [7]. В подальших розрахунках ми будемо розглядати випадки помірного легування базової області ($10^{15}\text{-}10^{17} \text{ см}^{-3}$) переходу та максимальні значення коефіцієнтів дифузії. Отже, коли час життя дірок в базі n -типу в кілька разів більший ніж час життя електронів в базі p -типу, припущення щодо рівності довжин дифузії неосновних носіїв є цілком виправданим (див. (5)).

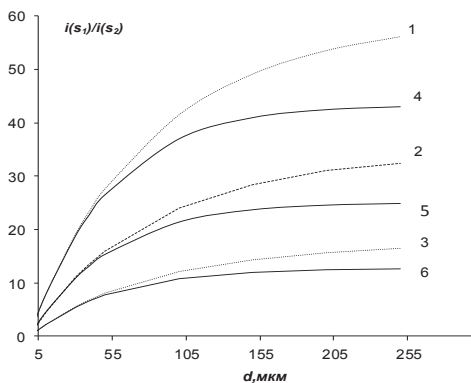


Рис. 1. Відношення фотострумів $i(s_1)/i(s_2)$ ($s_1 = 10^3 \text{ см/с}$, $s_2 = 10^5 \text{ см/с}$), у випадку базової області n -типу провідності як функція глибини переходу d . Довжини хвиль із області сильного поглинання $\lambda = 400 \text{ нм}$ – криві 1,4; $\lambda = 520 \text{ нм}$ – крива 2,5; $\lambda = 620 \text{ нм}$ – крива 3,6, довжина дифузії дірок 1,2,3 – 200 мкм, довжина дифузії дірок 4,5,6 – 100 мкм.

На рис.1, 2 показано серії кривих $i(s_1)/i(s_2) = f(d)$, які розраховано для кількох довжин хвиль із області сильного поглинання за формулами (3) та (4).

Відзначимо спочатку, що для кожної окремої кривої, максимальне значення $i(s_1)/i(s_2)$ лежить в області насичення та відповідає довжині дифузії неосновних носіїв. Іншими словами, в усіх випадках, глибину переходу d доцільно обирати не меншою ніж довжина дифузії неосновних носіїв. Як впливає з аналізу отриманих даних, більший сенсорний сигнал можна отримати для структури з базовою областю n -типу провідності. Це легко бачити обравши деяке фіксоване значення глибини переходу d з області насичення відповідних кривих на рис.1,2. Зростання сенсорного сигналу виявляється більш виражено у випадку збільшення локалізації фото генерованих носіїв поблизу поверхні, тобто коли довжина хвилі освітлення зменшується. Можна констатувати, що коли коефіцієнт поглинання зростає ($\lambda = 400 \text{ нм}$, 520 нм - криві 1, 4, 2, 5), відношення фотострумів $i(s_1)/i(s_2)$ зростає приблизно у півтора-два рази. У випадку менших значень коефіцієнта поглинання ($\lambda = 620 \text{ нм}$ (криві 3,6)) та більш рівномірного профілю фото генерації, суттєвої різниці у величинах $i(s_1)/i(s_2)$, отриманих для структур з базовими областями p та n типу провідності, не спостерігається.

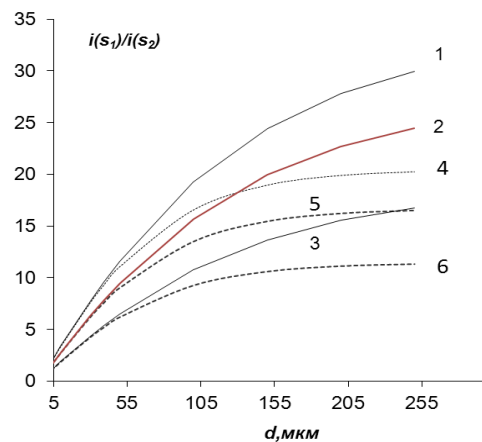


Рис. 2. Відношення фотострумів $i(s_1)/i(s_2)$ ($s_1 = 10^3 \text{ см/с}$, $s_2 = 10^5 \text{ см/с}$), у випадку базової області p -типу провідності як функція глибини переходу d . Довжини хвиль із області сильного поглинання $\lambda = 400 \text{ нм}$ – криві 1,4; $\lambda = 520 \text{ нм}$ – крива 2,5; $\lambda = 620 \text{ нм}$ – крива 3,6, довжина дифузії електронів 1,2,3 – 200 мкм, довжина дифузії електронів 4,5,6 – 100 мкм.

Розглянемо більш детально особливості виникнення фотоструму в сенсорних структурах даного типу. Концентрація носіїв поблизу області просторового заряду завжди близька до нуля внаслідок дії вбудованого електричного поля. Концентрація носіїв поблизу освітлюваної поверхні залежить від інтенсивності рекомбінаційних процесів на поверхні та коефіцієнта поглинання для заданої довжини хвилі із області сильного поглинання. Просторовий розподіл носіїв в базовій області, таким чином, виникає в результаті дії двох протилежно направлених дифузійних потоків: до освітлюваної поверхні та до області просторового заряду. Фотострум “глибокого” переходу залежить від форми просторового розподілу носіїв в тому сенсі, що просторовий розподіл задає градієнт концентрації носіїв поблизу області просторового заряду. Як вже відзначалося, зміни фотоструму можуть бути більш суттєвими саме у випадку використання базової області *n*-типу провідності. Такий результат можна пояснити тим, що дифузійні потоки дірок формують просторові розподіли носіїв $p(x)$ із більш суттєвою зміною градієнта dp/dx поблизу області просторового заряду.

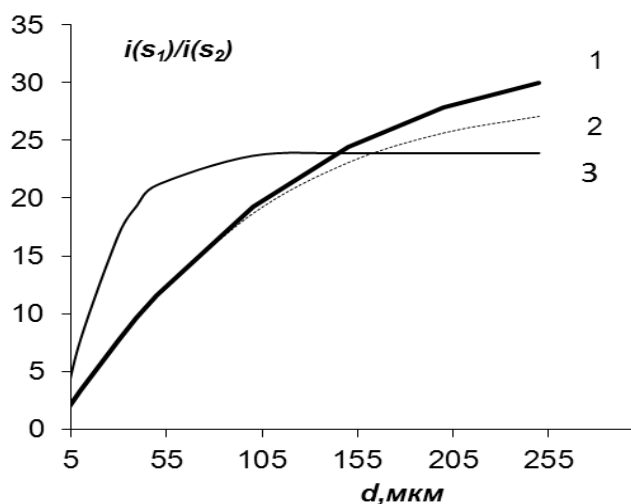


Рис.3. Відношення фотострумів $i(s_1)/i(s_2)$ ($s_1 = 10^3$ см/с $s_2 = 10^5$ см/с), як функція глибини переходу d , довжина хвилі $\lambda = 400$ нм; крива 1 - базова область *p*-типу провідності, довжина дифузії дірок 200 мкм; крива 2 - базова область *p*-типу провідності, довжина дифузії дірок 160 мкм; крива 3 - базова область *n*-типу провідності, довжина дифузії електронів 50 мкм.

Як показують наші розрахунки, коли для сенсорних структур дифузійні довжини в базових областях різняться суттєво (більш ніж в 2-3 рази), вибір типу провідності вже не має вирішального значення для підвищення ефективності. Така ситуація можлива, наприклад, у випадку близьких значень часу життя неосновних носіїв, див. (5). Результати розрахунків залежностей $i(s_1)/i(s_2) = f(d)$ проілюстровано на рис.3. В означеному випадку доцільно обрати перехід з більшою довжиною дифузії неосновних носіїв в базовій області, оскільки такий вибір дозволяє отримати більшу величину $i(s_1)/i(s_2)$. Зауважимо, що як і в попередньому випадку, отримання максимальної ефективності можливо тільки, якщо глибина переходу близька до довжини дифузії [5].

Оскільки очікуваний діапазон змін фотоструму внаслідок адсорбції полярних молекул визначає перспективи використання сенсорної структури, а також перспективи її подальшої модифікації, прості міркування наведені в роботі, дозволяють сформулювати основні підходи до вибору параметрів глибоких переходів з різним типом провідності базової області. Запропоновані результати можуть бути використані для практичної розробки фотоелектричних сенсорних структур із тонкими шарами оксидів, або шарами наноструктурованих матеріалів на робочій поверхні [8].

Висновки

Показано, що одним з важливих факторів збільшення ефективності сенсорних структур на основі “глибоких” кремнієвих *p-n* переходів є вибір типу провідності активної області. Цей фактор набуває суттєвого значення, коли структури мають близькі значення довжини дифузії неосновних носіїв в базових областях. Так, у випадку якщо базова область переходу має *n*-тип провідності, сенсорний сигнал можна збільшити вдвічі у порівнянні із структурою базова область якої має провідність *p*-типу. Якщо ж довжини дифузії в структурах з різним типом провідності різняться суттєво (2-3 рази), доцільно обирати глибокий перехід із більшою довжиною дифузії неосновних носіїв. В усіх випадках глибина переходу повинна бути не меншою ніж довжина дифузії.

Список використаної літератури

[1]. L. Ristic. *Sensor Technology and Devices*. Artech House, Boston. 540 p (1994).

[2]. V. A. Skryshevsky. Porous Si Structures for Gas, Vapor and Liquid Sensing (In: *Comprehensive Guide for Mesoporous Materials, Volume 3: Properties and Development*, Ed. Mahmood Aliofkhaeaei, Nova Science Publishers Inc. pp. 123-146, (2015)).

[3]. T. Wagner, M. J. Schöning. Light addressible potentiometric sensors (LAPS) recent trend and application // *Electrochemical Sensor Analysis* 49 (87), pp. 87-128 (2007).

[4]. A. I. Manilov, A. V. Kozinetz, I. V. Gavrilchenko, Y. S. Milovanov, T. M. Mukhamedzhanov, S. A. Alekseev, M. Al Arami, S. V. Litvinenko, A. Rozhin, V. A. Skryshevsky. Photoelectric signal conversion in deep

p-n junction for detection of carbon nanotubes with adsorbed SDBS in aqueous solution // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. V. 9 (4). pp 04020(1-6) (2017).

[5]. A. V. Kozinetz, S. V. Litvinenko, V. A. Skryshevsky. Physical Properties of Silicon Sensor Structures with Photoelectric Transformation on the Basis of “Deep” p–n-Junction// *Ukrainian journal of physics/* 62(4), pp 318-325(2017).

[6]. A. V. Sachenko, O. V. Snitko. Foteoeffekti v pripovernostnix sloyax poluprovodnikov. *Naukova dumka*. K. 450s. (1984).

[7]. S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*. Wiley, New York. 814p (1981).

[8]. S. V. Litvinenko, A. V. Kozinetz, V. A. Skryshevsky. Concept of photovoltaic transducer on a base of modified p-n junction solar cell// *Sensor and Actuator A: Physical*, 224, pp. 30-35 (2015).

PACS 73.20, UDC 621.383

DOI 10.18524/1815-7459.2018.1.126350

COMPARATIVE ANALYZE OF THE EFFICIENCY OF THE SENSOR STRUCTURES BASED ON “DEEP” SILICON *p-n* JUNCTION WITH ACTIVE LAYERS OF DIFFERENT ELECTRICAL CONDUCTIVITY TYPE

A. V. Kozynets

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of High Technologies Volodymyrska Street 64, 01003, Kyiv, Ukraine, alk@univ.kiev.ua

Summary

The “recombinational” sensor has more simple construction than traditional LAPS and potentially it can be applied not only for liquid analyt but for gas analyt also. Moreover this structure has some potential for application in complex sensor system like electronic nose.

The aim of this work is optimization of sensor structure based on “deep” silicon p-n junction with photoelectrical transducer principle in the sense of the choice of base region conductivity type. Optimization criterion is possibility to have more changes of sensor signal (photocurrent through p-n junction) due to polar molecules absorption that corresponds to surface recombination changes.

The original method based on photocurrent ratio analyze is proposed to evaluate the sensor efficiency in our work. It is shown that efficiency of sensor structures based on “deep” silicon p-n junction depends on the electrical conductivity type of the illuminated region. The cases of equal and different values of diffusion lengths were analyzed. The choice of conductivity type is especially important in the first case. Based on numerical modeling results, it is established that the value of sensor signal can

be greater in the case of illuminated region of n-type conductivity. The sensor signal can be increased in 2 time. If the diffusion lengths in the identical sensor structures differ from each other significantly, the choice can be relaxed. It is expediently to take the junction with greater diffusion length of minority carriers.

Keywords: silicon, deep *p-n* junction, surface recombination, sensor structure

PACS 73.20, УДК 621.383

DOI 10.18524/1815-7459.2018.1.126350

ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЕФЕКТИВНОСТІ СЕНСОРНИХ СТРУКТУР НА ОСНОВІ ГЛИБОКИХ КРЕМНІЄВИХ *p-n* ПЕРЕХОДІВ З АКТИВНИМИ ОБЛАСТЯМИ, ЯКІ МАЮТЬ РІЗНИЙ ТИП ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОВІДНОСТІ

О. В. Козинець

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Інститут високих технологій,
вул. Володимирська, 64, 01003, м. Київ, Україна, alk@univ.kiev.ua

Реферат

Дослідження та розробка сенсорних структур із новими принципами перетворення впливу адсорбції молекул аналіту в корисний сигнал є актуальною задачею. На відміну від структур типу LAPS “рекомбінаційний сенсор” має більш просту конструкцію та, потенційно, більш широку область застосування.

Метою роботи є оптимізація сенсорних структур на основі глибокого кремнієвого переходу з фотоелектричним принципом перетворення, а саме вибір оптимального типу провідності базової області. Критерієм такої оптимізації є можливість отримати більші зміни корисного сигналу (більші зміни наскрізного фотоструму через перехід) внаслідок адсорбції полярних молекул та відповідної зміни швидкості поверхневої рекомбінації.

В роботі запропоновано методику для оцінки ефективності сенсорної структури на основі аналітичних наближень для фотоструму. Показано, що ефективність сенсорних структур на основі глибоких кремнієвих *p-n* переходів може суттєво залежити від типу електричної провідності освітлюваної області. Проаналізовано випадки коли довжини дифузії в освітлюваних областях близькі або різняться за величиною. В першому випадку вибір типу провідності може мати важливе значення. На підставі модельних розрахунків отримано, що зміна корисного сигналу внаслідок адсорбції на робочій поверхні більша у випадку використання освітлюваної області *n*-типу провідності. Таким чином можна збільшити корисний сигнал структури приблизно у 2 рази. Можна припустити, що означені структури є більш перспективними для створення сенсорів із фотоелектричним принципом перетворення. Якщо ж довжини дифузії в ідентичних структурах з різним типом провідності базової області різняться суттєво (2-3 рази), вибір типу провідності вже не має критичного значення. В такому випадку доцільно обирати глибокий перехід із більшою довжиною дифузії неосновних носіїв.

Ключові слова: кремній, глибокий *p-n* перехід, поверхнева рекомбінація, сенсорна структура

ОПТИЧНІ, ОПТОЕЛЕКТРОННІ І РАДІАЦІЙНІ СЕНСОРИ

OPTICAL AND OPTOELECTRONIC AND RADIATION SENSORS

УДК 537.226.82; 621.317.78

DOI 10.18524/1815-7459.2018.1.126351

ПОРТАТИВНИЙ ПІРОЕЛЕКТРИЧНИЙ ВИМІРЮВАЧ ПОТУЖНОСТІ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Л. В. Леваш, О. А. Росновський, В. Б. Самойлов

Інститут фізики НАН України, 46 пр. Науки, Київ, 03028. Тел.: (38044)525-7952,
e-mail: samoylov@iop.kiev.ua

ПОРТАТИВНИЙ ПІРОЕЛЕКТРИЧНИЙ ВИМІРЮВАЧ ПОТУЖНОСТІ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Л. В. Леваш, О. А. Росновський, В. Б. Самойлов

Анотація. Описані конструкція, принцип дії і основні характеристики портативного піроелектричного вимірювача середньої потужності безперервного і імпульсно-періодичного лазерного випромінювання в діапазоні від 2 мВт до 2 Вт. Вимірювач складається з приймальної голівки, розташованої в металевому корпусі, і блоку індикації, розташованому в пластмасовому корпусі. Приймальна голівка містить електромеханічний модулятор, піроелектричний приймач випромінювання і узгоджуючий підсилювач. Чутливий елемент з танталату літія з поглинаючим покриттям забезпечує неселективність приладу в спектральному діапазоні 0,25...12 мкм.

Ключові слова: лазерне випромінювання, вимірювач потужності, піроелектричний приймач

PORTABLE PYROELECTRIC POWER METER OF LASER RADIATION

L. V. Levash, O. A. Rosnovskiy, V. B. Samoylov

Abstract. A construction, principle of operation and basic parameters of portable pyroelectric measuring device of average power of continuous and impulsively-periodic laser radiation in the range from 2 mW to 2 W are described. A measuring device consists of the receiving head, located in a metallic housing, and block of indication, located in a plastic housing. The receiving head contains an electromechanical modulator, pyroelectric sensor of radiation and preliminary amplifier. Sensitive element made of lithium tantalate with absorptive coating provides nonselectivity of device in the spectral range of 0.25-12 μm .

Keywords: laser radiation, power meter, pyroelectric sensor

ПОРТАТИВНЫЙ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Л. В. Леваш, О. А. Росновский, В. Б. Самойлов

Аннотация. Описаны конструкция, принцип действия и основные характеристики портативного пирозлектрического измерителя средней мощности непрерывного и импульсно-периодического лазерного излучения в диапазоне от 2 мВт до 2 Вт. Измеритель состоит из приемной головки, расположенной в металлическом корпусе, и блока индикации, расположенном в пластмассовом корпусе. Приемная головка содержит электромеханический модулятор, пирозлектрический приемник излучения и согласующий усилитель. Чувствительный элемент из танталата лития с поглощающим покрытием обеспечивает неселективность прибора в спектральном диапазоне 0,25...12 мкм.

Ключевые слова: лазерное излучение, измеритель мощности, пирозлектрический приемник

Дана робота є продовженням розробок в галузі метрології енергетичних параметрів оптичного випромінювання. В даний час в Україні для вимірювання енергії і потужності випромінювання використовують або дороге сучасне устаткування провідних зарубіжних фірм таких, як наприклад COHERENT, Ophir-Spiricon, або, набагато частіше – також дорогі, морально і фізично застарілі колишні радянські, а зараз російські вимірювальні прилади, розроблені в 70 – 80-х роках минулого сторіччя, на основі термоелектричних приймачів

випромінювання. Найістотнішим недоліком останніх є те, що в них для забезпечення неселективності в широкому спектральному діапазоні використовуються термоелектричні приймачі випромінювання, з достатньо масивним поглинаючим елементом, який у свою чергу відокремлений від приймача – термоелектричної батареї. Це приводить до неприпустимо великої (до кількох хвилин) сталою часу вимірювального пристрою, що у свою чергу істотно ускладнює юстирування інфрачервоної оптичної системи.

Вимірювачі на основі піроелектричного ефекту мають суттєво меншу сталу часу, що забезпечує їм належне місце в ряді вимірювачів потужності випромінювання [1 – 4]. На рубежі 80-90-х років в Інституті фізики НАН України був розроблений піроелектричний ватджоульметр ПВДЦ-2, що істотно перевершував існуючі аналоги як за швидкодією, так і за чутливістю. Прилад був внесений до Державного Реєстру засобів вимірювання СРСР. Його серійне виробництво було організовано на одному із заводів Держстандарту в місті Вільнюс, але було припинено після 1991 р.

Метою роботи було створення малогабаритного, дешевого вимірювача середньої потужності безперервного і імпульсно-періодичного випромінювання, більш простого у порівнянні з приладом ПВДЦ-2, але такого, що має необхідні похибкові характеристики.

Зовнішній вигляд піроелектричного ватметра ВП-1 подано на Рис. 1., а його структурну схему – на Рис. 2. Конструктивно вимірювач складається з приймальної голівки, розташованої в металевому корпусі, та блоку індикації, розташованому в пластмасовому корпусі. Приймальна голівка містить електромеханічний модулятор чашкообразного типу (Рис. 3), призначений для перетворення безперервного випромінювання у змінне з частотою 20 Гц, піроелектричний приймач випромінювання і узгоджувач підсилювач. Піроелектричний чутливий елемент являє собою пластину з танталату літія з напиленими електродами, напаяну на мідний тепловідвод, та з поглинаючим покриттям, яке забезпечує неселективність приладу в спектральному діапазоні 0,25...12 мкм. Пучок випромінювання проходить через захисне вікно, виконане з фтористого барію, і потрапляє на модулятор. З приймальної голівки, посилений сигнал поступає у блок індикації, який складається з блоку живлення, блоку калібрування і вольтметра.



Рис. 1. Зовнішній вигляд піроелектричного вимірювача потужності випромінювання ВП-1.

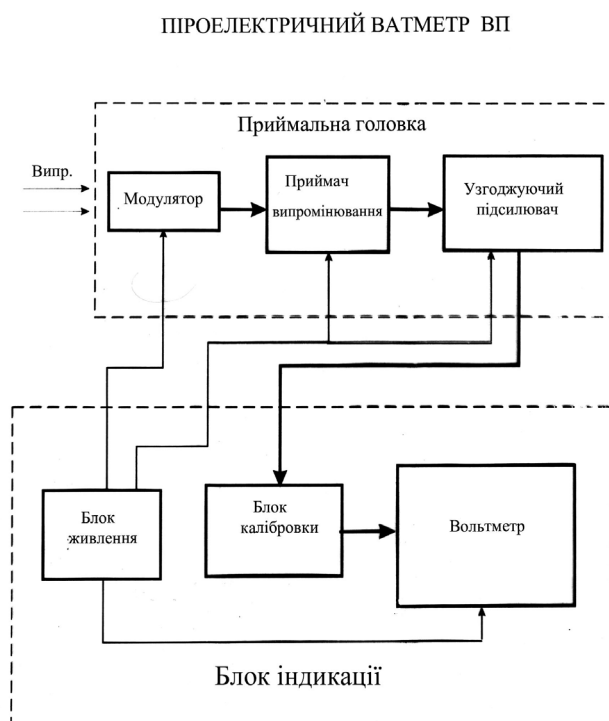


Рис. 2. Структурна схема ватметра ВП.

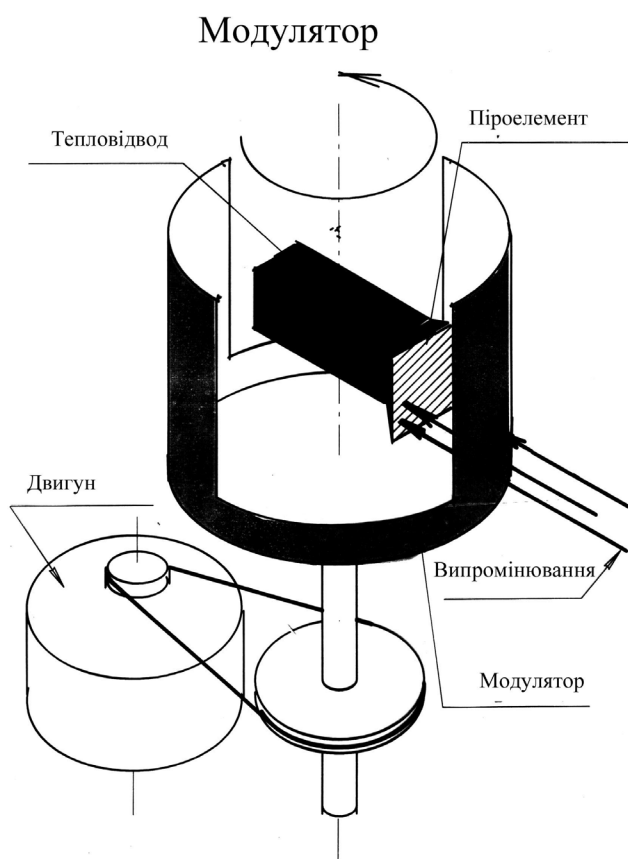


Рис. 3. Зовнішній вигляд модулятора.

Ватметр працює як з живленням від мережі 220 В, так і з автономним живленням від аку-

муляторної батареї, ресурсу роботи якої вистачає на 8 годин безперервної експлуатації. Блок живлення забезпечує стабілізованою напругою усі електронні вузли і двигун модулятора. У блоці калібрування відбувається нормування сигналу за рівнем. Після нормування сигнал поступає на цифровий вольтметр з межею виміру 200 мВ. Шкала приладу проградуєвана у міліватах, що забезпечує зручність відліку вимірюваної потужності випромінювання.

Прилад є робочим засобом виміру потужності потоків випромінювання в широкому спектральному діапазоні, який складає 0,25...12 мкм. Діапазон виміру потужності складає від 2 мВт до 2 Вт і розбитий на два піддіапазони - до 200 мВт і до 2 Вт. Вибір такого діапазону виміру пов'язаний з наявністю в експлуатації великого числа напівпровідникових і газових лазерів що мають відповідний діапазон потужності випромінювання. Діаметр пучка випромінювання може змінюватись від 2 до 8 мм, що прийнятно для більшості вживаних нині лазерів.

Параметри піроелектричного ватметра ВП-1 і деяких інших засобів вимірювання, які зараз використовуються, наведені в табл. 1. Слід відмітити, що неможливо створити універсальний сенсор, призначений для роботи в усьому діапазоні потужностей випромінювання. В описаному вище приладі, який пра-

Табл. 1

Параметри діючих ватметрів лазерного випромінювання

Назва приладу		ИМО-2	ИМО-4	ПВЦ-2	ВП-1	RM9
Параметр	Одиниця виміру	Калориметричний	Калориметричний	Піроелектричний	Піроелектричний	Піроелектричний
Вимірювана потужність	Вт	$10^{-3}...10$	$10^{-4}...10$	$10^{-6}...2$	$2 \cdot 10^{-3}...2$	$10^{-7}...10^{-1}$
Час одного вимірювання	с	150	12	0,5	0,5	3,5 ^(а)
Основна похибка	%	± 5	± 10	± 5	± 7	± 5 ^(б)
Маса	кг	35	2	9	0,7	0,37 ^(с)
Габарити	см	38x15x41 17x19x26	7 x 7 x 7 26x 18 x 7	8x8x21 16x16x 30 32x31x 15	9x20x 6 4x 6x 6	

^(а) З синхронним детектором.

^(б) В спектральному діапазоні 0,5 – 1,1 мкм. На інших довжинах хвиль присутні додаткові похибки: в діапазоні < 0,5 мкм додається ± 8%, в діапазоні 1,1 – 3,0 мкм додається ± 5%, на 10,6 мкм додається ± 15% [5].

^(с) Без модулятора та блоку індикації.

цює у діапазоні середніх потужностей, щоб уникнути перегріву та термічної деструкції чутливого елемента, останній розміщено на масивному тепловідводі. У вимірювачів малих потужностей, таких як наприклад RM9 фірми Ophir-Spiricon використовуються термоізолявані чутливі елементи з мінімальними тепловтратами.

За своїми параметрами піроелектричний ватметр придатний для роботи в дослідних лабораторіях, на виробництві та в медичних закладах. Використання танталату літія вітчизняного виробництва як матеріалу для чутливого елемента забезпечило підвищення стабільності і чутливості приладу, а використання модулятора чашкообразного типу дозволило об'єднати модулятор і приймальну голівку в один блок, що вигідно відрізняє цей прилад від його аналогів.

Прилад ВП-1 пройшов Державну метрологічну атестацію в Національному науковому центрі України «Інститут метрології» і допущений до застосування в якості робочого за-

собу вимірювальної техніки.

Список використаної літератури

- [1]. M. E. Lines, A. M. Glass, Principles and application of ferroelectrics and related materials, Clarendon Press, Oxford, 650 p. (1977).
- [2]. V. F. Kosorotov, L. S. Kremenchugskiy, V. B. Samoylov, and L. V. Shchedrina, Pyroelectric effect and its practical applications. Naukova Dumka, Kiev, 324 p. (1989) (in Russian).
- [3]. V. B. Samoilo, Y. S. Yoon, D. I. Kim, Responsivity of four-layer pyroelectric detectors// Journ. Korean Phys. Soc. , v. 30, pp. 632 – 636 (1997).
- [4]. Y. S. Yoon, V. B. Samoilo, S. V. Kletsky, Dynamic response analysis of pyroelectric sensitive element for thermal imaging // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Control, v. 50, No4, pp. 461 – 465 (2003)
- [5]. RM9 Pyro Radiometer Datasheet http://www.ophiropt.com/laser--measurement/sites/default/files/RM9_RM9-THz_RM9-PD.pdf

UDC 537.226.82; 621.317.78

DOI 10.18524/1815-7459.2018.1.126351

PORTABLE PYROELECTRIC POWER METER OF LASER RADIATION

L. V. Levash, O. A. Rosnovskiy, V. B. Samoylov

Institute of Physics, NAS of Ukraine, 46 Nauki av, Kyiv

Summary

The aim of the work was to develop simple portable pyroelectric measuring device of average power of continuous and impulsively-periodic laser radiation in the range from 2 mW to 2 W. The measuring device consists of the receiving head located in a metallic housing, and block of indication, located in a plastic housing. The receiving head contains an electromechanical chopper-modulator of the cylinder-type form, intended for converting of continuous radiation flux into variable one with frequency of 20 Hz, pyroelectric sensor of radiation and preliminary amplifier. Sensitive element made of lithium tantalate is located on the massive copper heat sink. The thick-film absorptive coating provides nonselectivity of device in the spectral range of 0.25-12 μm . Block of indication consists of the power supply unit, block of calibration and voltmeter module. Use of lithium tantalate as a material for sensitive element provides the increase of stability and sensitivity of the device. The implementa-

tion of the cylindrical chopper makes it possible to combine the block of modulation and receiving head into a single unit in distinction to existing devices.

Pyroelectric wattmeter WP-1 was tested in the National Scientific Center “Institute of metrology” and admitted to application as a working measuring instrument. Under main parameters it compares favorably with currently available power meters of laser radiation.

Keywords: laser radiation, power meter, pyroelectric sensor

УДК 537.226.82; 621.317.78

DOI 10.18524/1815-7459.2018.1.126351

ПОРТАТИВНИЙ ПІРОЕЛЕКТРИЧНИЙ ВИМІРЮВАЧ ПОТУЖНОСТІ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Л. В. Леваш, О. А. Росновський, В. Б. Самойлов

Інститут фізики НАН України, 46 пр. Науки, Київ, 03028

Реферат

Метою роботи було створення простого, портативного піроелектричного вимірювача середньої потужності безперервного і імпульсно-періодичного лазерного випромінювання в діапазоні від 2 мВт до 2 Вт придатного для роботи в дослідних лабораторіях, на виробництві та в медичних закладах. Вимірювач складається з приймальної голівки, розташованої в металевому корпусі і блоку індикації, розташованому в пластмасовому корпусі. Приймальна голівка містить електромеханічний модулятор, призначений для перетворення безперервного випромінювання у змінне з частотою 20 Гц, піроелектричний приймач випромінювання, узгоджуючий підсилювач і захисне вікно з фтористого барію, яке забезпечує пропускання випромінювання у заданому спектральному діапазоні. Піроелектричний чутливий елемент з танталату літія розташований на масивному мідному тепловідводі розміщується в середині циліндричного модулятора. Товстоплівкове поглинаюче покриття забезпечує неселективність приладу в спектральному діапазоні 0,25...12 мкм. Блок індикації складається з блоку живлення, блоку калібрування і вольтметра. Використання танталату літія вітчизняного виробництва як матеріалу для чутливого елемента забезпечує підвищення стабільності і чутливості приладу, а використання модулятора чашкообразного типу дозволило об'єднати модулятор і приймальну голівку в один блок, що вигідно відрізняє цей прилад від його аналогів.

Піроелектричний ватметр ВП-1 пройшов Державну метрологічну атестацію в Національному науковому центрі України «Інститут метрології» і допущений до застосування в якості робочого засобу вимірювальної техніки. За своїми основними параметрами він знаходиться на рівні сучасних вимірювачів потужності лазерного випромінювання.

Ключові слова: лазерне випромінювання, вимірювач потужності, піроелектричний приймач

ОПТИЧНІ, ОПТОЕЛЕКТРОННІ І РАДІАЦІЙНІ СЕНСОРИ

OPTICAL AND OPTOELECTRONIC AND RADIATION SENSORS

УДК 621.315.592

DOI 10.18524/1815-7459.2018.1.126352

БЕЗКОНТАКТНІ ОПТИЧНІ ТЕРМОСЕНСОРИ НА ОСНОВІ МОНОКРИСТАЛУ



В. В. Галян, І. А. Іващенко, А. Г. Кевшин, І. Д. Олексеюк, А. П. Третяк, П. В. Тищенко

Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки, Луцьк
halyanv@ukr.net, kevshin_a@ukr.net, inna.ivashchenko05@gmail.com, olekseyk@eenu.edu.ua,
tyrokvv54@gmail.com, krsh_2@ukr.net

БЕЗКОНТАКТНІ ОПТИЧНІ ТЕРМОСЕНСОРИ НА ОСНОВІ МОНОКРИСТАЛУ



В. В. Галян, І. А. Іващенко, А. Г. Кевшин, І. Д. Олексеюк, А. П. Третяк, П. В. Тищенко

Анотація. Методом розчину-розплаву у вертикальній двозонній печі вирошено монокристал $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$. В спектрі оптичного поглинання монокристалу $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$ ідентифіковано максимуми, що відповідають переходам в 4f оболонці іонів Ербію. Досліджено спектри фотолюмінесценції за температури 150, 200, 250, 300 К при збудженні лазером із довжиною хвилі 980 нм. Зафіксовано, що максимуми випромінювання (805, 1540 нм) не змінюють положення та форму при зміні температури. На основі діаграми енергетичних рівнів в Er^{3+} іонах встановлено механізм випромінювання, а також пояснено зростання інтегральної інтенсивності фотолюмінесценції при збільшенні температури. Обчислено чутливість максимумів випромінювання монокристалу $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$ від температури.

Ключові слова: термосенсор, фотолюмінесценція, кросрелаксація, поглинання

NON-CONTACT OPTICAL THERMAL SENSORS BASED ON $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$ SINGLE CRYSTALS

V. V. Halyan, I. A. Ivashchenko, A. H. Kevshyn, I. D. Olekseyuk, A. P. Tretyak, P. V. Tishchenko

Abstract. The $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$ single crystal was grown in a vertical two-zone furnace by a solution-melt method. In the optical absorption spectrum of the obtained single crystal $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$ the maxima corresponding to transitions in the 4f shell of Erbium ions were identified. The spectra of photoluminescence were investigated at temperatures of 150, 200, 250, 300 K and at laser excitation with a wavelength of 980 nm. The radiation maxima (805, 1540 nm) do not change their position and form when temperature changes. On the basis of the diagram of energy levels of the Er^{3+} ions, the mechanism of radiation is established, and the growth of the integral intensity of the photoluminescence according to increasing temperature is explained. The sensitivity of the radiation maxima of the $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$ single crystal from temperature is calculated.

Keywords: thermosensor, photoluminescence, cross-relaxation, absorption

БЕСКОНТАКТНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ТЕРМОСЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ МОНОКРИСТАЛЛА $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$

В. В. Галян, И. А. Иващенко, А. Г. Кевшин, И. Д. Алексеюк, А. П. Третьяк, П. В. Тищенко

Аннотация. Методом выращивания из раствора-расплава в вертикальной двухзонной печи получено монокристалл $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$. В спектре оптического поглощения монокристалла $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$ идентифицировано максимумы, соответствующие переходам в 4f оболочке ионов Эрбия. Исследованы спектры фотолюминесценции при температуре 150, 200, 250, 300 К при возбуждении лазером с длиной волны 980 нм. Зафиксировано, что максимумы излучения (805, 1540 нм) не меняют положения и форму при изменении температуры. На основе диаграммы энергетических уровней в Er^{3+} ионах установлен механизм излучения, а также объяснено рост интегральной интенсивности фотолюминесценции при увеличении температуры. Рассчитано чувствительность максимумов излучения монокристалла $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$ от температуры.

Ключевые слова: термосенсор, фотолюминесценция, кросрелаксация, поглощение

ВСТУП

Отримання нових матеріалів і дослідження їх властивостей є одним із основних напрямків сучасного матеріалознавства. Введення до бінарних, тернарних сполук [1-3] легуючих домішок, зокрема рідкісноземельних металів [4-6], створює передумови для виготовлення активних і пасивних середовищ в лазерній техніці та телекомунікаціях. Особливу увагу науковці приділяють властивостям кристалічних та аморфних середовищ, які здатні стабільно проявляти фотолюмінесценцію (ФЛ) високої інтенсивності та нелінійно-оптичні властивості [7, 8]. Для дослідження сцинтиляційних матеріалів, в якості активаторів легуючої домішки, часто слугують рідкісноземельні метали Ce, Nd, Pr, Er [9, 10, 15].

Крім того, останнім часом, в сучасному промисловому виробництві оптоелектронної техніки активно досліджуються і впроваджуються високоточні термічні сенсори, вимірювання в яких базується на чутливості фотолюмінесцентного випромінювання до температурних змін. Проте, мало уваги приділяється вивченню взаємного впливу механізмів релаксації іонів ербію та кросрелаксаційних процесів при зміні інтенсивності люмінесценції в різних температурних інтервалах. Такі дослідження дозволять оптимізувати вибір компонентного складу для отримання ефективних люмінесцентних матеріалів при виготовленні безконтактних оптичних термосенсорів.

В наших попередніх дослідженнях [16] в системі $Ga_2S_3 - In_2S_3$ зафіксовані дві потрійні сполуки: $GaInS_3$ та $Ga_{0.7}In_{1.3}S_3$. Сполука $GaInS_3$ утворюється по перитектичній реакції $L + In_2S_3 \leftrightarrow GaInS_3$ при 1190 К, кристалізується в гексагональній сингонії, пр. гр. $R\bar{6}_7$, $a = 0.6655(4)$ нм, $c = 1.7950(3)$ нм, володіє областю гомогенності, яка при 820 К складає 47-57 мол.% In_2S_3 .

Крім того, X-променевою фотоелектронною спектроскопією ми дослідили внутрішні оболонки і валентну зону для вихідного і бомбардованого іонами Ag поверхні монокристалу $(Ga_{54.59}In_{44.66}Er_{0.75})_2S_{300}$ [17]. Виявлено, що цей монокристал був радіаційно стійкий по відношенню до Ag-іонного бомбардування. Зокрема, така обробка не викликає яких-небудь істотних змін значень енергій зв'язку електронів із внутрішніх оболонок, а також

форми рентгенівських фотоелектронних спектрів (XPS) на рівні внутрішніх оболонок і валентної зони монокристалу. В роботі [17] вважається, що введення Ербію в решітку $(Ga_{55}In_{45})_2S_{300}$ не приводить до значних змін в особливостях хімічного зв'язку вихідного (не-легованого Ербієм) монокристалу.

Метою цієї роботи є дослідження люмінесцентних властивостей монокристалу $(Ga_{54.59}In_{44.66}Er_{0.75})_2S_{300}$ в різних температурних інтервалах, встановлення механізму випромінювання, а також визначення чутливості оптичного термосенсору перспективного в оптоелектронній техніці.

СИНТЕЗ СПЛАВІВ, МЕТОДИКА ТА ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Ми отримали монокристал $(Ga_{54.59}In_{44.66}Er_{0.75})_2S_{300}$ методика та умови отримання якого підібрані з діаграми стану системи $Ga_2S_3 - In_2S_3$ та термограми охолодження зразка, по якій визначали температуру переохолодження. Використали розчин-розплавний метод, переохолодження розчину-розплаву становило 70 К. Синтез вихідного сплаву при максимальній температурі 1200 К та ріст кристалу проводили в одному вакуумному кварцовому контейнері з дном у вигляді конуса і перетяжкою з діаметром отвору 2 мм. Процес росту проходив у вертикальній двозонній печі. Максимальна температура становила 1200 К, градієнт температури на фронті кристалізації складав 20 К/см. Після розплавлення шихти, ампулу опускали з максимальною швидкістю. Після кристалізації 10 мм розплаву, по довжині ампули, ріст зупиняли, після чого проводили в зворотному напрямі розплавлення 6.0-8.0 мм закристалізованого розплаву і протягом 100 годин здійснювали відпал. Далі проводили вирощування монокристалу при швидкості опускання 5 мм/добу. Після завершення процесу обидві печі охолоджували до 820 К зі швидкістю 50-70 К/добу і відпалювали отриманий монокристал протягом 100 годин. Після цього охолоджували установку в режимі виключеної печі. Отримано монокристал оранжево-жовтого кольору, діаметром 14 мм і довжиною 20 мм. Компонентний склад і структуру вирощеного монокристалу досліджено з допомогою SEM та EDS-аналізу [18].

Дослідження спектрів оптичного поглинання та ФЛ проводилось за стандартною методикою синхродетектування, АЦ-перетворення, з допомогою монохроматора МДР-206 обладнаного кріостатом з автоматичною системою регулювання та фіксації температури. Приймання сигналу ФЛ проводилось із тієї ж площини поверхні зразка, що і збудження. Реєстрація сигналу проводилась Si та PbS фотоприймачами. Збудження люмінесценції здійснювалось діодним лазером із максимумом випромінювання 980 нм і потужністю 150 мВт.

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Досліджено спектр оптичного поглинання у видимому та близькому інфрачервоному діапазоні монокристалу $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$ (рис. 1.). Як бачимо на графіку зафіксовано вузькі смуги поглинання із максимумами 0,81, 1,27, 1,53, 1,88, 2,34 еВ. Ці максимуми відповідають внутрішньцентровим переходам із основного $^4\text{I}_{15/2}$ в збуджені стани $^4\text{I}_{13/2}$, $^4\text{I}_{11/2}$, $^4\text{I}_{9/2}$, $^4\text{F}_{9/2}$, $^2\text{H}_{11/2}$ іонів Er^{3+} відповідно.

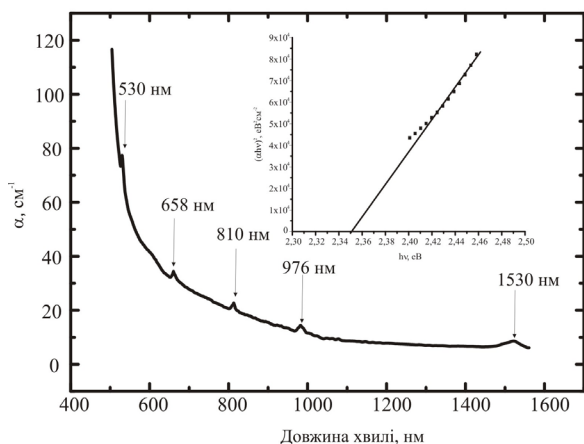


Рис. 1. Спектр оптичного поглинання монокристалу $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$.

На вставці рис. 1 побудовано залежність $(\alpha h\nu)^2 = f(h\nu)$ і на основі відомої формули [19] для прямих переходів визначено ширину забороненої зони кристалу:

$$\alpha = A \frac{(h\nu - E_g)^{1/2}}{h\nu}, \quad (1)$$

де: α – коефіцієнт поглинання, E_g – ширина

забороненої зони, A – константа. Визначене значення $E_g = 2,35$ еВ, є дещо меншим, як в роботі І.Р. Амірасланова [20], який отримав монокристали GaInS_3 методом хімічно-транспортних реакцій. Відмінності пов'язані із різною технологією отримання монокристалів, а також введенням домішки Ербію.

Ми дослідили спектри ФЛ монокристалу $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$ (рис. 2, 3) за температури 150, 200, 250, 300 К при збудженні лазером із довжиною хвилі 980 нм. Як бачимо із рисунків, зафіксовано інтенсивні смуги антистоксової (рис. 2) та стоксової (рис. 3) ФЛ із максимумами 805 і 1540 нм, що відповідають переходам $^4\text{I}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ в іонах Ербію відповідно.

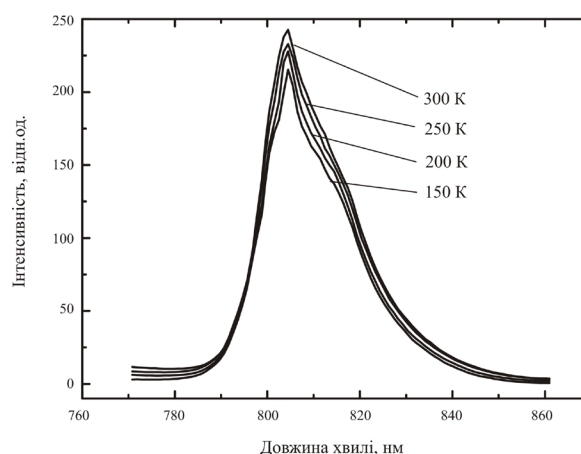


Рис. 2. Спектри антистоксової ФЛ монокристалу $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$.

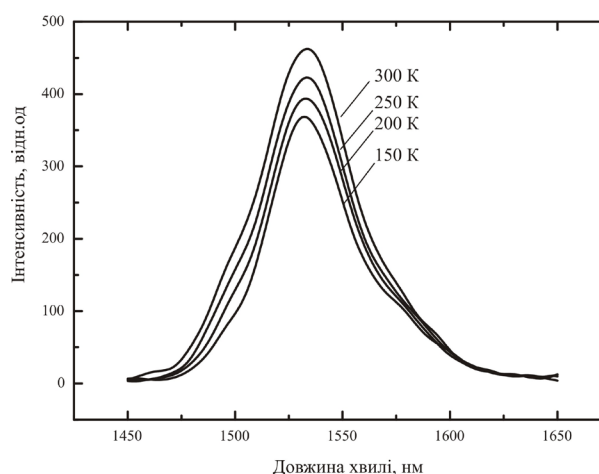
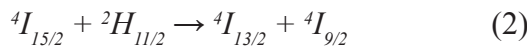


Рис. 3. Спектри стоксової ФЛ монокристалу $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$.

Положення та форма максимумів не змінюється, але інтенсивність ФЛ зростає при збільшенні температури. Для більшості напівпровідникових матеріалів, в яких зафіксовано рекомбінаційну люмінесценцію [21] при підвищенні температури інтенсивність ФЛ зменшується. Водночас, в кристалах та стеклах, в яких ФЛ пов'язана із переходами всередині 4f оболонки іонів Ербію, інтенсивність емісії із збільшенням температури може зростати. Це пов'язано із тим, що сусідні іони Ербію знаходяться в різних збуджених станах. При підвищенні температури змінюється фонна підсистема кристалу, що сприяє процесам кросрелаксації між сусідніми іонами Er^{3+} . Якщо збуджувати кристал довжиною хвилі 980 нм іони Ербію при поглинанні двох фотонів переходять в стан $^4F_{7/2}$ (рис. 4). З цього стану внаслідок невеликої енергетичної відстані іони Er^{3+} можуть безвипромінювально релаксувати в стан $^2H_{11/2}$. Завдяки кросрелаксації (CR):



виникають збуджені стани $^4I_{13/2} + ^4I_{9/2}$. Безвипромінювально перейти зі стану $^4I_{11/2}$ в $^4I_{13/2}$ іони Ербію не можуть, внаслідок великої енергетичної відстані і порівняно низькій енергії фононів (для напівпровідників на основі сульфідів галію $\sim 350 \text{ см}^{-1}$). Тому при підвищенні температури процеси обміну енергією (CR) відіграватимуть більшу роль, що сприятиме більшій концентрації іонів Ербію в станах $^4I_{9/2}$ і $^4I_{13/2}$ і росту інтенсивності фотолюмінесценції із максимумами 805 і 1540 нм відповідно.

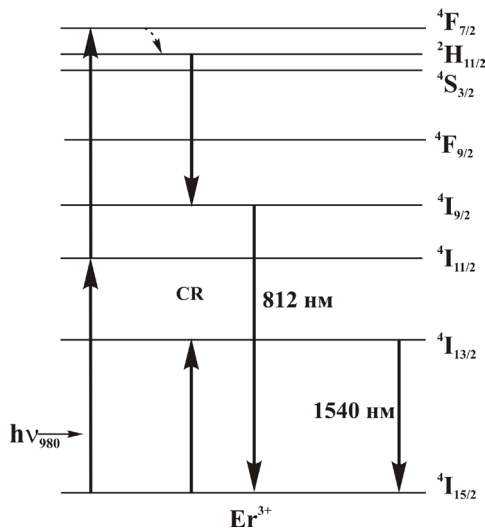


Рис. 4. Діаграма енергетичних рівнів в Er^{3+} іонах.

На основі спектрів антистоксової та стоксової ФЛ монокристалу $(Ga_{54.59}In_{44.66}Er_{0.75})_2S_{300}$ розрахована інтегральна інтенсивність ФЛ для максимумів 805 і 1540 нм (рис. 5, 6). Із рисунків бачимо, що інтегральна інтенсивність ФЛ лінійно залежить від температури. Така залежність є підставою для рекомендації монокристалу $(Ga_{54.59}In_{44.66}Er_{0.75})_2S_{300}$ в якості матеріалу для конструювання оптичних сенсорів температури. Із результатів залежності інтегральної інтенсивності ФЛ від температури обчислено чутливість, яка становить $1,187 \times 10^{-3} \text{ C}^{-1}$ для ФЛ із максимумом 805 нм і $1,818 \times 10^{-3} \text{ C}^{-1}$ – із максимумом 1540 нм. Зауважимо, що чутливість вища для ФЛ у спектральному інтервалі, який належить до робочого діапазону оптоволоконних мереж та телекомунікаційних пристроїв.

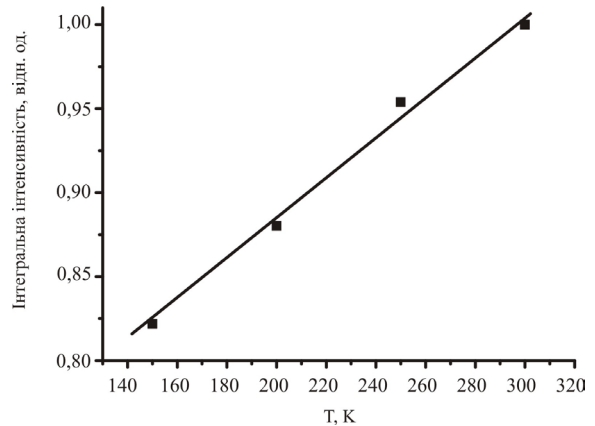


Рис. 5. Залежність інтегральної інтенсивності антистоксової ФЛ від температури монокристалу $(Ga_{54.59}In_{44.66}Er_{0.75})_2S_{300}$.

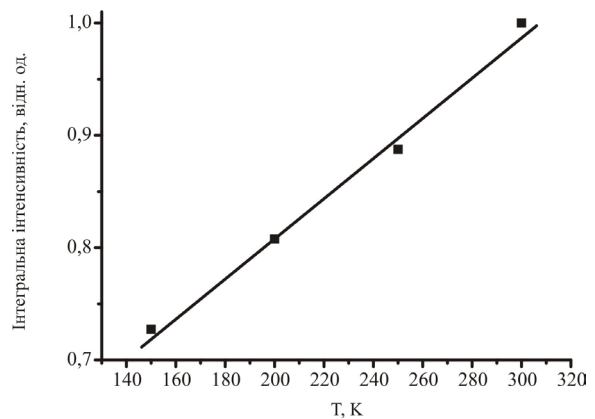


Рис. 6. Залежність інтегральної інтенсивності стоксової ФЛ від температури монокристалу $(Ga_{54.59}In_{44.66}Er_{0.75})_2S_{300}$.

ВИСНОВКИ

Досліджено спектр оптичного поглинання монокристалу $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$ і зафіксовано максимуми, що відповідають внутрішньоцентровим переходам в іонах Er^{3+} . При збудженні монокристалу лазером із довжиною хвилі 980 нм виникає антистоксівська (максимум 805 нм) та стоксівська (максимум 1540 нм) ФЛ. Розрахована інтегральна інтенсивність ФЛ (при 150, 200, 250, 300 К) зі збільшенням температури зростає за лінійним законом. За результатами температурної залежності інтегральної інтенсивності ФЛ обчислено чутливість спектрів до зміни температури ($1,187 \times 10^{-3} \text{ C}^{-1}$ – для максимуму 805 нм, $1,818 \times 10^{-3} \text{ C}^{-1}$ – для максимуму 1540 нм). В температурному інтервалі 150 – 300 К монокристал $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$ можна рекомендувати для конструювання безконтактного оптичного термосенсора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1]. M. Piasecki, M. G. Brik, I. E. Barchiy, K. Ozga, I. V. Kityk, A. M. El-Naggar, A. A. Albassam, T. A. Malakhovskaya, G. Lakshminarayana. Band structure, electronic and optical features of Tl_4SnX_3 ($X = \text{S}, \text{Te}$) ternary compounds for optoelectronic applications // *Journal of Alloys and Compounds*, 710, pp. 600-607 (2017).
- [2]. A. H. Kevshyn, V. V. Halyan, H. Ye. Davydyuk, O. V. Parasyuk, I. I. Mazurets. Concentration dependence of the optical properties of glassy alloys in the $\text{HgS}-\text{Ga}_2\text{S}_3-\text{GeS}_2$ system // *Glass Physics and Chemistry*, 36 (1), pp. 27-32 (2010).
- [3]. M. Piasecki, G. L. Myronchuk, O. V. Zamurueva, O. Y. Khyzhun, O. V. Parasyuk, A. O. Fedorchuk, A. Albassam, A. M. El-Naggar, I. V. Kityk. Huge operation by energy gap of novel narrow band gap $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{B}_x\text{Se}_2$ ($B = \text{Si}, \text{Ge}$): DFT, x-ray emission and photoconductivity studies // *Materials Research Express*, 3 (2), pp. 025902 (2016).
- [4]. I. A. Ivashchenko, I. V. Danyliuk, I. D. Olekseyuk, V. V. Halyan. Phase equilibria in the quasi-ternary system $\text{Ag}_2\text{Se}-\text{Ga}_2\text{Se}_3-\text{In}_2\text{Se}_3$ and physical properties of $(\text{Ga}_{0.6}\text{In}_{0.4})_2\text{Se}_3$, $(\text{Ga}_{0.594}\text{In}_{0.396}\text{Er}_{0.01})_2\text{Se}_3$ single crystals // *Journal of Solid State Chemistry*, 210 (1), pp. 102-110 (2014).
- [5]. V. V. Halyan, V. V. Strelchuk, V. O. Yukhymchuk, A. H. Kevshyn, G. Ye. Davydyuk, M. V. Shevchuk, S. V. Voronyuk. Role of structural ordering on optical properties of the glasses $\text{Ag}_{0.05}\text{Ga}_{0.05}\text{Ge}_{0.95}\text{S}_2-\text{Er}_2\text{S}_3$ // *Physica B*, 411, pp. 35-39 (2013).
- [6]. V. V. Halyan, I. V. Kityk, A. H. Kevshyn, I. A. Ivashchenko, G. Lakshminarayana, M. V. Shevchuk, A. Fedorchuk, M. Piasecki. Effect of temperature on the structure and luminescence properties of $\text{Ag}_{0.05}\text{Ga}_{0.05}\text{Ge}_{0.95}\text{S}_2-\text{Er}_2\text{S}_3$ glasses // *Journal of Luminescence*, 181, pp. 315-320 (2017).
- [7]. Iu. Nasioka, V. Strelchuk, M. Boyko, V. Voevodin, A. Vierovkin, A. Rybka, V. Kutniy, S. Dudnik, V. Gritsina, O. Opalev, V. Strel'nitskij. Raman and photoluminescence characterization of diamond films for radiation detectors // *Sensors and Actuators, A: Physical*, 223, pp. 28-23 (2015).
- [8]. Albin Antony, S. Pramodini, P. Poornesh, I. V. Kityk, A. O. Fedorchuk, Ganesh Sanjeev. Influence of electron beam irradiation on nonlinear optical properties of Al doped ZnO thin films for optoelectronic device applications in the cw laser regime // *Optical Materials*, 62, pp. 64-71 (2016).
- [9]. P. A. Rodnyi. Progress in fast scintillators // *Radiation Measurements*, 33(5), pp. 605-614 (2001).
- [10]. Takayuki Yanagida, Noriaki Kawaguchi, Yuui Yokota, Sumito Ishidu, Kei Kamada. Study of VUV emission and γ -ray responses of Nd:BaF₂ scintillator // *Radiation Measurements*, 45(3-6), pp. 422-425 (2010).
- [11]. Takayuki Yanagida. Ionizing radiation induced emission: Scintillation and storage-type luminescence // *Journal of Luminescence*, 169(Part B), pp. 544-548 (2016).
- [12]. B. Tortech, M. Van Uffelen, A. Gusarov, Y. Ouerdane, A. Boukenter, J. -P. Meunier, F. Berghmans, H. Thienpont. Gamma radiation induced loss in erbium doped optical fibers // *J. Non-Cryst. Solids*, 353(5-7), pp. 477-480 (2007).
- [13]. C. Wang, D. Barba, S. Slim, Y. Q. Wang, F. Rosei. Enhanced radiation resistance of near-infrared photoluminescence emission induced by Er/Si nanoclustering // *Materials & Design*, 126, pp. 57-63 (2017).
- [14]. Akihiro Yamaji, Hiraku Ogino, Yutaka Fujimoto, Akira Suzuki, Akira Yoshikawa. Scintillation properties of Er-doped $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ single

crystals // *Radiation Measurements*, 56, pp. 116-119 (2013).

[15]. Makoto Sugiyama, Yutaka Fujimoto, Takayuki Yanagida, Daisuke Totsuka, Shunsuke Kurosawa, Yoshisuke Futami, Yuui Yokota, Valery Chani, Akira Yoshikawa. Crystal growth and scintillation properties of Er-doped $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ single crystals // *Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 664(1), pp. 127-131 (2012).

[16]. I. A. Ivashchenko, I. V. Danyliuk, I. D. Olekseyuk, V. Z. Pankevych, V. V. Halyan. Phase equilibria in the quasiternary system $\text{Ag}_2\text{S}-\text{Ga}_2\text{Se}_3-\text{In}_2\text{Se}_3$ and optical properties of $(\text{Ga}_{55}\text{In}_{45})_2\text{S}_{300}$, $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$ single crystals // *Journal of Solid State Chemistry*, 227, pp. 255-264 (2015).

[17]. O. Y. Khyzhun, V. V. Halyan, I. V. Danyliuk, I. A. Ivashchenko. Electronic structure of $(\text{Ga}_{55}\text{In}_{45})_2\text{S}_{300}$ and $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$ single crystals // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27(4), pp. 3258-3264 (2016).

[18]. I. V. Kityk, V. O. Yukhymchuk, A. Fedorchuk, V. V. Halyan, I. A. Ivashchenko, I. D. Oleksieyuk, M. A. Skoryk, G. Lakshminarayana, A. M. El-Naggar, A. A. Albassam, O. O. Lebed, M. Piasecki. Laser stimulated piezo-optics of γ -irradiated $(\text{Ga}_{55}\text{In}_{45})_2\text{S}_{300}$ and $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$ single crystals // *Journal of Alloys and Compounds*, 722, pp. 265-271 (2017).

[19]. J. I. Pankove. *Optical Processes In Semiconductors*. Mir, M. 456 s. (1973)

[20]. I. R. Amiraslanov, T. Kh. Azizov, G. G. Guseinov, A. S. Kuliev, G. M. Niftiev. Vyrashchivaniye monokristallov, struktura i fotoelektricheskiye svoystva novykh polimorfnykh modifikatsiy GaInS_3 // *Inorganic Materials*, 24(5), pp. 723-726 (1998).

[21]. D. S. Agafonova, E. V. Kolobkova, A. I. Sidorov. Temperature dependence of the luminescence intensity in optical fibers of oxyfluoride glass with CdS and $\text{CdS}_{(x)}\text{Se}_{1-x}$ quantum dots // *Technical physics letters*, 39(7), pp. 629-631 (2013).

UDC 621.315.592

DOI 10.18524/1815-7459.2018.1.126352

NON-CONTACT OPTICAL THERMAL SENSORS BASED ON $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$ SINGLE CRYSTALS

V. V. Halyan, I. A. Ivashchenko, A. H. Kevshyn, I. D. Olekseyuk, A. P. Tretyak, P. V. Tishchenko

Lesya Ukrainka Eastern European National University, Lutsk

Summary

New materials and their properties is one of the principal directions of modern materials science. Recently, high-precision thermal sensors based on the sensitivity of photoluminescent radiation to temperature changes are actively investigated and implemented in the industrial production of optoelectronic technology. However, little attention is paid to the study of the mutual influence of the relaxation mechanisms of erbium ions and the cross-relaxation processes when the intensity of luminescence changes at different temperature ranges. Such studies will optimize the choice of component composition for efficient luminescent materials in the manufacture of contact-free optical thermal sensors.

The objective of this work is to study the luminescence properties of the $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$ single crystal in various temperature ranges, to identify the radiation mechanism, and to determine the sensitivity of optical thermal sensor promising to optoelectronic technology.

The technique and growth conditions of the single crystal $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$ were selected according to the phase diagram of the $\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-In}_2\text{S}_3$ system and the cooling curve of the sample thermogram to determine the supercooling temperature. The solution-melt method was used for obtaining the single crystal, with the supercooling temperature of the melt set at 70 K. The growth process was performed in a vertical two-zone furnace. The maximum temperature was 1200 K, the temperature gradient at the solid-melt interface was 20 K/cm.

The PL spectra of the $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$ single crystal at 150, 200, 250, 300 K were investigated under excitation by a laser at 980 nm. Strong bands of anti-Stokes and Stokes PL with the maxima at 805 and 1540 nm were recorded which correspond to the transitions ${}^4\text{I}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$, ${}^4\text{I}_{13/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$, respectively, in erbium ions. Based on the spectra of anti-Stokes and Stokes PL of the $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$ single crystal, the integral intensity of PL was calculated for the maxima at 805 and 1540 nm. It was determined that the integral intensity of PL depends linearly on the temperature. Using the energy transition diagram of Er^{3+} ions, the mechanism of PL radiation is suggested which explains the change in PL intensity with increasing temperature.

The sensitivity of the PL spectra to the temperature change in the 150–300 K range was calculated. It is equal to $1.18710^{-3} \text{ K}^{-1}$ (for the maximum at 805 nm) and $1.81810^{-3} \text{ K}^{-1}$ (for the maximum at 1540 nm).

Keywords: thermal sensor, photoluminescence, cross-relaxation, sensitivity

УДК 621.315.592

DOI 10.18524/1815-7459.2018.1.126352

БЕЗКОНТАКТНІ ОПТИЧНІ ТЕРМОСЕНСОРИ НА ОСНОВІ МОНОКРИСТАЛУ $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$

В. В. Галян, І. А. Іващенко, А. Г. Кевшин, І. Д. Олексюк, А. П. Третяк, П. В. Тищенко

Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки, Луцьк

Реферат

Отримання нових матеріалів і дослідження їх властивостей є одним із основних напрямків сучасного матеріалознавства. Останнім часом, в сучасному промисловому виробництві оптоелектронної техніки активно досліджуються і впроваджуються високоточні термічні сенсори, вимірювання в яких базується на чутливості фотолюмінесцентного випромінювання до температурних змін. Проте, мало уваги приділяється вивченню взаємного впливу механізмів релаксації іонів ербію та кросрелаксаційних процесів при зміні інтенсивності люмінесценції в різних температурних інтервалах. Такі дослідження дозволять оптимізувати вибір компонентного складу для отримання ефективних люмінесцентних матеріалів при виготовленні безконтактних оптичних термосенсорів.

Метою цієї роботи є дослідження люмінесцентних властивостей монокристалу $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$ в різних температурних інтервалах, встановлення механізму випромінювання, а також визначення чутливості оптичного термосенсору перспективного в оптоелектронній техніці.

Ми отримали монокристал $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$, методика та умови отримання якого підібрані з діаграми стану системи $\text{Ga}_2\text{S}_3 - \text{In}_2\text{S}_3$ та термограми охолодження зразка, по якій визначали температуру переохолодження. Використали розчин-розплавний метод, переохолодження розчину-розплаву становило 70 К. Процес росту проходив у вертикальній двозонній печі. Максимальна температура становила 1200 К, градієнт температури на фронті кристалізації складав 20 К/см.

Досліджено спектри ФЛ монокристалу $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$ за температури 150, 200, 250, 300 К при збудженні лазером із довжиною хвилі 980 нм. Зафіксовано інтенсивні смуги антистоксової та стоксової ФЛ із максимумами 805 і 1540 нм, що відповідають переходам ${}^4\text{I}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$, ${}^4\text{I}_{13/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ в іонах Ербію відповідно. На основі спектрів антистоксової та стоксової ФЛ монокристалу $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$ розрахована інтегральна інтенсивність ФЛ для максимумів 805 і 1540 нм. Встановлено, що інтегральна інтенсивність ФЛ лінійно залежить від температури. На основі моделі енергетичних переходів в іонах Er^{3+} запропоновано механізм випромінювання ФЛ, який пояснює зміну інтенсивностей ФЛ при підвищенні температури.

В інтервалі 150 – 300 К обчислено чутливість спектрів ФЛ до температурних змін, що становить $1,187 \times 10^{-3} \text{ C}^{-1}$ (для максимуму 805 нм), $1,818 \times 10^{-3} \text{ C}^{-1}$ (для максимуму 1540 нм).

Ключові слова: термосенсор, фотолюмінесценція, кросрелаксація, чутливість

МАТЕРІАЛИ ДЛЯ СЕНСОРІВ

SENSOR MATERIALS

УДК 621.315.592

DOI 10.18524/1815-7459.2018.1.125123

НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНА ФОТОПРОВІДНІСТЬ ТА ТЕРМОСТИМУЛЬОВАНА ПРОВІДНІСТЬ МОНОКРИСТАЛІВ $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$

*В. Кажукаускас¹, Г. Л. Мирончук², Р. Гарбачаускас¹, О. В. Парасюк², С. Савіцкі¹,
О. В. Новосад², С. П. Данильчук², Л. В. Піскач²*

¹Інститут фотоніки і нанотехнологій, Вільнюський університет, LT-10222 Вільнюс, Литва,
e-mail: vaidotas.kazukauskas@gmail.com

²Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк,
43025, e-mail: ovosa@ukr.net

НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНА ФОТОПРОВІДНІСТЬ ТА ТЕРМОСТИМУЛЬОВАНА ПРОВІДНІСТЬ МОНОКРИСТАЛІВ $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$

*В. Кажукаускас, Г. Л. Мирончук, Р. Гарбачаускас, О. В. Парасюк, С. Савіцкі, О. В. Новосад,
С. П. Данильчук, Л. В. Піскач*

Анотація. Досліджені спектри фотопровідності в температурному інтервалі $T \approx 36-200$ К та спектри термостимульованих струмів в температурному інтервалі $T \approx 70-300$ К монокристалів $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$, отриманих методом напрямленої кристалізації Бріджмена-Стокбаргера. Виявлена індукована фотопровідність та довготривалі процеси релаксації фотопровідності. Для інтерпретації отриманих результатів запропонована модель двоцентрової рекомбінації. Показано, що роль г-центрів повільної рекомбінації в монокристалах $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$ виконують вакансії Тl. На основі досліджень спектрів термостимульованих струмів визначено термічну енергію активації електронів з t-рівнів прилипання.

Ключові слова: монокристали, дефекти, фотопровідність, термостимульована провідність

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ФОТОПРОВОДИМОСТЬ И ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ МОНОКРИСТАЛЛОВ



*В. Кажукаускас, Г. Л. Мирончук, Р. Гарбачаускас, О. В. Парасюк, С. Савицки, А. В. Новосад,
С. П. Данильчук, Л. В. Пискач*

Аннотация. Исследованы спектры фотопроводимости в температурном интервале $T \approx 36-200$ К и спектры термостимулированных токов в температурном интервале $T \approx 70-300$ К монокристаллов $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$, полученных методом направленной кристаллизации Бриджмена-Стокбаргера. Обнаружена индуцированная фотопроводимость и долговременные процессы релаксации фотопроводимости. Для интерпретации полученных результатов предложена модель двухцентровой рекомбинации. Показано, что роль r-центров медленной рекомбинации в монокристаллах $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ выполняют вакансии Тl. Основываясь на исследованиях спектров термостимулированных токов определено термическую энергию активации электронов с t-уровней прилипания.

Ключевые слова: монокристаллы, дефекты, фотопроводимость, термостимулированная проводимость

LOW-TEMPERATURE PHOTOCONDUCTIVITY AND THERMOSTYMLATED CONDUCTIVITY OF $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ SINGLE CRYSTALS

*V. Kazukauskas, G. L. Myronchuk, R. Garbacauskas, O. V. Parasyuk, S. Savicki, O. V. Novosad,
S. P. Danylchuk, L. V. Piskach*

Abstract. The photoconductivity spectra in the temperature range $T \approx 36-200$ K and the spectra of thermally stimulated currents in the temperature range $T \approx 70-300$ K of $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ single crystals obtained by directional crystallization of Bridgman-Stockbarger have been studied. The induced photoconductivity and long-term photoconductivity relaxation processes have been found. To interpret the found results, a model of two-center recombination has been suggested. It is illustrated that the role of the r-centers of slow recombination are formed by Tl vacancies. On the basis of the studies of the spectra of thermally stimulated currents, the thermal energy of electrons activation with t-levels of adhesion have been determined.

Keywords: single crystals, defects, photoconductivity, thermally stimulated conductivity

1. ВСТУП

Селеноіндат талію TlInSe_2 , що є структурно-координаційним аналогом бінарної сполуки TlSe , в якій іони Tl^{3+} заміщені іонами In^{3+} , має чітко виражену шарувато-ланцюгову структуру, що обумовлює анізотропію їх фізичних властивостей. Носії заряду можуть вільно рухатися всередині шарів або ланцюгів. Обмеженість руху вільних носіїв заряду між шарами обумовлюється вандер-ваальсівською взаємодією і малим перекриттям хвильових функцій сусідніх шарів [1].

Особливістю таких кристалів є те, що можна отримати напівпровідникові шари, які не містять обірваних зв'язків, тобто є стійкими по відношенню до адсорбції, з невисокою швидкістю поверхневої рекомбінації, а також з підвищеною радіаційною стійкістю, що відповідає вимогам до сучасних напівпровідникових структур. Завдяки особливостям поєднання електричних і фотоелектричних властивостей TlInSe_2 є перспективними матеріалами для створення детекторів та приймачів випромінювання, пристроїв, керованих електричним полем, в умовах підвищеної радіації [2, 3]. Про важливість використання шаруватих напівпровідників як матеріалів для сенсорів повідомлялося в роботах [4-6].

Останнім часом увагу привертають монокристалічні тверді розчини між різними за своєю природою напівпровідниками з метою створення гетеропереходів, які стали можливими в результаті ідентичності технологій синтезу. Використання TlInSe_2 для створення гетероструктур обумовлено перспективністю застосування шаруватих напівпровідників, які володіють значною чутливістю, до видимого, рентгенівського, гамма і ІЧ-випромінювання [7, 8].

Також потрібно враховувати, що шаруваті кристали TlInSe_2 , які належать до сегнетоелектриків-напівпровідників, активно досліджуються протягом декількох десятиліть в якості модельних сполук [9]. Важливу роль у визначенні властивостей TlInSe_2 відіграють власні точкові дефекти. Відомості про природу цих дефектів і їх взаємодію перебувають в інтенсивній стадії вивчення і до теперішнього часу вивчені недостатньо [2, 9].

Головним завданням даної роботи було проведення досліджень фотоелектричних властивостей нових кристалів $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_x\text{Sn}_x\text{Se}_2$ при низьких температурах з метою з'ясування впливу дефектів кристалічної структури на електропровідність і фотопровідність цих кристалів, а також визначення деяких параметрів цих дефектів.

2. МЕТОДИКА ТА ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Технологія вирощування, результати рентгеноструктурних досліджень і деякі фізичні властивості твердого розчину $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_x\text{Sn}_x\text{Se}_2$ представлені в наших роботах [10-12]. Тверді розчини $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_x\text{Sn}_x\text{Se}_2$ відповідали компонентному складові $x=0,1, 0,2, 0,25$.

Для дослідження електричних і фотоелектричних властивостей одержаних кристалів використовували плоскопаралельні сколи з середньої частини монокристалічного злитка уздовж площини спайності (001). Поверхні кристалів були дзеркально гладкими, що дозволило використовувати їх для досліджень без додаткової обробки.

Для проведення вимірювань з плоскопаралельних сколів вирізали зразки у формі правильних паралелепіпедів розмірами $4 \times 1 \times 0,2$ мм. Омічні контакти наносилися вплавленням індію до торців зразків, поверхонь пластин. Подача напруги і вимірювання струму, який проходив через зразок, здійснювали електрометром Keithley 6430B Source-Measurement Unit. Для дослідження спектральних залежностей фотоструму зразки освітлювали монохроматичним світлом за допомогою автоматизованого подвійного монохроматора Leitz. Час одного повного сканування фотопровідності тривав не менше 3600 с.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Згідно з [10, 11], особливістю утворення досліджуваних твердих розчинів було катіонне заміщення In^{3+} на Sn^{4+} , що обумовлювало часткову заповненість кристалографічних позицій $4a$ атомами Tl. Вона становила

0,9Tl, 0,8Tl, 0,25Tl для монокристалів $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$ з $x=0,1$, $x=0,2$, $x=0,25$ відповідно. Згідно з [10, 11], відсутність атомів Tl у їх кристалографічних позиціях обумовлювала монотонне зменшення об'єму елементарної комірки зі збільшенням вмісту атомів Sn.

Враховуючи особливості утворення твердих розчинів, можна стверджувати, що на їх фізичні властивості впливатимуть вакансії Tl (V_{Tl}), концентрація яких зростає зі збільшенням x . Також відомо, що катіонні вакансії V_{Tl} у халькогенідних напівпровідниках виконують роль акцепторів, які компенсують мілкі донори [10]. Тобто збільшення x буде обумовлювати перерозподіл електронів на дефектних центрах монокристалів. Важливість V_{Tl} в гетероструктурах на основі TlInSe₂ показано в [7]. Згідно з [7], у гетероструктурах p -TlInSe₂/ n -TlSe<Ge> дефектні комплекси за участі V_{Tl} можуть впливати на висоту бар'єра структури при різних рінях опромінення γ -променями.

Результати досліджень монокристалів $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$ при кімнатних температурах представлені в наших роботах [10, 11]. Особливістю спектрів фотопровідності при $T=300$ К була наявність одного добре вираженого максимуму, який обумовлювався власними оптичними переходами та положення якого залежало від складу твердого розчину. По енергетичному положенню максимумів фотопровідності було оцінено значення ширини забороненої (E_g) зони даних монокристалів. Встановлено, що зі зростанням x значення E_g збільшувалося та становило 1,66 еВ, 1,79 еВ, 1,88 еВ для монокристалів при $x=0,1$, $x=0,2$, $x=0,25$ [10, 11]. Слід відмітити, що оцінені таким чином значення E_g співпадали зі значеннями E_g , визначеними зі спектрів поглинання світла [10]. При зниженні температури до 200 К спостерігалось плавне зміщення максимумів фотопровідності в короткохвильову область, яке обумовлювалось зростанням E_g [10]. Найбільш фоточутливими, при $T=300$ К, виявились монокристали складу $Tl_{0,75}In_{0,75}Sn_{0,25}Se_2$.

Особливістю спектрального розподілу фотоструму при більш низькій температурі ($T=200-36$ К) виявилось те, що в монокристалах з найбільшим вмістом атомів

Sn поряд з основним максимумом фотоструму спостерігався максимум фотоструму в домішкській області, положення якого відповідало енергії квантів світла $h\nu \approx 1,25-1,45$ еВ. Зменшення E_g зі збільшенням температури обумовлювало зміщення короткохвильового максимуму фотоструму у довгохвильову область електромагнітного спектру. Зміщення положення максимумів фотопровідності відбувалося з температурним коефіцієнтом $4,3 \cdot 10^{-4}$ еВ/К, що узгоджується з коефіцієнтом температурної зміни E_g інших халькогенідних сполук [12].

З метою виключення фотозбудження монокристалів квантами світла з великою енергією сканування зразків проводилося в напрямку зростання енергії квантів світла від 0,5 еВ до 3,5 еВ. Перед кожним скануванням зразки нагрівалися до $T=360$ К, після чого охолоджувалися до температури, при якій проводилось дослідження спектрів фотоструму. Охолодження зразків здійснювалось при напрузі 0 В. Після охолодження до зразків прикладалася напруга 25 В.

При таких же експериментальних умовах проводилось сканування монокристалів квантами світла від більших енергій до менших, внаслідок чого спостерігалась відмінність у спектрах фотострумів від тих, які отримані в напрямку зростання енергії квантів світла. Відмінність полягала у зменшенні висоти короткохвильового максимуму, що може свідчити про участь домішкових рівнів у формуванні даного максимуму фотоструму. Слід відмітити, що найбільш чітко дана відмінність спостерігалось для монокристалів $Tl_{0,75}In_{0,75}Sn_{0,25}Se_2$.

Більш детальний аналіз та дослідження фотопровідності монокристалів складу $Tl_{0,75}In_{0,75}Sn_{0,25}Se_2$ показали, що відмінність у спектрах фотопровідності у прямому та зворотному напрямках більш чітко спостерігалась у випадку, коли сканування від більших енергій до менших проводити відразу після сканування в прямому напрямку (рис. 1.). При скануванні зразків квантами світла від менших енергій до більших спостерігалися максимуми, енергетичне положення яких відповідало квантам світла 1,38 еВ і 1,74 еВ.

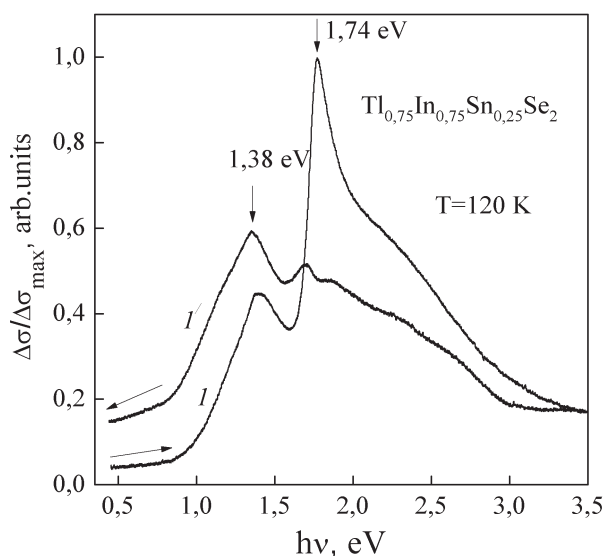


Рис. 1. Спектральний розподіл фотопровідності твердого розчину $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$: I – енергія квантів світла при скануванні зразків зростала; I' – енергія квантів світла при скануванні зразків зменшувалася.

Оскільки при скануванні у зворотному напрямку короткохвильовий максимум ставав менш вираженим, в той час як довгохвильовий максимум залишався більш інтенсивним, то можна зробити припущення, що така поведінка фотоелектричних властивостей $Tl_{0.75}In_{0.75}Sn_{0.25}Se_2$ обумовлюється наявністю індукованої фотопровідності [13, 14]. Очевидно, що індукована фотопровідність обумовлюється засвіткою монокристалів квантами світла під час попереднього сканування зразків у напрямку зростання енергії квантів світла.

Отримані таким чином результати неможливо пояснити в рамках простої теорії, що пов'язує індуковану фотопровідність із заповненням донорних рівнів за рахунок спустошення акцепторних, без механізму рекомбінації. Відповідно, для інтерпретації результатів пропонується модель двоцентрової рекомбінації [13, 15], згідно з якою в кристалі присутні глибокі r -центри повільної і s -центри швидкої рекомбінації з різним перерізом захоплення електронів, $S_{sn} / S_m \gg 10^3$, де S_{sn} , S_m - перерізи захоплення електронів s - і r -центрами [13], а також t -рівні прилипання, розташовані біля дна зони провідності. По відношенню до

r -центрів рекомбінації s -центри більш віддалені від валентної зони. Роль t -рівнів полягає у визначенні заповнення s - і r -центрів електронами і, відповідно, перерозподілу спектрів фотопровідності. Індуковану фотопровідність обумовлюють s -центри швидкої рекомбінації при їх заповненні та гасіння фотопровідності - при спустошенні.

Наявність r -центрів рекомбінації з низьким значенням S_m та t -рівнів прилипання призводить до великого часу релаксації фотопровідності, що підтвердилося дослідженнями процесів релаксації фотопровідності монокристалів $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$, та до зростання фоточутливості. Оцінене значення часу релаксації фотопровідності становило $\sim 10^2$ - 10^3 с. Аномально великий час релаксації фотопровідності ($\tau \sim 10^3$ с) в кристалах $TlInSe_2$ спостерігався авторами роботи [16]. Для пояснення довгочасових процесів релаксації фотопровідності в [16] використовувалася бар'єрна теорія неупорядкованого напівпровідника з високоомним включенням в низькоомній матриці.

До висновку про наявність r , s t -рівнів у монокристалах $TlInSe_2$ прийшли автори роботи [3], у якій аналізувалися результати проходження струму через монокристали $TlInSe_2$ в сильних електричних полях. Для твердих розчинів $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$ деякі параметри цих дефектних центрів були визначені в роботах [10, 11], у яких використовувалася описана вище модель розподілу центрів рекомбінації та прилипання. Явище індукованої фотопровідності та довгочасові процеси релаксації фотопровідності спостерігалася нами у твердих розчинах $CuInS_2$ - $ZnIn_2S_4$ на основі монокристалів $CuInS_2$ [12, 17]. У [12] аналіз довготривалої релаксації фотопровідності проводився на основі уявлень про захоплення вільних носіїв заряду точковими центрами локалізації (пастками).

Роль r -центрів рекомбінації в $CuInS_2$ - $ZnIn_2S_4$ виконували акцепторні центри, обумовлені V_{Cu} . Концентрація в $CuInS_2$ - $ZnIn_2S_4$ дефектів V_{Cu} зростала зі збільшенням вмісту $ZnIn_2S_4$ [12, 17], аналогічно, як і концентрація V_{Tl} в $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$.

З результатів, представлених на рис. 1., по положенню максимумів фотопровідності можна визначити розміщення s -центрів ре-

комбінації по відношенню до r -центрів. Центри швидкої рекомбінації в забороненій зоні знаходяться вище на $\Delta E=0,46$ еВ від центрів повільної рекомбінації. Роль r -центрів, згідно з припущенням, зробленим [10], виконують катіонні вакансії талію. Представлені на рис. 1 результати підтверджують дане припущення, оскільки монокристали $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ при $x=0,25$, мають найбільшу концентрацію даних дефектів в порівнянні з монокристалами при $x=0,10$ $x=0,2$, що й відобразилося в спектрах фотопровідності. Слід відмітити, що в [7] повідомлялося про акцепторні центри в монокристалах TlInSe_2 з енергією іонізації $E_v+0,15$ еВ. Також роль акцепторних центрів в монокристалах TlInSe_2 виконують міжвузлові точкові дефекти Se_i та In_i , а Tl_i проявляють донорні властивості [7]. Антиструктурні дефекти Sn_{In} в монокристалах $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ виконують роль донорів [10].

Для визначення положення t -рівнів досліджувалися спектри термостимульованих струмів (рис. 2.), які, як відомо [13], обумовлюються термічним викидом електронів з попередньо заповнених засвіткою центрів прилипання в зону провідності.

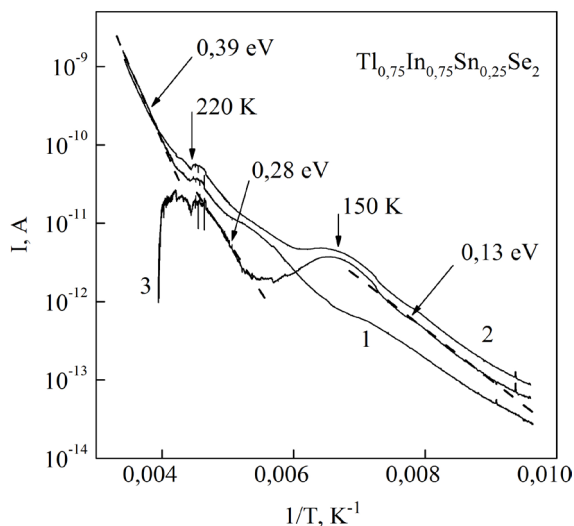


Рис. 2. Термостимульовані струми монокристалів $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ при $x=0,25$.

Спектри термостимульованих струмів (крива 3) отримувались відніманням темного струму (крива 1) від струму, виміряного після попередньої засвітки кристалу (крива 2).

Освітлювались кристали протягом 30 хв квантами світла з енергією $h\nu \approx 1,7$ еВ, що відповідає максимуму домішкової фотопровідності. У досліджуваному інтервалі температур спектр термостимульованих струмів має два максимуми (рис. 2, крива 3) при температурі $T \approx 150$ К і $T \approx 220$ К. При збільшенні або зменшенні енергії квантів світла по відношенню до $h\nu \approx 1,7$ еВ максимуми у спектрах термостимульованих струмів ставали менш вираженими. Як видно з рис. 2, на кривій 3, представленій в напівлогарифмічному масштабі, спостерігаються дві прямолінійних ділянки, по нахилу яких визначалася термічна енергія активації електронів з t -рівнів (E_t). Числові значення E_t у різних температурних інтервалах зазначені на рис. 2. При температурах $T > 200$ К темновий струм (рис. 2, крива 1) експоненційно зростає зі збільшенням температури. Визначена із нахилу енергія активація провідності становила 0,39 еВ.

Результати аналогічних досліджень спектрів термостимульованих струмів для монокристалів $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ при $x=0,1$ представлено на рис. 3. Як і в попередньому випадку, у спектрі можна виділити два максимуми при температурах $T \approx 80$ К і $T \approx 180$ К. Зміщення положення максимумів термостимульованих струмів у сторону менших температур та відповідно зменшення E_t можна пояснити зменшенням E_g кристалів $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ при зменшенні x , що узгоджується з припущенням, зробленим в [10], про прив'язаність t -рівнів до валентної зони.

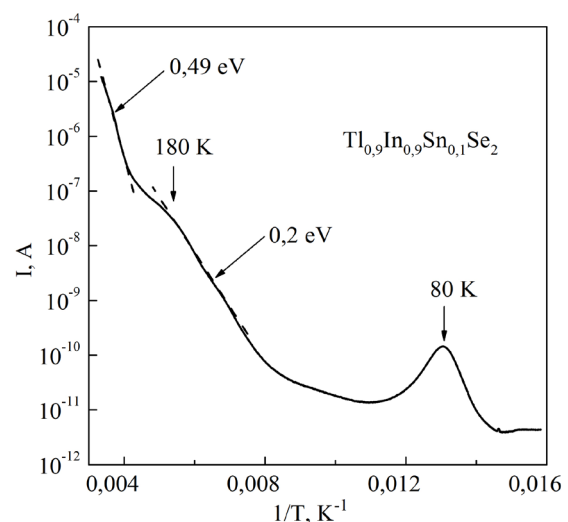


Рис. 3. Термостимульовані струми монокристалів $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ при $x=0,1$.

З рис.3 видно, що термостимульовані струми обумовлені звільненням електронів з t -рівнів, які відповідальні за формування максимуму при $T \approx 80$ К, в напівлогарифмічному масштабі не описуються прямою лінією. Це, в свою чергу, свідчить про неприпустимість використання, в даному випадку, наближень, згаданих в нашій роботі [11], для визначення E_t . Відповідно, визначити E_t для цих рівнів не вдалося. Термічна енергія активації електронів з t -рівнів, які обумовлюють максимум термостимульованих струмів при $T \approx 180$ К, вказана на рис.3. Крім того, при $T > 250$ К у монокристаллах $Tl_{0,9}In_{0,9}Sn_{0,1}Se_2$ на спектрах термостимульованих струмів спостерігається прямолінійна ділянка з нахилом 0,49 еВ. Що свідчить про наявність третього дефектного центра, який виконує роль t -рівня прилипання при $T > 250$ К, в монокристаллах $Tl_{0,9}In_{0,9}Sn_{0,1}Se_2$. Про пастки з $E_t = 0,5$ еВ та $E_t = 0,15$ еВ у монокристаллах $TlInSe_2$ повідомлялося авторами роботи [3]. Оскільки монокристали $Tl_{0,9}In_{0,9}Sn_{0,1}Se_2$ містять найменшу концентрацію атомів Sn, то можна зробити припущення про ідентичність природи центрів прилипання з глибиною залягання $E_t = 0,49$ еВ та $E_t = 0,2$ еВ з тими, що спостерігались авторами роботи [3].

4. ВИСНОВКИ

Особливістю низькотемпературної ($T \approx 36-200$ К) фотопровідності монокристалів $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$ є домішкова і власна фотопровідність. Для інтерпретації результатів дослідження спектрів фотопровідності запропонована модель двоцентрової рекомбінації, згідно з якою роль r -центрів повільної рекомбінації виконують дефекти V_{Tl} . Термічна енергія активації електронів з t -рівнів прилипання у монокристаллах $Tl_{0,75}In_{0,75}Sn_{0,25}Se_2$ становила 0,13 еВ та 0,28 еВ. Зменшення вмісту Sn в $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$ призводить до зменшення глибини залягання t -рівнів прилипання. У монокристаллах $Tl_{0,9}In_{0,9}Sn_{0,1}Se_2$ існує три дефектні центри, які виконують роль t -рівнів прилипання у різних температурних інтервалах.

Робота виконана за підтримки Міністерства освіти і науки України (Державний реєстраційний номер

0117U002303) в рамках державної бюджетної теми «Нові складні халькогеніди та галогеніди для нелінійної оптики, термо- та оптоелектроніки: синтез, структура і властивості».

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1]. S. N. Mustafaeva, M. M. Asadov, A. I. Dzhabbarov. Dielectric properties and charge transfer in $(TlInSe_2)_{0,1}(TlGaTe_2)_{0,9}$ for the DC and AC current // *Phys. Solid State*, 56(6), pp. 1096–1100 (2014).
- [2]. R. S. Madatov, A. I. Najafov, Yu. M. Mustafayev, M. R. Gazanfarov, I. M. Movsumova. Features of the electrical conductivity of $TlInSe_2$ under photoexcitation and X-ray excitation // *Semiconductors*, 49(9), pp. 1166–1169 (2015).
- [3]. R. S. Madatov, A. I. Nadzhafov, T. B. Tagiev, M. R. Gazanfarov. The mechanism of a current passing in $TlInSe_2$ monocrystals in strong fields // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 46(5), pp. 497–500 (2010).
- [4]. N. K. Tovstyuk. Optical studies of intercalated layer crystals as materials of functional electronics // *Sens. elektron. mikrosist. tehnol.*, 11(2), pp. 53–60 (2014).
- [5]. Y. M. Stakhira. Deformation modulation of electronic states in layered crystals // *Sens. elektron. mikrosist. tehnol.*, 14(4), pp. 27–36 (2017).
- [6]. Y. Stakhira, R. Stakhira. Piezophotconductivity spectra of semiconductor layered crystal // *Sens. elektron. mikrosist. tehnol.*, 13(4), pp. 44–49 (2016).
- [7]. A. Z. Abasova, R. S. Madatov, A. I. Nadzhafov, M. R. Hazanfarov. Vliyanie γ -oblucheniya na elektricheskiye i fotoelektricheskiye svoystva geteroperekhodov p- $TlInSe_2$ / n- $TlSe$ <Ge> // *Prikladnaya fizika*, №5, s. 112-117 (2011).
- [8]. K. Mimura, K. Wakita, M. Arita, N. Mamedov, G. Orudzhev, Y. Taguchi, K. Ichikawa, H. Namatame, M. Taniguchi. Angle-resolved photoemission study of quasi one-dimensional $TlInSe_2$ // *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* 156-158, pp. 379-382 (2007).
- [9]. M. -H. Yu. Seyidov, A. P. Odrinskii, R. A. Suleymanov, E. Acar, T. G. Mammadov, V. B. Alieva. Pyroelectric properties and structural defects of a layered $TlInS_2$ crystal doped with lanthanum // *Phys. Solid State*, 56(10), pp. 2028–2034 (2014).

- [10]. G. E. Davydyuk, O. Yu. Khyzhun, A. H. Reshak, H. Kamarudin, G. L. Myronchuk, S. P. Danylchuk, A. O. Fedorchuk, L. V. Piskach, M. Yu. Mozolyuk, O. V. Parasyuk. Photoelectrical properties and the electronic structure of $Tl_{1-x}In_xSn_xSe_2$ ($x=0, 0.1, 0.2, 0.25$) single crystalline alloys // *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 15(18), pp. 6965-6972 (2013).
- [11]. S. P. Danylchuk, G. L. Myronchuk, M. Yu. Mozolyuk, V. V. Bozhko. On the preparation and photoelectric properties of $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$ ($x=0.1-0.25$) alloys // *Semiconductors*, 50(1), pp. 38-42 (2016).
- [12]. O. V. Novosad, V. V. Bozhko, I. V. Kityk, V. Vertelis, A. Nekrosius, V. Kazukauskas. Photoelectrical and piezooptical properties of $Cu_{1-x}Zn_xInS_2$ solid solutions // *Sens. elektron. mikrosist. tehnol.*, 12(1), pp. 53-62 (2015).
- [13]. V. V. Serdyuk, G. G. Chemeresyuk, M. Terek. Fotoelektricheskie protsessyi v poluprovodnikah. Vysshaya shkola, Kiev-Odessa. 151 s. (1982).
- [14]. Richard H. Bube. Photoelectronic Properties of Semiconductors. Cambridge University Press, Cambridge. 318 pp. (1992).
- [15]. Peter T. Landsberg. Recombination in Semiconductors. Cambridge University Press, Cambridge. 595 pp. (1991)
- [16]. N. D. Ismailov, Ch. I. Abilov, M. S. Gasanova. On the photoconductivity of $TlInSe_2$ // *Semiconductors*, 51(5), pp. 632-635 (2017).
- [17]. V. V. Bozhko, A. V. Novosad, G. E. Davydyuk, O. V. Parasyuk, V. R. Kozher, O. R. Gerasymyk, N. Vainorius, V. Janonis, A. Sakavicius, V. Kazukauskas. Influence of cation-vacancy imperfection on the electrical and photoelectric properties of the $Cu_{1-x}Zn_xInS_2$ alloy // *Semiconductors*, 48(3), pp. 286-291 (2014).

UDC 621.315.592

DOI 10.18524/1815-7459.2018.1.125123

LOW-TEMPERATURE PHOTOCONDUCTIVITY AND THERMOSTYMLATED CONDUCTIVITY OF $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$ SINGLE CRYSTALS

V. Kazukauskas¹, G. L. Myronchuk², R. Garbacauskas¹, O. V. Parasyuk², S. Savicki¹, O. V. Novosad², S. P. Danylchuk², L. V. Piskach²

¹ Institute of Photonics and Nanotechnology, Vilnius University, Sauletekio al. 9/3, Vilnius, Lithuania, LT-10222, e-mail: vaidotas.kazukauskas@gmail.com

² Lesya Ukrainka Eastern European National University, 43025, 13 Volya Avenue, Lutsk, Ukraine, e-mail: ovosa@ukr.net

Summary

The purpose of this study is to explore the photoelectric properties $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$ single-crystal alloys at low temperatures as well as at studying the influence of imperfection on certain electrical and photoelectric properties of alloys, and determining of some parameters of these defects.

The $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$ alloy single crystals are grown by the horizontal variant of the Bridgman–Stockbarger method. The photoconductivity spectra were studied in the temperature range $T \approx 36-200$ K. The thermally stimulated conductivity was studied in the temperature range $T \approx 70-300$ K. The samples to be studied were obtained by cleaving the grown crystals in the central region of the single crystal ingot along the (001) cleavage plane. The crystal surfaces were specularly smooth, which allowed their

use for studies without any additional treatment. To perform photoelectric studies, samples shaped as parallelepipeds $4 \times 1 \times 0,2$ mm were cut from the plane-parallel cleavages. The electrical contacts were applied by indium fusing to opposite surfaces of the plates. Electrical measurements were performed with a Keithley 6430 Sub-Femtoamp SourceMeter.

The feature of the low-temperature photoconductivity of $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ single crystals is impurity- and induced photoconductivity, and long-term relaxation processes of photoconductivity were observed. Moreover the long-lasting relaxations with characteristic times $\sim 10^2\text{-}10^3$ sec were observed. To interpret the found results, a model of two-center recombination is suggested, according to which, acceptor levels, which are caused by V_{TI} , play the role of r-centers of slow recombination. The thermal activation energy of electrons from the attachment t-levels was 0,13 eV and 0,28 eV for $\text{Tl}_{0,75}\text{In}_{0,75}\text{Sn}_{0,25}\text{Se}_2$ single crystals. An decrease in the Sn content in the $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ single crystals leads to a decrease in the decrease the energy of these levels. In the $\text{Tl}_{0,9}\text{In}_{0,9}\text{Sn}_{0,1}\text{Se}_2$ single crystals there are three defect centers that act as t-levels at different temperature range.

Keywords: single crystals, defects, photoconductivity, thermally stimulated conductivity

УДК 621.315.592

DOI 10.18524/1815-7459.2018.1.125123

НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНА ФОТОПРОВІДНІСТЬ ТА ТЕРМОСТИМУЛЬОВАНА ПРОВІДНІСТЬ МОНОКРИСТАЛІВ

$\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$

*В. Кажукаускас¹, Г. Л. Мирончук², Р. Гарбачаускас¹, О. В. Парасюк², С. Савіцкі¹,
О. В. Новосад², С. П. Данильчук², Л. В. Піскач²*

¹Інститут фотоніки і нанотехнологій, Вільнюський університет, LT-10222 Вільнюс, Литва,
e-mail: vaidotas.kazukauskas@gmail.com

²Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк,
43025, e-mail: ovosa@ukr.net

Реферат

Мета роботи полягала у дослідженні фотоелектричних властивостей нових монокристалів $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ при низьких температурах з метою з'ясування впливу дефектів кристалічної структури на електропровідність і фотопровідність цих кристалів, а також визначенні деяких параметрів цих дефектів.

Монокристали $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ отримувались методом напрямленої кристалізації Бріджмена-Стокбаргера. Спектри фотопровідності досліджувались у температурному інтервалі $T \approx 36\text{-}200$ К. Спектри термотимуваних струмів у температурному інтервалі $T \approx 70\text{-}300$ К. Для досліджень електричних і фотоелектричних властивостей монокристалів $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ використовували плоскопаралельні сколи з середньої частини монокристалічного злитка уздовж площини спайності (001). Поверхні кристалів були дзеркально гладкими, що дозволило використовувати їх для досліджень без додаткової обробки. Для проведення вимірювань з плоскопаралельних сколів вирізали зразки у формі правильних паралелепіпедів розмірами $4 \times 1 \times 0,2$ мм. Омичні контакти наносилися вплавленням індію до торців зразків. Електричні вимірювання проводили електрометром Keithley 6430 Sub-Femtoamp SourceMeter.

Основні результати досліджень полягали у тому, що особливістю низькотемпературної фотопровідності монокристалів $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ є домішкова та індукована фотопровідність, а також довготривалі процеси релаксації фотопровідності. Оцінене значення часу релаксації фотопровідності становило $\sim 10^2\text{-}10^3$ с. Для інтерпретації явища індукованої фотопровідності запропонована модель двоцентрової рекомбінації, згідно з якою роль t -центрів повільної рекомбінації виконують дефекти V_{Tl} . Термічна енергія активації електронів з t -рівнів у монокристалах $\text{Tl}_{0,75}\text{In}_{0,75}\text{Sn}_{0,25}\text{Se}_2$ становила 0,13 еВ та 0,28 еВ. Зменшення вмісту Sn в $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ призводить до зменшення глибини залягання цих рівнів. У монокристалах $\text{Tl}_{0,9}\text{In}_{0,9}\text{Sn}_{0,1}\text{Se}_2$ існує три дефектні центри, які виконують роль t -рівнів прилипання у різних температурних інтервалах.

Ключові слова: монокристали, дефекти, фотопровідність, термостимульована провідність

Зміст журналу за 2017 рік (Том. 14, № 1-4)

Т. 14, №1-2017

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

<http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.1.96432>
Yu. A. Kruglyak, M. V. Strikha
 THE KINETIC BOLTZMANN EQUATION IN GENERALIZED MODEL OF ELECTRON TRANSPORT FOR MICRO- AND NANO-ELECTRONICS..... 5

Ю. О. Кругляк, М. В. Стріха
 КІНЕТИЧНЕ РІВНЯННЯ БОЛЬЦМАНА В УЗАГАЛЬНЕНІЙ МОДЕЛІ ТРАНСПОРТУ ЕЛЕКТРОНІВ У МІКРО- ТА НАНОЕЛЕКТРОНІЦІ

<http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.1.96434>
V. I. Voichuk, R. Ya. Leshko, D. S. Karpun
 LIGHT ABSORPTION OF SMALL CdS QUANTUM DOTS..... 21

В. І. Бойчук, Р. Я. Лешко, Д. С. Карпун
 ПОГЛИНАННЯ СВІТЛА МАЛИМИ КВАНТОВИМИ ТОЧКАМИ CdS

Хімічні сенсори
Chemical sensors

<http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.1.96436>
I. K. Doycho, S. A. Geveliyuk, Ya. I. Lepikh, E. Rysiakiewich-Pasek
 FEATURES OF GAS-SENSIBILITY OF DYES ON THE BASE OF 4-VALENCE STANNUM COMPLEXES.... 31

І. К. Дойчо, С. А. Гевелюк, Я. І. Лепіх, Е. Ришякевич-Пасек
 ОСОБЛИВОСТІ ГАЗОЧУТЛИВОСТІ БАРВНИКІВ НА БАЗІ КОМПЛЕКСІВ

4-ВАЛЕНТНОГО СТАНУМУ
Біосенсори
Biosensors

<http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.1.96438>
I. Podgurska, A. Rachkov
 INFLUENCE OF HEAVY METAL IONS ON THE PHOTOLUMINESCENCE OF NANOCRYSTALS AgInS₂/ZnS..... 41

І. Подгурська, А. Рачков
 ВПЛИВ ІОНІВ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ НА ФОТОЛЮМІНЕСЦЕНЦІЮ НАНОКРИСТАЛІВ AgInS₂/ZnS

<http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.1.96439>
I. S. Kucherenko, O. V. Soldatkina, D. Yu. Kucherenko, O. O. Soldatkin, S. V. Dzyadevych
 ADAPTATION OF THE PROCEDURE FOR POLYPHENYLENE MEMBRANE DEPOSITION ON THE DISK PLATINUM TRANSDUCERS..... 48

І. С. Кучеренко, О. В. Солдаткіна, Д. Ю. Кучеренко, О. О. Солдаткін, С. В. Дзядевич
 АДАПТАЦІЯ ПРОЦЕДУРИ НАНЕСЕННЯ ПОЛІФЕНІЛЕНДІАМІНОВОЇ МЕМБРАНИ НА ДИСКОВІ ПЛАТИНОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Матеріали для сенсорів
Sensor materials

<http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.1.96441>
S. V. Luniov, A. I. Zimych, M. V. Khvyshchun, V. T. Maslyuk, I. G. Megela
 The influence of electron irradiation on tensoresistance of single crystals n-Ge 58

С. В. Луньов, А. І. Зімич, М. В. Хвищун, В. Т. Маслюк, І. Г. Мегела
 Вплив електронного опромінення на тензоопір монокристалів n-Ge

**Технологія виробництва сенсорів
Sensors production technologies**

<http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.1.96442>
Ya. I. Lepikh, P. O. Snigur, A. P. Balaban
METHOD OF STENCILING IN TECHNOLOGY OF DEVICES ON SURFACES ACOUSTIC WAVES..... 66

Я. І. Леніх, П. О. Снігур, А. П. Балабан
МЕТОД ТРАФАРЕТНОГО ДРУКУ В ТЕХНОЛОГІЇ ПРИСТРОЇВ НА ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЯХ

Т. 14, № 2-2017

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

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

В. М. 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

<http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.2.106603>
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. Кругльак, М. В. Стріха
ВИМІРЮВАННЯ ПРОВІДНОСТІ Й АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРІВ У РАМКАХ УЗАГАЛЬНЕНОЇ МОДЕЛІ ТРАНСПОРТУ ЕЛЕКТРОНІВ

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

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

<http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.2.106605>
V. I. Santoniy, I. A. Ivanchenko, L. M. Budi-yanskaya
RESEARCH OF AEROSOL FORMATION INFLUENCE ON OPTICAL LOCATIONAL DEVICES OPERATION 55

В. І. Сантоній, І. О. Іванченко, Л. М. Будіянська
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ АЕРОЗОЛЬНИХ УТВОРЕНЬ НА РОБОТУ ОПТИКО-ЛОКАЦІЙНИХ ПРИСТРОЇВ

**Акустоелектронні сенсори
Acoustoelectronic sensors**

<http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.2.106606>
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**Біосенсори****Biosensors**<http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.2.106608>*О. О. 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*О. О. 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*Т. 14, № 3-2017***Фізичні, хімічні та інші явища, на основі
яких можуть бути створені сенсори**
**Physical, chemical and other phenomena, as
the bases of sensors**<http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.3.111403>*Yu. A. Kruglyak, M. V. Strikha*COULOMB BLOCADE AND
SINGLE-ELECTRON TRANSISTOR
WITHIN “BOTTOM – UP” APPROACH IN
MODERN NANOELECTRONICS
AND WITHIN TRADITIONAL
“UP – BOTTOM” CONCEPT 5*Ю. О. Кругляк, М. В. Стріха*
КУЛОНІВСЬКА БЛОКАДА ТА
ОДНОЕЛЕКТРОННИЙ ТРАНЗИСТОР У
РАМКАХ КОНЦЕПЦІЇ «ЗНИЗУ – ВГОРУ»
СУЧАСНОЇ НАНОЕЛЕКТРОНІКИ ТА В
ТРАДИЦІЙНІЙ КОНЦЕПЦІЇ «ЗГОРИ –
ВНИЗ»**Проектування і математичне моделювання
сенсорів****Sensors design and mathematical modeling**<http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.3.111406>*A. V. Glushkov, O. Yu. Khetselius, Yu. Ya. Bunyakova, V. V. Buyadzhi, Yu. V. Dubrovskaya, A. A. Kuznetsova*NEW APPROACH AND MICROSYSTEM
TECHNOLOGY OF ADVANCED NON-
LINEAR ANALYSIS AND MODELLING
CHAOTIC ENVIRONMENTAL
RADIOACTIVITY DYNAMICS..... 24*О. В. Глушков, Ю. Я. Бунякова, В. В. Буйаджи, Ю. В. Дубровська, Г. О. Кузнецова, О. Ю. Хецелиус*НОВИЙ ПІДХІД І МІКРОСИСТЕМНА
ТЕХНОЛОГІЯ ВДОСКОНАЛЕНОГО
НЕЛІНІЙНОГО АНАЛІЗУ І
МОДЕЛЮВАННЯ ХАОТИЧНОЇ
ДИНАМІКИ КОНЦЕНТРАЦІЙ
РАДІОНУКЛІДІВ У НАВКОЛИШНЬОМУ
СЕРЕДОВИЩУ**Оптичні, оптоелектронні і радіаційні
сенсори****Optical and optoelectronic and radiation
sensors**<http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.3.109330>*I. O. Lysiuk, A. G. Golenkov, S. E. Dukhnin, V. P. Reva, A. V. Shevchik-Sheker, F. F. Sizov*
SUB-THz/THz RADIATION DETECTOR
DEVICE BASED ON Si-MOSFET..... 38*И. А. Лысюк, А. Г. Голенков, С. Е. Духнин, В. П. Рева, А. В. Шевчик-Шекера, Ф. Ф. Сизов*
ОДНОЭЛЕМЕНТНОЕ ПРИЕМНОЕ
УСТРОЙСТВО ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ
ИЗЛУЧЕНИЯ СУБ-ТГц/ТГц ДИАПАЗОНА
НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВОГО ПОЛЕВОГО
ТРАНЗИСТОРА

Акустoeлектронні сенсори
Acoustoelectronic sensors

<http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.3.111407>

Ya. I. Lepikh

FORMATION OF THE DEVICES ON THE SAW CHARACTERISTICS BY A METHOD OF SELECTIVE POLARIZATION 47

Я. І. Леніх

ФОРМУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИБРОЇВ НА ПАХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЇ

Матеріали для сенсорів
Sensor materials

<http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.3.105564>

I. V. Horichok, I. M. Lischynskyy, S. I. Mudryy, A. S. Oberemok, T. O. Semko, I. M. Hatsevykh, O. M. Matkivskyy, G. D. Mateyik, R. O. Dzumedzey
TECHNOLOGICAL ASPECTS OBTAINING OF THE THERMOELECTRIC PbTe..... 53

I. B. Gorichok, I. M. Litsynskiy, S. I. Mudryy, O. S. Oberemok, T. O. Semko, I. M. Hachevich, O. M. Matkivskiy, G. D. Mateik, R. O. Dzumedzey
ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ОТРИМАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО PbTe

Сенсори та інформаційні системи
Sensors and information systems

<http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.3.111408>

Yu. Ya. Bunyakova, A. V. Glushkov, O. Yu. Khetselius, V. V. Buyadzhi, A. V. Ignatenko, N. Bykowszczenko
NEW APPROACH AND MICROSYSTEM TECHNOLOGY OF ADVANCED ANALYSIS AND FORECASTING THE AIR POLLUTANT CONCENTRATION TEMPORAL DYNAMICS IN ATMOSPHERE OF THE INDUSTRIAL CITIES 65

Ю. Я. Бунякова, О. В. Глушков, О. Ю. Хецеліус, Г. В. Ігнатенко, Н. Биковищенко, В. В. Буяджи
НОВИЙ ПІДХІД І МІКРОСИСТЕМНА

ТЕХНОЛОГІЯ ВДОСКОНАЛЕНОГО АНАЛІЗУ І ПРОГНОЗУ ЧАСОВОЇ ДИНАМІКИ КОНЦЕНТРАЦІЙ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН В АТМОСФЕРІ ПРОМИСЛОВИХ МІСТ

Деградація, метрологія і сертифікація сенсорів
Sensor's degradation, metrology and certification

<http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.3.109115>

O. Kochan

THEORETICAL FUNDAMENTALS OF ESTIMATION OF THERMOCOUPLE LEG CONDITIONS DURING OPERATION 79

О. Кочан

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНКИ СТАНУ ЕЛЕКТРОДІВ ТЕРМОПАР У ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

T. 14, № 4-2017

Хімічні сенсори
Chemical sensors

<http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.4.116007>

O. Kutova, M. Dusheyko, T. Obuhova, N. Maksimchuk, T. Borodinova, V. Timofeev
H₂O₂ SENSOR BASED ON MOSFET WITH ACTIVE BACK-GATE PART OF SUBSTRATE 5

О. Кутова, М. Душейко, Т. Обухова, Н. Максимчук, Т. Бородінова, В. Тимофєєв
СЕНСОР ПЕРЕКИСУ ВОДНЮ НА ОСНОВІ МДН-ТРАНЗИСТОРА З АКТИВНИМ ШАРОМ В ОБЛАСТІ ПІДКЛАДКИ

Біосенсори
Biosensors

<http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.4.119596>

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

DEVELOPMENT OF AMPEROMETRIC
BIOSENSOR SYSTEM FOR
SIMULTANEOUS DETERMINATION
OF PYRUVATE AND LACTATE 13

Я. В. Топольнікова, Д. В. Книжникова, І. С. Кучеренко, С. В. Дзядевич, О. О. Солдаткін
РОЗРОБКА АМПЕРОМЕТРИЧНОЇ
БІОСЕНСОРНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ
ОДНОЧАСНОГО ВИМІРЮВАННЯ
ПІРУВАТУ І ЛАКТАТУ

Матеріали для сенсорів
Sensor materials

<http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.4.119599>

У. М. Stakhira
DEFORMATION MODULATION OF
ELECTRONIC STATES IN LAYERED
CRYSTALS..... 27

Й. М. Стахіра
ДЕФОРМАЦІЙНЕ МОДУЛЮВАННЯ
ЕЛЕКТРОННИХ СТАНІВ У ШАРУВАТИХ
КРИСТАЛАХ

Сенсори та інформаційні системи
Sensors and information systems

<http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.4.119600>

О. Ю. Khetselius, А. V. Glushkov, Ю. Ya. Buniakova, V. V. Buyadzhi, О. I. Bondar, V. N. Vaschenko, N. Bykowszczenko

NEW APPROACH AND MICROSYSTEM
TECHNOLOGY TO MODELLING
DYNAMICS OF ATMOSPHERE
VENTILATION OF INDUSTRIAL CITY
AND ELEMENTS OF THE
“GREEN-CITY” CONSTRUCTION
TECHNOLOGY 37

О. Ю. Хецеліус, О. В. Глушков, Ю. Я. Бунякова, В. В. Буяджи, О. І. Бондарь, В. М. Ващенко, Н. Биковицzenko

НОВИЙ ПІДХІД І МІКРОСИСТЕМНА
ТЕХНОЛОГІЯ МОДЕЛЮВАННЯ
ДИНАМІКИ АТМОСФЕРНОЇ ВЕНТИЛЯЦІЇ
ПРОМИСЛОВОГО МІСТА ТА ЕЛЕМЕНТИ

ТЕХНОЛОГІЇ БУДІВНИЦТВА « GREEN-
CITY»

<http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.4.119603>

А. V. Glushkov, А. V. Romanova, V. V. Buyadzhi, E. V. Bakunina, О. Ю. Khetselius, А. А. Svinarenko, А. S. Belodonov

NEW BALANCE APPROACH TO THE
MODELING OF MACROTURBULENT
ATMOSPHERIC DYNAMICS, SPATIAL
DISTRIBUTION OF RADIONUCLIDES
IN THE GLOBAL ATMOSPHERE, THEIR
ENVIRONMENT IMPACT AFTER THE
NUCLEAR ACCIDENT AT FUKUSHIMA
NUCLEAR POWER PLANT..... 47

А. В. Глушков, А. В. Романова, В. В. Буяджи, Е. В. Бакунина, О. Ю. Хецеліус, А. А. Свиначенко, А. С. Белодонов

НОВИЙ БАЛАНСОВИЙ ПІДХІД ДО
МОДЕЛЮВАННЯ МАКРОТУРБУЛЕНТНОЇ
АТМОСФЕРНОЇ ДИНАМІКИ,
ПРОСТОРОВОГО РОЗПОДІЛУ
РАДІОНУКЛІДІВ В ГЛОБАЛЬНІЙ
АТМОСФЕРІ, ЇХ ВПЛИВУ НА
НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ ПІСЛЯ
ЯДЕРНОЇ АВАРІЇ НА АЕС ФУКУСИМА

<http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.4.119604>

V. V. Buyadzhi, А. V. Glushkov, M. Yu. Gurskaya, О. Ю. Khetselius, E. B. Ternovsky, А. А. Mashkantsev, S. V. Kirianov

A NOVEL COMBINED CHAOS-GEOMETRIC
AND VIBRATION BLIND SOURCE
MONITORING APPROACH TO DAMAGE
ANALYSIS AND DETECTION
OF ENGINEERING STRUCTURES
(NUCLEAR POWER PLANTS) UNDER
VARYING ENVIRONMENTAL,
OPERATIONAL CONDITIONS AND
EMERGENCY ACCIDENTS..... 60

В. В. Буяджи, О. В. Глушков, М. Ю. Гурська, О. Ю. Хецеліус, Є. В. Терновський, О. А. Машканцев, С. В. Кір'янов

НОВИЙ КОМБІНОВАНИЙ ХАОС-
ГЕОМЕТРИЧНИЙ ПІДХІД І BLIND
SOURCE МОНІТОРИНГ ДО АНАЛІЗУ

І ДЕТЕКТУВАННЯ УШКОДЖЕНЬ
ІНЖЕНЕРНИХ СТРУКТУР
(ЯДЕРНІ РЕАКТОРИ) ПРИ ЗМІНІ
ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ УМОВ, УМОВ
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА,
АВАРІЙНИХ ІНЦИДЕНТІВ

<http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.4.119607>

Yu. Ya. Bunyakova, V. B. Ternovsky, Yu. V. Dubro-vskaya, A. V. Ignatenko, A. A. Svinarenko, L. A. Vitavetskaya

ANALYSIS OF THE BERYLLIUM-7
ACTIVITY CONCENTRATION DYNAMICS
IN THE ATMOSPHERIC ENVIRONMENT
TIME SERIES AFTER THE FUKUSHIMA
DAPICHI NUCLEAR POWER PLANTS
EMERGENCY 73

Ю. Я. Бунякова, В. Б. Терновський, Ю. В. Дубровська, Г. В. Ігнатенко, А. А. Свинаренко, Л. А. Вітаветська

АНАЛІЗ ДИНАМІКИ КОНЦЕНТРАЦІЇ
РАДІОНУКЛІДА BERYLLIUM-7 В

АТМОСФЕРНОМУ СЕРЕДОВИЩУ НА
ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЧАСОВИХ РЯДІВ
ПІСЛЯ АВАРІЙНОЇ СИТУАЦІЇ НА
АТОМНІЙ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ
FUKUSHIMA DAPICHI

<http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.4.119611>

V. B. Ternovsky, A. V. Glushkov, A. V. Smirnov, A. A. Kuznetsova, O. Yu. Khetselius, V. V. Buyadzhi

AN ADVANCED LASER
PHOTOIONIZATION SEPARATION
SCHEME FOR RADIOACTIVE
ISOTOPES AND PRODUCTS OF ATOMIC
ENERGETICS: URANIUM AND
THE TRANSURANIUM ELEMENTS..... 83

В. Б. Терновський, О. В. Глушков, А. В. Смірнов, Г. А. Кузнецова, О. Ю. Хецеліус, В. В. Буяджи

УДОСКОНАЛЕНА ЛАЗЕРНО-
ФОТОІОНІЗАЦІЙНА СХЕМА ПОДІЛЕННЯ
РАДІОАКТИВНИХ ІЗОТОПІВ ТА
ПРОДУКТІВ АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ:
УРАН ТА ТРАНСУРАНОВІ ЕЛЕМЕНТИ



**СЕНСОРНА ЕЛЕКТРОНІКА
ТА МІКРОСИСТЕМНІ ТЕХНОЛОГІЇ**
**SENSOR ELECTRONICS AND
MICROSYSTEM TECHNOLOGIES**



Перше інформаційне повідомлення

Міністерство освіти і науки України, Відділення фізики і астрономії Національної академії наук України, Наукова рада з проблеми “Фізика напівпровідників та напівпровідникові пристрої” Національної академії наук України, Українське фізичне товариство, Академія наук вищої школи України, Інститут фізики напівпровідників ім. В.С. Лашкарьова НАН України, Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр МОН і НАН України

п р о в о д я т ь

**8-му Міжнародну науково-технічну конференцію
“Сенсорна електроніка та мікросистемні технології”
(СЕМСТ-8)
(з виставкою розробок та промислових зразків сенсорів)
“СЕМСТ-8”, Україна, Одеса, 28 травня – 1 червня 2018 р.**

Метою конференції та виставки є розгляд досягнень у цій галузі і широке обговорення сучасних проблем у різних напрямках сенсоріки

Голова конференції професор **Сминтина В.А.**(Одеса, Україна)
Заступник голови професор **Д’Аміко А.** (Рим, Італія)
Заступник голови член-кореспондент НАНУ **Беляєв О.Є.** (Київ, Україна)
Заступник голови член-кореспондент НАНУ **Литовченко В.Г.** (Київ, Україна)
Учений секретар професор **Леніх Я.І.** (Одеса, Україна)

Програмний комітет

Голова програмного комітету проф. Сминтина В.А.

Блонський І.В. чл.-кор. НАНУ (Київ, Україна)	Коваленко О.В. проф. (Дніпро, Україна)	Стародуб М.Ф. проф. (Київ, Україна)
Бойчук В.І. проф. (Дрогобич, Україна)	Корбутяк Д.В. проф. (Київ, Україна)	Стахіра Й.М. проф. (Львів, Україна)
Бродин М.С. акад. НАНУ (Київ, Україна)	Линючева О.В. проф. (Київ, Україна)	Стогній В.С. к.т.н. (Київ, Україна)
Вербицький В.Г. проф. (Київ, Україна)	Локтев В.М. акад. НАНУ (Київ, Україна)	Стріха М.В. проф. (Київ, Україна)
Вікулін І.М. проф. (Одеса, Україна)	Мельник В.П. проф. (Київ, Україна)	Стронський О.В., д.ф.-м.н. (Київ, Україна)
Готра З. проф. (Львів, Україна)	Моранте Дж. Р. проф. (Барселона, Іспанія)	Тігіняну І. акад. (Кишинів, Молдова)
Гриньов Б.В. акад. НАНУ (Київ, Україна)	Находкін М.Г. акад. НАНУ (Київ, Україна)	Ткач М.В. проф. (Чернівці, Україна)
Ді Натале К. проф. (Рим, Італія)	Неізнестний І.Г. чл.-кор. РАН (Новосибірськ, Росія)	Хартнагель Х. Л. проф. (Дармштадт, Німеччина)
Дмитрук М.Л. проф. (Київ, Україна)	Никируй Л.І. проф. (Ів.-Франківськ, Україна)	Шерегій Є. проф. (Жешув, Польща)
Дружинін А.О. проф. (Львів, Україна)	Прокопенко І.В. проф. (Київ, Україна)	Шовелон Ж.-М. проф. (Цедекс, Франція)
Єльська Г.В. акад. НАНУ (Київ, Україна)	Птащенко О.О. проф. (Одеса, Україна)	Якименко Ю.І. акад. НАНУ (Київ, Україна)
Івасишин О.М. акад. НАНУ (Київ, Україна)	Рябченко С.М. чл.-кор. НАНУ (Київ, Україна)	Яковенко В.М. акад. НАНУ (Харків, Україна)
Ільченко М.Ю. акад. НАНУ (Київ, Україна)	Сизов Ф.Ф. чл.-кор. НАНУ (Київ, Україна)	Яценко Л.П. акад. НАНУ (Київ, Україна)
Калашников О.М. проф. (Ноттингем, Велика Британія)	Скришевський В.А. проф. (Київ, Україна)	Ящук В.М. проф. (Київ, Україна)
Кияк Б. Р. проф. (Київ, Україна)	Сліпченко М.І. проф. (Харків, Україна)	
Кладько В.П., чл.-кор. НАНУ (Київ, Україна)		

Організаційний комітет:

Лепіх Я.І. – голова	Вілінська Л.М	Лавренова Т.І.
Борщак В.А. – секретар	Затовська Н.П.	Миндру В.Б.
Балабан А.П.	Іванченко І.О.	Ніцук Ю.А.
Бритавський Є.В.	Карпенко А.О.	Терещенко А.В.
Будянська Л.М.	Куталова М.І.	Філевська Л.М.
Ваксман Ю.Ф.		

Попередній список запрошених доповідачів

Беляєв О.С. (Київ, Україна)	Корбутяк Д.В. (Київ, Україна)	Стародуб М.Ф. (Київ, Україна)
Блонський І.В. (Київ, Україна)	Лепіх Я.І. (Одеса, Україна)	Стахіра Й.М. (Львів, Україна)
Гордієнко Ю.О. (Харків, Україна)	Литовченко В.Г. (Київ, Україна)	Стріха М.В. (Київ, Україна)
Д’Аміко А. (Рим, Італія)	Мельник Р. проф. (Ватерлоо, Канада)	Ткач М.В. (Черівці, Україна)
Дмитрук М.Л. (Київ, Україна)	Назаров О.М. (Київ, Україна)	Чегель В.І. (Київ, Україна)
Дружинін А.О. (Львів, Україна)	Неізнаний І.Г. (Новосибірськ, Росія)	Шовелон Ж-М (Цедекс, Франція)
Єльська Г.В. (Київ, Україна)	Сизов Ф.Ф. (Київ, Україна)	Шерегій Є. (Ржешув, Польща)
Калашников О.М. (Ноттингем, Велика Британія)	Скришевський В.А. (Київ, Україна)	Шпилевський С.М. (Мінськ, Білорусь)
	Смнтина В.А. (Одеса, Україна)	Якименко Ю.І. (Київ, Україна)
		Ящук В.М. (Київ, Україна)

Примітка. Список запрошених доповідачів може бути доповнений

Наукові напрями конференції:

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

Тези доповідей будуть видані перед початком роботи конференції.

Вимоги до тез

Обсяг тез: одна повна сторінка, запрошені доповіді – дві.

Тези рецензуються. В тезах мають бути показані актуальність задачі, отримані науково-технічні результати та їх новизна.

Текст набирати на аркуші формату А4 з полями: ліве – 3,0 см, решта по –2,5 см в редакторі WinWord шрифтом Times New Roman. Назва – **жирним шрифтом** 14 pt, прізвища авторів -12 pt, інформація, яка стосується місця роботи авторів і адреса – курсивом 12 pt, все по центру, текст – 12 pt. Між рядками один інтервал. Серед авторів підкреслити доповідача, бажано його поставити на перше місце, оскільки листування буде вестися з першим (або підкресленим) автором. Надсилати тези та реєстраційні форми на кожного співавтора електронною поштою на e-mail semst-8@onu.edu.ua.
Формули набирати у редакторі формул MS Word Equation або MathType. Всі підписи всередині рисунків, а також формули повинні бути шрифтом величиною 12 pt.

Умови публікації тез, прийнятих Програмним комітетом:

- сплата оргвнеску (**одержане Оргкомітетом підтвердження із вказаним прізвищем учасника, доповідача**) у визначений в інформаційному повідомленні термін;
- повна доповідь (відповідно прийнятим тезам).

Від одного автора приймається не більше двох тез.

За рекомендацією програмного комітету доповіді у форматі статті можуть бути опубліковані в науково-технічних журналах: “Сенсорна електроніка і мікросистемні технології”, “Semicond. Phys. Quant. Electron. Optoelectron.”, “Функціональні матеріали”, “Фотоелектроніка”.

Робочі мови конференції: українська, англійська, російська

Організаційний внесок за участь в конференції становить

для учасників з України	– 400 грн. (\$ по курсу на день розрахунку)
для учасників з СНД	– 600 грн. (\$ по курсу на день розрахунку)
з інших держав	– 1000 грн (\$ по курсу на день розрахунку)
для супроводжуючих осіб	– 200 грн (\$ по курсу на день розрахунку)

Сума оргвнеску вказана з врахуванням ПДВ.

Для аспірантів оргвнесок становить 50% від вказаного вище.

Для членів Українського фізичного товариства, що сплачують членські внески, надається знижка оргвнеску на 10 %.

Виставка

Участь у виставці безкоштовна. Заявка на участь у виставці подається до 30.03.18 і повинна містити короткий опис експонатів і необхідних умов експонування.

Основні дати конференції:

Прийом реєстраційних карток, тез доповідей і заявок на участь у виставці	до 30.03.18
2 ^е інформаційне повідомлення	до 15.04.18
Прийом повних доповідей	до 20.05.18
Прийом оргвнеску	до 15.05.18
Реєстрація і розміщення учасників	28.05.18

Додаткова інформація

1. Одеса має пряме сполучення з багатьма країнами світу:
 - авіарейси: Варшава, Відень, Стамбул, Хайфа та ін.
 - залізниця: Берлін, Варшава, Мінськ та ін.
 - морський транспорт: Стамбул, Хайфа та ін.
 - автобуси: Барселона, Берлін, Дрезден, Ліон, Ліссабон, Мадрид, Марсель, Мюнхен, Париж, Прага та ін.
2. Проживання учасників планується в готелях, санаторії та в гуртожитках університету. У м. Одесі в цей час тепло і сухо, середня температура повітря становить 23-27°C, працюють зони відпочинку на березі моря. Планується культурна програма, в рамках якої бажаючі зможуть ознайомитися з визначними пам'ятками Одеси, здійснити морську прогулянку та інше.

Спонсори конференції та організаційна підтримка

Для фінансової підтримки конференції запрошуюються спонсори як з України, так і з закордону. Спонсори будуть спеціальним чином (за бажанням – з їх товарним знаком чи логотипом) вказані в інформаційних матеріалах конференції, що призначені для розсилки в більшість країн світу (більше 3 тисяч абонентів, у тому числі більше 500 фірм і організацій) і вказані на сайті конференції. З пропозиціями звертатись за нашими реквізитами.

Адреса для листування:

МННФТЦ, Оргкомітет “СЕМСТ-8”,
Одеський національний університет імені І.І.Мечникова
вул. Дворянська, 2, м. Одеса, 65082, Україна,
тел./факс +38(048)-723-34-61, Лепіх Ярослав Ілліч
E-mail: semst-8@onu.edu.ua, ndl_lepikh@onu.edu.ua
Додатково: інформація про конференцію розміщена на веб-стор:
<http://semst-8.onu.edu.ua/>



**СЕНСОРА ЕЛЕКТРОНІКА
ТА МІКРОСИСТЕМНІ ТЕХНОЛОГІЇ**
**SENSOR ELECTRONICS AND
MICROSYSTEM TECHNOLOGIES**



Call for papers

Ministry of Education and Science of Ukraine, Department of physics and astronomy of the National academy of sciences of Ukraine, Scientific Council of NASU on the problem "Physics of Semiconductors and Semiconductor Devices", Ukrainian Physical Society, the Academy of sciences of the higher school of Ukraine, V.E. Lashkaryov Institute for Semiconductor Physics of NASU, Odessa I. I. Mechnikov National University, Interdepartmental scientific-educational physics and technical centre of MES and NAS of Ukraine

Hold

**8th International Scientific and Technical Conference “Sensor Electronics and
Microsystem Technologies (SEMST-8)”**
(with the Exhibition of sensor developments and industrial samples)
“SEMST-7”, Ukraine, Odessa, May 28 – June 1, 2018

The aim of the conference and the exhibition is to review achievements in the field and to discuss modern problems in various branches of Sensorics

Chairmen Prof. **V.A. Smyntyna** (Odessa, Ukraine)

Vice-chairmen Prof. **A.D Amico** (Rome, Italy)

Vice-chairmen NASU corresponding member **A.E. Belyaev** (Kiev, Ukraine)

Vice-chairmen NASU corresponding member **V.G. Litovchenko** (Kiev, Ukraine)

Scientific secretary Prof. **Ya.I. Lepikh** (Odessa, Ukraine)

Program committee:

Chairmen of the Program committee Prof. V.A. Smyntyna

Blonsky I.V. NASU Cor. Memb. (Kiev, Ukraine)	Klad'ko V.P. NASU Cor. Memb. (Kiev, Ukraine)	Slipchenko M.I. Prof. (Kharkov, Ukraine)
Boichuk V.I. Prof. (Drogobych, Ukraine)	Korbutyak D.V. Prof. (Kiev, Ukraine)	Sheregiy E. Prof. (Rzeszow, Poland)
Brodin M.S. Acad. NASU (Kiev, Ukraine)	Kovalenko A.V. Prof. (Dnipro, Ukraine)	Starodub M.F. Prof. (Kiev, Ukraine)
Chovelon G.M. Prof. (Cedex, France)	Linyucheva O.V. Prof. (Kiev, Ukraine)	Stakhira I.M. Prof. (Lvov, Ukraine)
Di Natale C. Prof. (Roma, Italy)	Loktev V.M. Acad. NASU (Kiev, Ukraine)	Strikha M.V. Prof. (Kiev, Ukraine)
Dmitruk M.L. Prof. (Kiev, Ukraine)	Mel'nik V.P. Prof. (Kiev, Ukraine)	Stronskiy O.V. Dr.Sc. (Kiev, Ukraine)
Druzhynin A.O. Prof. (Lvov, Ukraine)	Morante J.R. Prof. (Barcelona, Spain)	Tiginyanu I. Acad. (Kyshyniv, Moldova)
El'skaya A.V. Acad. NASU (Kiev, Ukraine)	Nakhodkin M.G. Acad. (Kiev, Ukraine)	Tkach M.V. Prof. (Chernivtsy, Ukraine)
Grynyov B.V. Acad. NASU (Kiev, Ukraine)	Neizvestniy I.G. RAS Cor. Memb. (Novosibirsk, Russia)	Verbitskiy V.G. Prof. (Kiev, Ukraine)
Hartnagel H.L. Prof. (Darmstadt, Germany)	Nykyruj L.I. Prof. (Ivano-Frankivs'k, Ukraine)	Vikulin I.M. Prof. (Odessa, Ukraine)
Il'chenko M.Yu. Acad. NASU (Kiev, Ukraine)	Prokopenko I.V. Prof. (Kiev, Ukraine)	Yakimenko Yu.I. Acad. NASU (Kiev, Ukraine)
Ivasyshin O.M. Acad. NASU (Kiev, Ukraine)	Ptaschenko O.O. Prof. (Odessa, Ukraine)	Yakovenko V.M. Acad. NASU (Kharkov, Ukraine)
Kalashnikov A.N. Prof. (Nottingham, United Kingdom)	Riabchenko S.M. NASU Cor. Memb. (Kiev, Ukraine)	Yashchuk V.M. Prof. (Kiev, Ukraine)
Kiyak B.R. Prof. (Kiev, Ukraine)	Sizov F.F. NASU Cor. Memb. (Kiev, Ukraine)	Yatsenko L.P. Acad. NASU (Kiev, Ukraine)
	Skrishvskiy V.A. Prof. (Kiev, Ukraine)	

Organizing committee

Lepikh Ya.I. – chairman	Filevskaya L.M.	Myndru V.B.
Borschak V.A. – secretary	Ivanchenko I.O.	Nitsuk Yu.A.
Balaban A.P.	Karpenko A.O.	Tereschenko A.V.
Britavskii E.V.	Kutalova M.I.	Vaksman Yu.F.
Budiyanskaya L.M.	Lavrenova T.I.	Vilinskaya L.V.
		Zatovskaya N.P.

The preliminary list of invited speaker

Belyaev A.E. (Kiev, Ukraine)	Korbutyak D.V. (Kiev, Ukraine)	Smyntyna V.A. (Odessa, Ukraine)
Blonsky I.V. (Kiev, Ukraine)	Lepikh Ya.I. (Odessa, Ukraine)	Stakhira I.M. (Lvov, Ukraine)
Chovelon G.M. (Cedex, France)	Litovchenko V.G. (Kiev, Ukraine)	Strikha M.V. (Kiev, Ukraine)
Chegel' V.I. (Kiev, Ukraine)	Melnik R. (Waterloo, Kanada)	Starodub M.F. (Kiev, Ukraine)
D'Amico A. (Rome, Italy)	Nazarov O.M. (Kiev, Ukraine)	Tkach M.V. (Chernivtsi, Ukraine)
Dmytruk M.L. (Kiev, Ukraine)	Neizvestnyi I.G. (Novosibirsk, Russia)	Yakimenko Yu.I. (Kiev, Ukraine)
Druzhynin A.A. (Lvov, Ukraine)	Sizov F.F. (Kiev, Ukraine)	Yashchuk V.M. (Kiev, Ukraine)
El'skaya A.V. (Kiev, Ukraine)	Sheregiy E. (Rzeszow, Poland)	
Gordienko Yu.O. (Kharkov, Ukraine)	Shpilevskiy E.M. (Minsk, Belarus)	
Kalashnikov O.M. (Nottingham, United Kingdom)	Skrishhevskiy V.A. (Kiev, Ukraine)	

Comment. The list of invited speakers may be extended

Tentative key topics:

1. Physical, chemical and other phenomena, as foundations for sensor developments
2. Sensor design and mathematical modeling
3. Physical sensors
4. Chemical sensors
5. Biosensors
6. Radiation, optical and optoelectronics sensors
7. Acoustoelectronic sensors
8. Nanosensors (physics, materials, technologies)
9. Sensors and information systems
10. Sensor materials
11. Sensor technology problems
12. Microsystems technologies (MST, LIGA-technology and others)
13. Sensor degradation, metrology and certification

The Book of abstracts will be available at the conference registration.

The requirements to the abstracts

Abstracts are reviewed. In abstracts the urgency of the problem, the received scientific and technical results and their novelty should be shown.

The one-full-page abstract (two-page for the invited authors only) should be printed in black print on white paper (format A4) and formatted as follows: the left margin 3 cm, others – 2,5cm. The recommended font is “Times New Roman”. Center the title (capital letters, **bold**, 14 pt). One blank line. The authors' names (normal font, 12pt), their affiliation(s), postal address and e-mail address for the corresponding author (italic, 12 pt). Underline the speaker among the authors. Please mention the corresponding author first. Leave one line blank. The font size for the main text is 12 pt, single interval spacing. Please send your abstracts and pre-registration form for each author on e-mail - semst-8@onu.edu.ua. The preferred equation editor is MS Equation editor, 12 pts font size. The font size for figure captions is 12 pts.

Conditions for the publication of theses accepted by the Program committee:

- conference fee payment (received by the Organizing Committee confirmation with the indication of the participant or the lecturer surname) in the specified in this information term;
- full report (appropriate to the accepted theses).

No more than two abstracts will be accepted from one author.

The papers selected by the Program committee may be published in special issue of international scientific journals: “Sensor Electronics and Microsystem Technologies“, "Semicond. Phys. Quant. Electron. Optoelectron.", "Functional materials", "Photoelectronics".

Conference working languages are Ukrainian, English, Russian

Conference fee:

Participation in the Conference is subject to the payment of the following Conference fee:

For participants from Ukraine	– 400 UAH (\$ at the rate at date of calculation)
For participants from CIS	– 600 UAH (\$ at the rate at date of calculation)
For participants from another countries	– 1000 UAH (\$ at the rate at date of calculation)
For accompanying persons	– 200 UAH (\$ at the rate at date of calculation)

Conference fee includes VAT at 20%

Postgraduate students receive a 50% discount from the above fees.

Members of the Ukrainian Physical Society receive 10% discount from the above fees.

The Exhibition

Participation in the exhibition is free of charge. The application form for participation in an exhibition must be given till 30.03.18 and should contain the short description of exhibits and conditions necessary for exhibiting.

Important dates of the conference:

Deadline for Registration forms and abstracts.....	30.03.18
The 2-nd announcement.....	15.04.18
Deadline for full papers.....	20.05.18
Deadline for payment.....	15.05.18
Participant registration and accommodation.....	28.05.18

The additional information

Odessa has direct connection with many cities:

- air traffic: Istanbul, Haifa, Vienna, Warsaw etc.
- the railway service: Berlin, Minsk, Warsaw etc.
- sea transportation: Istanbul, Haifa etc.
- bus traffic: Barcelona, Berlin, Dresden, Lyons, Lissabon, Madrid, Marseilles, Munich, Paris Prague etc.

The participant accommodation is planned in hotels, sanatorium and hostels of the University. It is warm and dry in Odessa at the time of the conference, the average air temperature is 23-27⁰ C. Beaches and recreation facilities are available at the seashore. Within the framework of the cultural program participants will be able to acquaint themselves with outstanding sights, monuments and museums of Odessa, and participate in a see trip and the other.

Conference Sponsors and organizational support

Sponsors from Ukraine and abroad are invited for financial support of the Conference. The sponsors will be acknowledged in a special way (by their request - with a trade mark or logotype) in information materials intended for distribution in many countries and specified on a conference site.

Please submit your proposals to the Conference Organizing Committee.

Address for correspondence:

ISEPTC, Organizing committee "SEMST-8",
Odessa I. I. Mechnikov National University,
2, Dvoryanskaya str., Odessa, 65082, Ukraine,
Phone/fax 38 (048)-723-34-61, Lepikh Yaroslav Illich
E-mail: semst-8@onu.edu.ua, ndl_lepikh@onu.edu.ua

In addition: the conference information is on

web-site: <http://semst-8.onu.edu.ua/>

ІНФОРМАЦІЯ ДЛЯ АВТОРІВ. ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ У ЖУРНАЛ

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

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

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

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

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

1. Рукописи повинні надсилатися у двох примірниках українською, або 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. *Elektrony i dyrki v poprovdnikah*. 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 top side 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 22.03.2018. Формат 60×84/8.
Ум.-друк. арк. 9,65. Тираж 300 пр. Зам. № 1728.

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