

ISSN 2519-2493

ISSN 2519-2485

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені В. Н. КАРАЗІНА
НАУКОВИЙ ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ЦЕНТР МОН та НАН УКРАЇНИ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

**Журнал фізики
та інженерії
поверхні**

**Journal of Surface
Physics and
Engineering**

ЗАСНОВАНИЙ У 2016 РОЦІ

ВИДАЄТЬСЯ 4 РАЗИ НА РІК

**Журнал физики
и инженерии
поверхности**

1' 2018
ХАРКІВ

«Журнал фізики та інженерії поверхні» висвітлює досягнення і проблеми плазмових, радіаційних, лазерних та комплексних фізичних технологій, а також дослідження процесів формування тонких плівок та модифікації поверхонь матеріалів, фізичних властивостей виникаючих структур, проблем економіки та підготовки кадрів у галузі високих технологій.

«Journal of Surface Physics and Engineering» highlights the achievements and problems of plasma, radiation, laser and complex physical technologies as well as research of thin film formation and surface modification, physical properties of resulting structures, economic issues and education in the field of high technologies.

«Журнал физики и инженерии поверхности» освещает достижения и проблемы плазменных, радиационных, лазерных и комплексных физических технологий, а также исследования процессов формирования тонких пленок и модификации поверхностей материалов, физических свойств возникающих структур, проблем экономики и подготовки кадров в области высоких технологий.

Затверджено до друку рішенням

Вченої ради Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (протокол № 1 від 21.01.2019 р.)

Вченої ради Наукового фізико-технологічного центру МОН та НАН України (протокол № 1 від 17.01.2019 р.)

Редакційна колегія

Азаренков М. О. (головний редактор), Фаренік В. І. (перший заступник головного редактора), Береснев В. М. (заступник головного редактора), Турбін П. В. (заступник головного редактора), Удовіцький В. Г. (відповідальний секретар), Агеев Л. О., Андреев А. О., Бакай О. С., Бізюков О. А., Брагіна Л. Л., Воеводін В. М., Войценя В. С., Гірка І. О., Гордієнко Ю. С., Дзюбенко М. І., Довбня А. М., Дудін С. В., Єгоренков В. Д., Єрмолаєв О. М., Жуковські П. (Люблін, Польща), Клепиков В. Ф., Ковтун Г. П., Кондратенко А. М., Костюк Г. І., Курода С. (Сенген, Японія), Литвиненко В. В., Литовченко С. В., Місаелідес П. (Тесалоніки, Греція), Неклюдов І. М., Погребняк О. Д., Соболев О. В., Хороших В. М., Целуйко О. Ф.

Адреса редакції: НФТЦ МОН та НАН України, майдан Свободи, 6, м. Харків, 61022, а/с 4499, Україна

E-mail: journal_pse@ukr.net, <http://www.pse.scpt.org.ua>

Editorial Board

Azarenkov M. O. (Editor-in-Chief), Farenik V. I. (Vice Editor-in-Chief), Beresnev V. M. (Associate Editor-in-Chief), Turbin P. V. (Associate Editor-in-Chief), Udovytsky V. G. (Executive secretary), Ageiev L. O., Andreiev A. O., Bakai O. S., Biziukov O. A., Bragina L. L., Dovbnia A. M., Dudin S. V., Dziubenko M. I., Girka I. O., Gordiienko Yu. Ye., Khoroshikh V. M., Klepikov V. F., Kovtun G. P., Kondratenko A. M., Kostiuk G. I., Kuroda S. (Sengen, Japan), Lytovchenko S. V., Lytvynenko V. V., Missaelides P. (Thessaloniki, Greece), Nekliudov I. M., Pogrebnyak O. D., Sobol O. V., Tseluiko O. F., Voievodin V. M., Voitsenia V. S., Yegorenkov V. D., Yermolaiev O. M., Zhukowsky P. (Lyublin, Poland)

Address: SCPT MES & NAS of Ukraine, 6 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, box 4499, Ukraine

E-mail: journal_pse@ukr.net, <http://www.pse.scpt.org.ua>

Редакционная коллегия

Азаренков Н. А. (главный редактор), Фаренік В. І. (первый заместитель главного редактора), Береснев В. М. (заместитель главного редактора), Турбін П. В. (заместитель главного редактора), Удовіцький В. Г. (ответственный секретарь), Агеев Л. А., Андреев А. А., Бакай А. С., Бізюков А. А., Брагіна Л. Л., Воеводин В. Н., Войценя В. С., Гірка І. А., Гордієнко Ю. Е., Дзюбенко М. І., Довбня А. Н., Дудін С. В., Єгоренков В. Д., Єрмолаєв А. М., Жуковски П. (Люблин, Польша), Клепиков В. Ф., Ковтун Г. П., Кондратенко А. Н., Костюк Г. И., Курода С. (Сенген, Япония), Литвиненко В. В., Литовченко С. В., Мисаэлидэс П. (Тессалоники, Греция), Неклюдов И. М., Погребняк А. Д., Соболев О. В., Хороших В. М., Целуйко А. Ф.

Адрес редакции: НФТЦ МОН и НАН Украины, площадь Свободы, 6, г. Харьков, 61022, п/я 4499, Украина

E-mail: journal_pse@ukr.net, <http://www.pse.scpt.org.ua>

Статті пройшли внутрішнє та зовнішнє рецензування.

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ 21918-11818Р від 18.01.2016.

	<i>Капустяник В. Б., Турко Б. І., Топоровська Л. Р., Серкіз Р. Я., Перевізник О. Б., Васьків А. П., Рудик Ю. В.</i> Електрофізичні властивості та перспективи застосування теплопровідних композитів на основі нано- та мікропорошків цинк оксиду <i>Kapustianyk V. B., Turko B. I., Toporovska L. R., Serkiz R. Y., Pereviznyk O. B., Vaskiv A. P., Rudyk Y. V.</i> Electrophysical properties and prospective of application of the thermal conductive composites on the basis of nano- and micropowders of zinc oxide <i>Капустяник В. Б., Турко Б. И., Топоровская Л. Р., Серкиз Р. Я., Перевизнык О. Б., Васькив А. П., Рудык Ю. В.</i> Электрофизические свойства и перспективы применения теплопроводящих композитов на основе нано- и микропорошков окиси цинка 5
	<i>Донець С. Є., Литвиненко В. В., Касаткін Ю. О., Пономарьов А. Г., Уваров В. Т.</i> Імітаційне моделювання штатних та аварійних радіаційних навантажень на ядерні матеріали із застосуванням електрофізичних установок <i>Donets S. E., Lytvynenko V. V., Kasatkin Yu. A., Ponomarev A. G., Uvarov V. T.</i> The imitation simulation of stuff and emergency loadings on nuclear materials by use the electrophysical equipments <i>Донец С. Е., Литвиненко В. В., Касаткин Ю. А., Пономарев А. Г., Уваров В. Т.</i> Имитационное моделирование штатных и аварийных радиационных нагрузок на ядерные материалы с применением электрофизических установок 12
Journal of Surface Physics and Engineering	<i>Гордієнко Ю. Є., Левченко А. В., Щербань І. М.</i> Принципи фізичного розшифрування зображень у скануючій мікрохвильовій мікроскопії <i>Gordienko Yu. Ye., Levchenko A. V., Shcherban I. N.</i> Principles of physical image decoding in scanning microwave microscopy <i>Гордиенко Ю. Е., Левченко А. В., Щербань И. Н.</i> Принципы физической расшифровки изображений в сканирующей микроволновой микроскопии 19
	<i>Биткін С. В.</i> Експериментально-статистичне моделювання застосування радіаційно- технологічних процесів (РТП) для уповільнення деградації U_{OL} біполярних інтегральних мікросхем (ІМС) у полях іонізуючих випромінювань <i>Bytkin S. V.</i> Experimental and statistical modeling of the application of radiation technological processes (RTP) for deceleration of bipolar integral circuits (IC) U_{OL} degradation in the fields of ionizing radiations <i>Быткин С. В.</i> Экспериментально-статистическое моделирование применения радиационно-технологических процессов для замедления деградации U_{OL} биполярных интегральных микросхем в полях ионизирующих излучений 26

Бардашевська С. Д., Будзуляк І. М., Рачій Б. І., Будзуляк С. І.
Отримання та властивості системи «нанопористий вуглецевий
матеріал – квантові точки CdS»
Bardasevska S. D., Budzulyak I. M., Rachiy B. I., Budzulyak S. I.
Obtaining and properties of the system «nanoparticle carbon
material – CdS quantum dots»
Бардашевська С. Д., Будзуляк І. М., Рачій Б. І., Будзуляк С. І.
Получение и свойства системы «нанопористый
углеродный материал – квантовые точки CdS» 37

УДК 536.2, 538.9, 53.06

ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОПРОВІДНИХ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ НАНО- ТА МІКРОПОРОШКІВ ЦИНК ОКСИДУ

**В. Б. Капустяник¹, Б. І. Турко¹, Л. Р. Топоровська¹, Р. Я. Серкіз¹, О. Б. Перевізник¹,
А. П. Васьків¹, Ю. В. Рудик¹**

¹*Львівський національний університет імені Івана Франка, вул. Драгоманова, 50, Львів,
Україна, 79005*

E-mail: tyrko_borys@ukr.net

Надійшла до редакції 10.01.2018

Методом радіального теплового потоку виміряні значення коефіцієнтів теплопровідності термопасти КПТ-8 та композитних матеріалів на основі мікро- та нанопорошків оксиду цинку і поліметилсилоксану. Коефіцієнти теплопровідності виявилися відповідно рівними 0,7 Вт/(м·К), 0,9 Вт/(м·К) і 2,4 Вт/(м·К). При тестуванні теплопровідних властивостей композитів на основі нано- та мікропорошків оксиду цинку в комп'ютерній техніці виявлено прояв розмірного ефекту. Зростання величини діелектричної проникності та зменшення питомого об'ємного електричного опору при зменшенні розмірів зерен порошків ZnO в композитах пов'язано зі зростанням кількості адсорбованої води на поверхні порошків ZnO у процесі синтезу.

Ключові слова: оксид цинку, композити, теплоперенесення, діелектрична проникність, питомий електроопір.

ELECTROPHYSICAL PROPERTIES AND PROSPECTIVE OF APPLICATION OF THE THERMAL CONDUCTIVE COMPOSITES ON THE BASIS OF NANO- AND MICROPOWDERS OF ZINC OXIDE

**Volodymyr Kapustianyk¹, Borys Turko¹, Liliia Toporovska¹, Roman Serkiz¹,
Orest Pereviznyk¹, Andriy Vaskiv¹, Yuriy Rudyk¹**

¹*Ivan Franko National University of Lviv, 50 Drahomanov Str., Lviv, Ukraine, 79005*

The values of thermal conductivity coefficients of KPT-8 thermal paste and composite materials based on micro- and nanopowders of zinc oxide and polymethylsiloxane were measured by the radial heat flux method. The coefficients of thermal conductivity were found to be respectively 0.7 W/(m·K), 0.9 W/(m·K) and 2.4 W/(m·K). Testing of the thermal conductive properties of composites based on nano- and micropowders of zinc oxide in the computer technique reveals manifestation of the size effect. The observed increase of the dielectric constant and reduction of the specific volume electrical resistance with decreasing of grain sizes of ZnO powders in composites is associated with the quantity of water adsorbed on the surface of ZnO powders during the synthesis.

Keywords: zinc oxide, composites, heat transfer, dielectric constant, specific electrical resistance.

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДЯЩИХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ НАНО- И МИКРОПОРОШКОВ ЦИНК ОКСИДА

**В. Б. Капустяник¹, Б. И. Турко¹, Л. Р. Топоровская¹, Р. Я. Серкиз¹, О. Б. Перевизнык¹,
А. П. Васькив¹, Ю. В. Рудык¹**

¹*Львовский национальный университет имени Ивана Франко, ул. Драгоманова, 50, Львов,
Украина, 79005*

Методом радиального теплового потока измерены значения коэффициентов теплопроводности термопасты КПТ-8, а также композитных материалов на основе микро- и нанопорошков оксида цинка и полиметилсилоксана. Коэффициенты теплопроводности оказались соответственно равными 0,7 Вт/(м·К), 0,9 Вт/(м·К) и

2,4 Вт/(м·К). При тестуванні теплопровідних властивостей композитів на основі нано- і мікропорошків оксида цинку в комп'ютерній техніці виявлено проявлення розмірного ефекта. Ріст величини діелектричної проникності та зменшення удільного об'ємного електричного опору при зменшенні розмірів зерен порошків ZnO в композитах пов'язано з збільшенням кількості адсорбованої води на поверхні порошків ZnO в процесі синтезу.

Ключевые слова: оксид цинку, композити, теплоперенос, діелектрична проникність, удільне електроопору.

ORCID IDs

Volodymyr Kapustianyk: <https://orcid.org/0000-0001-7830-5670>

Borys Turko: <https://orcid.org/0000-0001-9684-6630>

Liliia Toporovska: <https://orcid.org/0000-0002-0196-1749>

Roman Serkiz: <https://orcid.org/0000-0003-2977-4213>

Orest Pereviznyk: <https://orcid.org/0000-0002-6164-1966>

Andriy Vaskiv: <https://orcid.org/0000-0002-2296-8931>

Yuriy Rudyk: <https://orcid.org/0000-0002-8732-3464>

ВСТУП

Як відомо, для відводу тепла від теплоутворюючих робочих елементів електронних пристроїв, зокрема процесорів, чіпсетів, відеоприскорювачів комп'ютерів тощо, використовують теплопровідні пасти. Переважно, усі термопасти містять полімер (наприклад, силіконове масло) та різноманітні наповнювачі-загущувачі (наприклад, нітрид алюмінію, нітрид бору, срібло, оксид алюмінію, оксид цинку, графіт) [1].

Вже багато років ZnO у формі мікропорошку успішно і широко використовують як основний компонент, зазвичай, дешевих комерційних термопаст (наприклад, КПТ-8). Величина коефіцієнта теплопровідності цих термопаст переважно знаходиться у діапазоні від 0,6 до 1,5 Вт/(м·К).

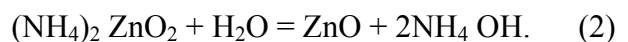
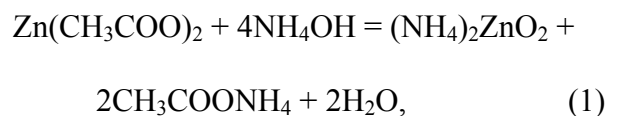
На сьогоднішній день число публікацій щодо теплопровідності наноструктурованих матеріалів на основі ZnO є дуже незначним [2, 3]. Переважна більшість робіт у цьому напрямі присвячена дослідженням матеріалів у вигляді монокристалів [4, 5], кераміки [2] чи плівок [6, 7]. В попередній роботі [8] нами було продемонстровано, що при використанні наночастинок ZnO замість мікропорошку ZnO, можна суттєво (більш, аніж утричі) підвищити коефіцієнт теплопровідності композиту. У цій роботі наведено дані досліджень електрофізичних параметрів, таких як питомий об'ємний електроопір і діелектрична проникність, а також результати тестування теплопровідних властивостей композитів на основі нано- та мікропорошків оксида цинку в комп'ютерній техніці.

ЕКСПЕРИМЕНТ

Композитні матеріали отримували шляхом диспергування експериментально виготовлених порошків ZnO в поліметилсилоксані ПМС 1000. Силіконове масло (інша назва поліметилсилоксану) та наповнювачі-загущувачі (порошки ZnO) брались в об'ємному співвідношенні 3:7.

Нанопорошок ZnO синтезували методами «мокрої» хімії у водному розчині 0,016 моль цинку ацетату дигідрату і 0,095 моль гідроксиду аміаку при температурі 95°C [8]. Час вирощування становив 10 хв. Після цього розчин зневоднювався на повітрі.

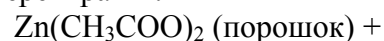
Процес утворення наноструктур оксиду цинку можна описати такими реакціями [8]:

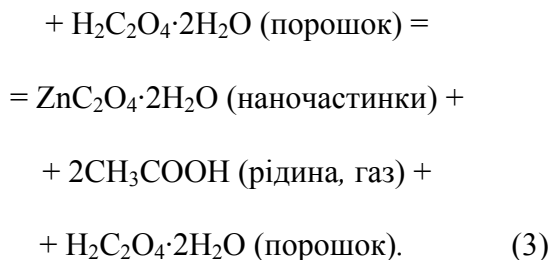


Також мікропорошок ZnO синтезували механохімічними реакціями [9]. Для цього суміш 0,1 моль $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ та 0,12 моль $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ протягом 30 хв. за кімнатної температури перетирали в агатовій ступці та відпалювали на повітрі при температурі 450°C ще 30 хв. Після відпалу отриманий порошок 10 хв. повторно перетирали в агатовій ступці.

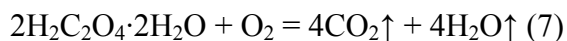
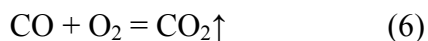
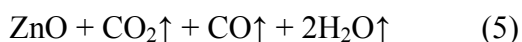
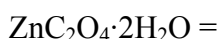
Процес утворення частинок оксиду цинку можна описати такими реакціями.

При перетиранні:





При відпалюванні:



Значення діелектричної проникності та питомого об'ємного електричного опору за кімнатної температури та різної частоти отримували вимірювачем імітансу E7-20 (ВАТ «МНІПІ», м. Мінськ, Білорусь).

При тестуванні теплопровідних композитів використовували безкоштовне програмне забезпечення «RealTemp» та «CPU Burn-in v1.0». «RealTemp» – це програма моніторингу температури ядер процесорів ЕОМ.

Призначена для процесорів Intel Single Core, Dual Core, Quad Core та Core i7. Кожне ядро на цих процесорах має цифровий термодатчик. «CPU Burn-in v1.0» – це програма, що «нагріває» будь-який процесор з архітектурою «x86» до максимально можливої робочої температури, досяжної за допомогою звичайного програмного забезпечення.

Визначення коефіцієнтів теплопровідності композитів здійснювали методом радіального теплового потоку [8].

Для оцінки розмірів зерен порошків ZnO, синтезованих механохімічними реакціями і методом «мокрої» хімії, на їхній основі виготовляли спиртову суспензію. Її наносили на скляні підкладки, вкриті прозорою електропровідною плівкою з оксидів індію та олова

(ITO). Після цього зразки осушували на повітрі та досліджували за допомогою растрового електронного мікроскопа РЕММА-102-02 виробництва ВАТ «SELMІ» (Україна).

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХНЄ ОБГОВОРЕННЯ

Отримані на растровому електронному мікроскопі (РЕМ) мікрофотографії порошків ZnO, синтезованих методом «мокрої» хімії та механохімічними реакціями, наведені в однаковому масштабі на рис. 1 та на рис. 2, відповідно. Технічні характеристики РЕМ не дали змоги отримати чітке зображення зерен порошку, синтезованого методом «мокрої» хімії. Знаючи, що роздільна здатність РЕМ при його роботі в режимі вторинних електронів, згідно з паспортом не перевищує 5 нм, можна припустити, що їхній розмір складає порядку декількох нанометрів. Натомість розмір зерен порошку, синтезованого механохімічними реакціями, виявився в межах 1–3 мкм.

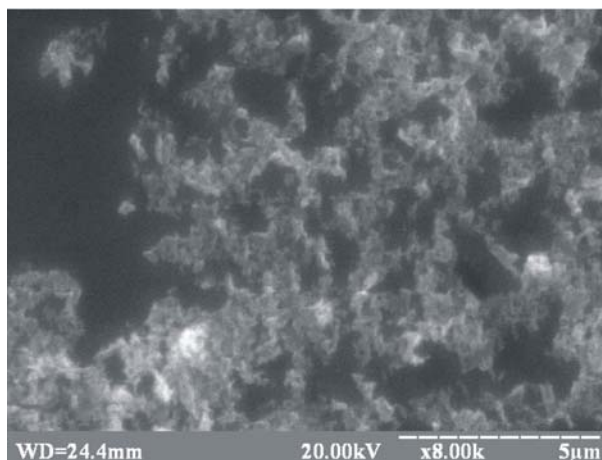


Рис. 1. Мікрофотографія синтезованого методом «мокрої» хімії нанопорошку ZnO

На рис. 3 наведено чотири залежності робочої температури процесора комп'ютера при сталому навантаженні від часу роботи комп'ютера, з використанням для відводу тепла мідного радіатора, як з шаром теплопровідного матеріалу між поверхнями процесора та радіатора, так і без нього. Дотримання однакових початкових умов забезпечувалося тим, що тестування розпочиналися за однакові проміжки часу після увімкнення ЕОМ. За добу отримувалися експеримента-

льні дані лише для однієї залежності. Після завершення тестування комп'ютер вимикався.

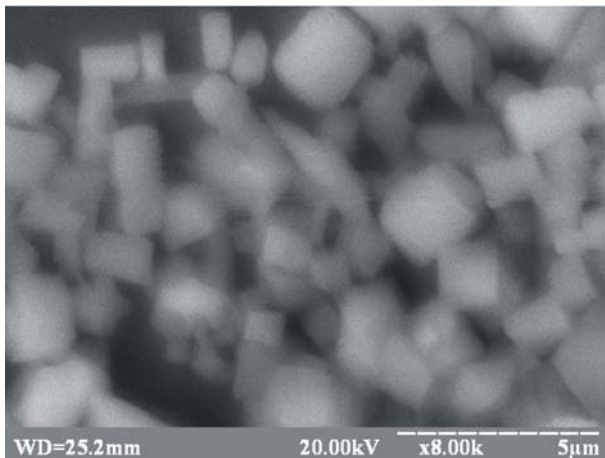


Рис. 2. Мікрофотографія створеного механохімічними реакціями мікропорошку ZnO

Згідно з отриманими результатами, найкраще відводилося тепло за використання композиту на основі порошку ZnO, синтезованого методами «мокрої» хімії. Спостерігався розмірний ефект. При зменшенні розмірів зерен порошків ZnO в теплопровідних композитах відбувається зменшення контактного теплового опору (опору Капіци) між поверхнями процесора та радіатора [8]. Використання як наповнювача в композиті нанопорошку замість мікропорошку ZnO забезпечує кращий контакт між сусідніми шорсткими поверхнями процесора та радіатора.

Як відомо, кремнійорганічна теплопровідна паста КПТ-8 [10] складається з поліметилсилоксану – силіконового масла з коефіцієнтом теплопровідності $\alpha = 0,167$ Вт/(м·К) при кімнатній температурі [8] і наповнювачів-загущувачів – аеросилу SiO₂, з коефіцієнтом теплопровідності $\alpha \approx 3 \cdot 10^{-3}$ Вт/(м·К) при $T=27^\circ\text{C}$ марки А-380 та цинкових білил ZnO марок БЦ0 і БЦ1. Коефіцієнт теплопровідності монокристалів ZnO знаходиться в діапазоні від 100 Вт/(м·К) до 120 Вт/(м·К) та залежить від технології виробництва і оброблення зразків [8]. Частилки аеросилу розміром 5–15 нм адсорбуються на поверхні частинок ZnO розміром 50–60 мкм і запобігають їхньому укрупненню за рахунок електростатичного відштовхування заряджених функ-

ціональних груп, а також за рахунок створення просторових перепон для агломерації.

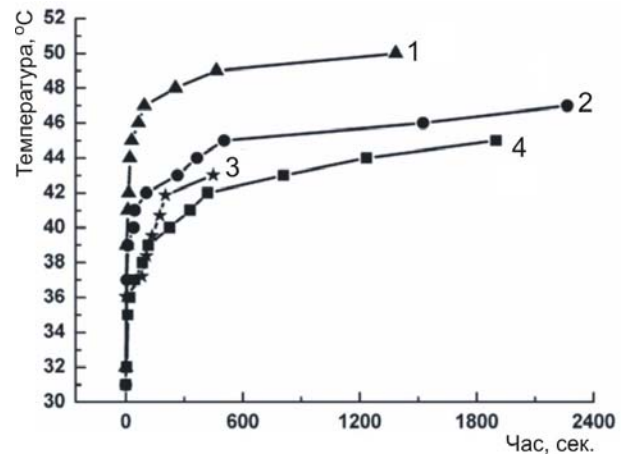


Рис. 3. Графіки залежності робочої температури процесора комп'ютера при сталому навантаженні, з використанням для відводу теплоти мідного радіатора, від часу роботи комп'ютера: 1 – без шару термопасти між поверхнями процесора та радіатора, 2 – з шаром термопасти КПТ-8 між поверхнями процесора та радіатора, 3 – з шаром теплопровідної пасти з порошку ZnO, синтезованого механохімічними реакціями, між поверхнями процесора та радіатора, 4 – з шаром теплопровідної пасти з порошку ZnO, синтезованого методами «мокрої» хімії, між поверхнями процесора та радіатора.

Отримані значення діелектричної проникності та питомого об'ємного електричного опору за кімнатної температури за частот електричного струму 50 Гц та 1 МГц для термопасти КПТ-8 та двох виготовлених різними методами теплопровідних композитів наведено у табл. 1. Менші значення питомого об'ємного електричного опору та вищі значення діелектричної проникності синтезованих композитів порівняно з параметрами термопасти КПТ-8, на нашу думку, можуть свідчити про наявність у їхньому складі деякої кількості води.

Діелектрична проникність води ϵ за кімнатної температури становить приблизно 80 одиниць [11, 12]. Вона є значно більшою за діелектричні проникності аеросилу ($\epsilon = 1,5$) [13], силіконового масла ($\epsilon = 2,5$) [14] чи цинк оксиду ($\epsilon = 8,5$) [15], тому навіть невелика кількість води в композиті може значно вплинути на його діелектричні характеристики. Вода могла адсорбуватися на поверхню порошків ZnO в процесі виготовлення

композитів. Як відомо, при зменшенні розмірів сферичних частинок від 30 нм до 5 нм відбувається зростання частки поверхневих атомів з приблизно 5% до 40% [16]. Тому композит на основі нанопорошку порівняно з композитом на основі мікропорошку цинк оксиду міститиме більшу кількість адсорбованої води, що й підтверджується результатами електрофізичних досліджень їхніх властивостей.

Таблиця 1

Електрофізичні параметри досліджуваних матеріалів

Назва параметра	КПТ-8	Композит на основі порошку ZnO синтезованого методом «мокрої хімії»	Композит на основі порошку ZnO синтезованого механохімічними реакціями
Питомий об'ємний електричний опір за кімнатної температури і частоти 50 Гц, Ом·см	$6 \cdot 10^{14}$	$2 \cdot 10^{10}$	10^{11}
Діелектрична проникність за кімнатної температури: за частоти 50 Гц за частоти 1 МГц	6 4	8 6	7 5

Діелектрична проникність води ϵ за кімнатної температури становить приблизно 80 одиниць [11, 12]. Вона є значно більшою за діелектричні проникності аеросилу ($\epsilon = 1,5$) [13], силіконового масла ($\epsilon = 2,5$) [14] чи цинк оксиду ($\epsilon = 8,5$) [15], тому навіть невелика кількість води в композиті може значно вплинути на його діелектричні характеристики. Вода могла адсорбуватися на поверхню порошків ZnO в процесі виготовлення композитів. Як відомо, при зменшенні розмірів сферичних частинок від 30 нм до 5 нм

відбувається зростання частки поверхневих атомів з приблизно 5% до 40% [16]. Тому композит на основі нанопорошку порівняно з композитом на основі мікропорошку цинк оксиду міститиме більшу кількість адсорбованої води, що й підтверджується результатами електрофізичних досліджень їхніх властивостей.

Розраховані за методом радіального теплового потоку значення коефіцієнтів теплопровідності термопасти КПТ-8 та композитних матеріалів на основі синтезованих механохімічними реакціями і методом «мокрої» хімії порошків ZnO виявилися рівними відповідно 0,7 Вт/(м·К), 0,9 Вт/(м·К) і 2,4 Вт/(м·К).

Таким чином можна констатувати, що композити на основі мікро- та нанопорошків ZnO володіють вищими значеннями коефіцієнтів теплопровідності порівняно з термопастою КПТ-8, що очевидно пов'язано з відсутністю у їхньому складі аеросилу. Водночас, коефіцієнт теплопровідності композиту при використанні нанопорошку ZnO є істотно вищим, аніж у випадку мікропорошку.

ВИСНОВОК

Методом радіального теплового потоку визначені коефіцієнти теплопровідності композитних матеріалів на основі nano- та мікропорошків оксиду цинку. Порошки ZnO синтезовано методом «мокрої» хімії та механохімічними реакціями. Вищі значення коефіцієнтів теплопровідності композитів на основі мікро- та нанопорошків ZnO порівняно з величиною коефіцієнта теплопровідності термопасти КПТ-8 пов'язані з відсутністю у їхньому складі аеросилу. Підвищення величини коефіцієнта теплопровідності композиту при використанні nano- замість мікропорошку ZnO очевидно зумовлене балістичною теплопровідністю, зростанням екситонної теплопровідності та зменшенням контактного теплового опору. При тестуванні теплопровідних властивостей композитів на основі nano- та мікропорошків оксиду цинку в комп'ютерній техніці виявлено прояв розмірного ефекту, зумовленого тим, що при зменшенні розмірів зерен порошків ZnO в теплопровідних композитах відбувається змен-

шення контактного теплового опору (опору Капіци) між поверхнями процесора ЕОМ та радіатора. Менші значення питомого об'ємного електричного опору та вищі значення діелектричної проникності синтезованих композитів порівняно з параметрами термопасти КПТ-8 можуть свідчити про наявність у їхньому складі деякої кількості води, що може адсорбуватися на поверхню порошків ZnO в процесі їхнього виготовлення.

Результати тестування засвідчують перспективність застосування композитів на основі нанопорошків для відведення тепла в комп'ютерах та інших електронних пристроях. Водночас, властивості зазначених матеріалів можуть бути оптимізовані за рахунок цілеспрямованих змін в технології їхнього виготовлення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Теплопровідна паста: Пат. 102258 Україна, МПК С09К 5/00. / Б.І. Турко, Ю.Ю. Бучко, М.Р. Панасюк, В.Б. Капустяник (Україна). – № u201503434; Заявлено 14.04.15; Опубл. 26.10.15, Бюл. № 20. – 4 с. іл.
2. Olorunyolemi T., Birnboim A., Carmel Y., Wilson O., Knowlton I. Thermal Conductivity of Zinc Oxide: From Green to Sintered State // *J. Am. Ceram. Soc.* – 2002. – Vol. 85. – P. 1249-1253.
3. Игамбердиев Х. Т., Юлдашев Ш. У., Cho H. D., Kang T. W., Рахимова Ш. М. Тепловогой транспорт в нанокompозитах ZnO/PMMA // *Физика твердого тела.* – 2012. – Т. 54, вып. 7. – С. 1424-1426.
4. Ozgur U., Gu X., Chevchenko S., Spradlin J., Cho S.-J., Morkoc H., Pollak F. H., Everitt H. O., Nemeth B., Nause J. E. Thermal Conductivity of Bulk ZnO after Different Thermal Treatments // *J. of Electronic Materials.* – 2006. – Vol. 35, № 4. – P. 550-555.
5. Florescu D. I., Mourikh L. G., Pollak F. H. High Spatial Resolution Thermal Conductivity of Bulk ZnO (0001) // *J. of Applied Physics.* – 2002. – Vol. 91. – P. 890-892.
6. Huang Z. X., Tang Z. A., Yu J., Bai S. Thermal Conductivity of Nanoscale Polycrystalline ZnO Thin Films // *Physica B: Condensed Matter.* – 2011. – Vol. 406. – P. 818-823.
7. Xu Y., Goto M., Kato R., Tanaka Y., Kagawa Y. Thermal Conductivity of ZnO Thin Film Pro-

- duced by Reactive Sputtering // *J. Appl. Phys.* – 2012. – Vol. 111. – P. 084320.
8. Turko B. I., Kapustianyk V. B., Rudyk V. P., Rudyk Y. V. Thermal Conductivity of Zinc Oxide Micro- and Nanocomposites // *J. Nano- Electron. Phys.* 2016. – Vol. 8. – P. 02004.
9. Shen L., Bao N., Yanagisawa K., K. Domen, A. Gupta, Grimes C. Direct Synthesis of ZnO Nanoparticles by a Solution-Free Mechanochemical Reaction // *Nanotechnology.* – 2006. – Vol. 17. – P. 5117-5123.
10. ГОСТ 19783-74. Паста кремнийорганическая теплопроводная. Технические условия. – Введ. 1975-01-01. – М.: Изд.-во стандартов, 1996. – 11 с.
11. Бовсуновський А.П. Електротехнічні матеріали: Корот. довідник – К.: НУХТ, 2012. – 36 с.
12. Криворучко Я. С., Лерман Л. Б. Визначення ефективної діелектричної проникності, коефіцієнтів відбиття та прозорості електромагнітного випромінювання армованими полімерами // *Вісник Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника. Серія «Хімія».* – 2012. – № 16. – С. 4-8.
13. Grechko L. G., Zarko V. I., Kozub G. M., Motrich V. V., Chuiko A. A. Dielectric Properties of Pyrogenic Silicon Dioxide // *Theoretical and Experimental Chemistry.* – 1989. – Vol. 24. – P. 593-596.
14. Майофис И.М. Химия диэлектриков. Учебное пособие для студентов энергетических специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1970. – 332 с.
15. Ozgur U., Alivov Y., Liu C., Teke A., Reshchikov M., Dogan S., Avrutin V., Cho S., Morkoc H. A Comprehensive Review of ZnO Materials and Devices // *J. Appl. Phys.* – 2005. – Vol. 98. – P. 041301-1-041301-103.
16. Витязь П. А., Свидуневич Н. А., Куис Д. В. Наноматериаловедение: учеб. пособие. – Минск: Вышэйшая школа, 2015. – 511 с.

REFERENCES

1. Teploprovidna pasta: Pat. 102258 Україна. МПК S09K 5/00. / B.I. Turko. Yu.Yu. Buchko. M.R. Panasyuk. V.B. Kapustyanik (Ukraine). – № u201503434; Zayavleno 14.04.15; Opubl. 26.10.15. Byul. № 20. – 4 s. il.
2. Olorunyolemi T., Birnboim A., Carmel Y., Wilson O., Knowlton I. Thermal Conductivity of Zinc Oxide: From Green to Sintered State // *J. Am. Ceram. Soc.* – 2002. – Vol. 85. – P. 1249-1253.

3. Igamberdiyev Kh. T., Yuldashev Sh. U., Cho H. D., Kang T. W., Rakhimova Sh. M. Teplovoy transport v nanokompozitakh ZnO/PMMA // Fizika tverdogo tela. – 2012. – T. 54. vyp. 7. – S. 1424-1426.
4. Ozgur U., Gu X., Chevtchenko S., Spradlin J., Cho S.-J., Morkoc H., Pollak F. H., Everitt H. O., Nemeth B., Nause J. E. Thermal Conductivity of Bulk ZnO after Different Thermal Treatments // J. of Electronic Materials. – 2006. – Vol. 35, № 4. – P. 550-555.
5. Florescu D. I., Mourikh L. G., Pollak F. H. High Spatial Resolution Thermal Conductivity of Bulk ZnO (0001) // J. of Applied Physics. – 2002. – Vol. 91. – P. 890-892.
6. Huang Z. X., Tang Z. A., Yu J., Bai S. Thermal Conductivity of Nanoscale Polycrystalline ZnO Thin Films // Physica B: Condensed Matter. – 2011. – Vol. 406. – P. 818-823.
7. Xu Y., Goto M., Kato R., Tanaka Y., Kagawa Y. Thermal Conductivity of ZnO Thin Film Produced by Reactive Sputtering // J. Appl. Phys. – 2012. – Vol. 111. – P. 084320.
8. Turko B. I., Kapustianyk V. B., Rudyk V. P., Rudyk Y. V. Thermal Conductivity of Zinc Oxide Micro- and Nanocomposites // J. Nano- Electron. Phys. 2016. – Vol. 8. – P. 02004.
9. Shen L., Bao N., Yanagisawa K., K. Domen, A. Gupta, Grimes C. Direct Synthesis of ZnO Nanoparticles by a Solution-Free Mechanochemical Reaction // Nanotechnology. – 2006. – Vol. 17. – P. 5117-5123.
10. GOST 19783-74. Pasta kremniyor-ganicheskaya teploprovodnaya. Tekhnicheskiye usloviya. – Vved. 1975–01–01. – M.: Izd.-vo standartov. – 1996. – 11 s.
11. Bovsunovskiy A. P. Elektrotekhnichni materiali: Korot. dovidnik – K.: NUKhT. 2012. – 36 s.
12. Krivoruchko Ya. S., Lerman L. B. Vznachennya efektyvnoï dielektrichnoï proniknosti. koeffitsientiv vidbittya ta prozorosti elektromagnitnogo viprominyu-vannya armovanymi polimerami // Visnik Priкарпатського національного університету імені Василя Стефаника. Серія «Хімія». – 2012. – № 16. – S. 48.
13. Grechko L. G., Zarko V. I., Kozub G. M., Motrich V. V., Chuiko A. A. Dielectric Properties of Pyrogenic Silicon Dioxide // Theoretical and Experimental Chemistry. – 1989. – Vol. 24. – P. 593-596.
14. Майофис И. М. Химия диэлектриков. Учебное пособие для студентов энергетических специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1970. – 332 с.
15. Ozgur U., Alivov Y., Liu C., Teke A., Reshchikov M., Dogan S., Avrutin V., Cho S., Morkoc H. A Comprehensive Review of ZnO Materials and Devices // J. Appl. Phys. – 2005. – Vol. 98. – P. 041301-1-041301-103.
16. Vityaz P. A., Svidunovich N. A., Kuis D. V. Nanomaterialovedeniye: ucheb. posobiye. – Minsk: Vysheyschaya shkola. 2015. – 511 s. of Electronic Materials. – 2006. – Vol. 35, № 4. – P. 550-555.

УДК 536.2, 538.9, 53.06

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ШТАТНИХ ТА АВАРІЙНИХ РАДІАЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ЯДЕРНІ МАТЕРІАЛИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ УСТАНОВОК

С. Є. Донець¹, В. В. Литвиненко¹, Ю. О. Касаткін¹, А. Г. Пономарьов², В. Т. Уваров²

¹Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України, вул. Гуданова, 13, 61024,
Харків, Україна

²ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, вул. Академічна, 1, 61108,
Харків, Україна

E-mail: vvlytvynenko@ukr.net

Надійшла до редакції 12.01.2018

У роботі вивчені особливості застосування прискорювачів важких іонів та прискорювачів сильнострумових електронів для дослідження процесів, які відбуваються в цирконієвих сплавах при штатних та аварійних режимах роботи ядерного реактора. Опроміненням прискореними пучками іонів криптону моделювався вплив газоподібних уламків ядерного палива в штатному режимі роботи. Опроміненням сильно струмовими пучками електронів моделювався вплив екстремальних чинників, які виникають в аварійних ситуаціях.

Ключові слова: прискорені пучки іонів криптону, сильнострумові електронні пучки, цирконієвий сплав, внутрішня структура, механічні властивості.

THE IMITATION SIMULATION OF STUFF AND EMERGENCY LOADINGS ON NUCLEAR MATERIALS BY USE THE ELECTROPHYSICAL EQUIPMENTS

Stanislav Donets¹, Volodymyr Lytvynenko¹, Yuriy Kasatkin¹, Anatoliy Ponomarev²,
Viktor Uvarov²

¹Institute of Electrophysics & Radiation Technologies National Academy of Sciences of Ukraine, 13
Gudanova Str., 61024, Kharkiv, Ukraine

²NSC «Kharkiv Institute of Physics and Technology» National Academy of Sciences of Ukraine, 1
Academic Str., 61108, Kharkiv, Ukraine

In this paper, we studied the features of the use of heavy ion accelerators and high-current electron accelerators to study the processes that occur in zirconium alloys under normal and emergency operating conditions of a nuclear reactor. Irradiation of accelerated beams of krypton ions simulated the effect of gas-like fission fragments of nuclear fuel in the regular operating mode of the reactor. By irradiating high-current electron beams, the influence of extreme factors that arise in emergency situations was modeled.

Key words: accelerated beams of krypton ions, high-current electron beams zirconium alloy, internal structure, mechanical properties.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ШТАТНЫХ И АВАРИЙНЫХ РАДИАЦИОННЫХ НАГРУЗОК НА ЯДЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

С. Е. Донець¹, В. В. Литвиненко¹, Ю. А. Касаткин¹, А. Г. Пономарев², В. Т. Уваров²

¹Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України, ул. Гуданова, 13,
61024, Харків, Україна

²ННЦ «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины, ул. Академическая, 1,
61108, Харьков, Украина

В работе изучены особенности применения ускорителей тяжелых ионов и ускорителей сильнотоочных электронов для исследования процессов, которые происходят в циркониевых сплавах при штатных и аварийных режимах работы ядерного реактора. Облучением ускоренными пучками ионов криптона моделировалось влияние газоподобных осколков деления ядерного топлива в штатном режиме работы реактора. Облучением сильноточ-

ними пучками електронів моделювалось впливання екстремальних факторів, которые возникают в аварийных ситуациях.

Ключевые слова: ускоренные пучки ионов криптона, сильноточные электронные пучки, циркониевый сплав, внутренняя структура, механические свойства.

ORCID IDs

Stanislav Donets: <https://orcid.org/0000-0002-1258-1434>

Volodymyr Lytvynenko: <https://orcid.org/0000-0003-4850-2555>

Yuriy Kasatkin: <https://orcid.org/0000-0003-3824-8354>

Anatoliy Ponomarev: <https://orcid.org/0000-0001-6914-6057>

Viktor Uvarov: <https://orcid.org/0000-0002-3435-2077>

ВСТУП

На даний час суспільство впритул стикається з проблемою пошуку балансу між зростаючими потребами в енергії, впливом на довкілля домінуючих технологій генерації та необхідністю дотримуватися припустимих меж видатків на розвідку і видобуток сировини а також заходів стосовно запобігання забруднення оточуючого середовища, а отже і безпеку життєдіяльності людини. Не зважаючи на стрімкий розвиток альтернативних джерел енергії, їх питома вага в балансі виробництва ще не скоро стане домінуючою, тоді як потреби людства венергоносіях постійно зростають, що також кореспондується з постулатами підвищення якості життя і безпеки життєдіяльності. Домінуючими способами генерації електроенергії в світі та Україні є атомна і теплова енергетика. В Україні питома вага атомної енергетики складає понад 50 %. Теплова енергетика перебуває в складному стані не тільки через застарілість енергетичного обладнання, але й проблему постачання проектного вугілля, поклади якого знаходяться на тимчасово неконтрольованих територіях.

Основною екологічною проблемою атомної енергетики є утворення радіоактивного відпрацьованого ядерного палива. Серед стратегічних підходів, щодо її подолання протягом декількох десятиріч розглядається конструкція реактора, сполученого з прискорювачем заряджених частинок, який би міг примусово ініціювати реакції поділу в радіонуклідах з високим періодом напіврозпаду, доводячи їх до утворення стабільних елементів [1]. В той же час непередбачуваність процесів у світовому океані призвела і до наймасштабнішої аварії на атомній електростанції (АЕС) Фукусіма – 1. [2]. Ця трагічна

подія дала підставу для висновку, що аварійні ситуації виникають внаслідок нехтування чинниками, які є малоймовірними або ймовірність яких співвимірна з флуктуаційним фоном. До речі про доцільність перегляду ймовірнісного підходу до безпеки АЕС докладно йдеться в роботі [3]. Сценарій розвитку аварії полягав в тому, що поштовх магнітудою в 9 балів на відстані близько 150 км від станції, був зареєстрований сейсмодатчиками, що передбачало вимкнення системи аварійного захисту і зупинку реакторів з переходом системи охолодження активної зони на живлення від дизель генераторів. Але цунами висотою в 14-15 метрів затопило прибережні дизельні станції, оскільки захисна дамба проектувалась на висоту цунамі близько 6 метрів.

Відсутність охолодження ініціює перебіг паро цирконієвої реакції [4.], яка спричиняє підвищення температури руйнування стінок тепловидільних елементів, та виділення водню з подальшим його вибухом. Таким чином розробка ядерно-енергетичних установок майбутнього з більш високим рівнем надійності та безпечності передбачає їх випробування до стійкості в умовах впливу як екстремальних чинників, так і штатних навантажень.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для відтворення експлуатаційних навантажень на матеріали активної зони ядерних установок, зокрема цирконієвих сплавів, з яких виготовляються стінки тепловидільних елементів, необхідно розробити низку методик, які б моделювали вплив радіаційно-термічних факторів. Одним з ефективних інструментів, які використовуються при реалізації згаданих методик є прискорювачі заряджених частинок. Разом з тим, оскільки про-

дукти поділу ядерного палива являють собою широкі спектр іонізуючих частинок, припустимим є виокремлене вивчення особливостей впливу тих або інших частинок. Так, відомо, що близько 16 % продуктів поділу ядерного палива припадає на газоподібні продукти іонів криптону та ксенону [5 – 7]. Ці осколки ділення мають дві характерні особливості – надзвичайну малу розчинність і переважно газоподібний стан. Перше говорить про те, що ці гази виділяються з палива завжди, коли це кінетично можливо, а друге – гази, які виділилися будуть намагатися чи повністю виділятися з паливної матриці і накопичуватися у вільному об'ємі твела, чи утворювати газові бульбашки всередині палива. Для них властиві невеликі глибини занурення в оболонку твела, але і відповідно наявність зони зосередженого пошкодження внутрішньої структури.

Іншою проблемою є розуміння процесів, які відбуваються в умовах аварійних режимів опромінення, для яких характерні високі значення густини потоку енергії іонізуючих частинок.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Для відтворення впливу газоподібних уламків поділу ядерного палива, зокрема, криптону на цирконієвий сплав $Zr1\%Nb$ нами використовувався циклотрон ІЦ-100 Міжнародної міжурядової організації Об'єднаний інститут ядерних досліджень. Зразки опромінювалися до значень флюенсів 10^{13} та 10^{14} іон $см^{-2}$.

Для вивчення механічних характеристик поверхні використовувався метод наноіндентування за допомогою пристрою Nano Indenter G200 (ННЦ ХФТІ), з використанням алмазної кристалічної пірамідки Берковича з радіусом затуплення при вершині близько 20 нм, середнє навантаження 10 мН, глибина проникнення індентора від нульового відліку до глибини 200 нм. Точність вимірювання глибини сліду $\pm 0,04$ нм, а навантаження на індентор ± 75 нН. Відбитка наносилася на відстані 15 мкм один від одного, на кожному зразку проводили по чотири вимірювання. Прецезійна точність навантаження і вимірю-

вання зміщень забезпечувалась електромагнітним приводом зонду та ємнісними датчиками зміщень. Обробку отриманих експериментальних даних проводили шляхом аналізу кривої навантаження за методом Олівера і Фарра [8]. Растрова електронна мікроскопія виконувалась на приладі JEOL JSM – 840, металографічні дослідження на мікроскопі МІМ-10.

Моделювання поведінки цирконієвого сплаву під впливом екстремальних режимів опромінення було проведено шляхом опромінення зразку сплаву $Zr1\%Nb$ сильнострумовим електронним пучком на прискорювачі ТЕМП-А (ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України).

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

В результаті впливу на матеріал пучка заряджених частинок при збереженні сталої температури (для випадку лопромінення пучком іонів криптону температура становили 300 К) в шарі поверхні товщиною порядком довжини пробігу частинок відбувається ланцюжок процесів – утворення вакансії та міжвузловин. Які еволюціонуючи в подальшому здатні ініціювати низку перетворень на рівні зеренного масштабу та масштабу кристалу.

- змінюється мікроструктура – розмір зерен зменшується, з можливим переходом в аморфний стан;

- змінюється фазовий склад, при цьому можлива поява метастабільних фаз та з'єднань, які при звичайних методах термообробки матеріалів утворюватися не можуть;
- гомогенізується фазовий склад.

Опромінення пучками іонів до значень флюенсу 10^{14} $см^{-2}$ зумовлена тим, що це є для багатьох легких сплавів межею насичення приросту мікротвердості [7], після чого йде утворення дислокаційних петель та.

На рис. 1. (ліва вісь) показані залежності нанотвердості поверхні цирконієвого сплаву $Zr1\%Nb$ вихідного та після опромінення, побудовані за результатами наноіндентування при послідовному заглибленні індентора в поверхню зразків.

З результатів вимірювання (див. рис. 1), видно, що після опромінення іонами з біль-

шим флюенсом на поверхні сформувався на-ношар з підвищеною твердістю. Максимальна нанотвердість зразку сплаву Zr1%Nb досягає 4,8 ГПа порівняно з 3,6 ГПа для вихідного зразку. Хоча, величина нанотвердості монотонно зменшується до 4,2 на глибині 200 нм.

Для зразку цього ж сплаву при інших умовах опромінення (рис.1 крива 2)) виникає зворотна ситуація - на глибині 50 нм, де в попередньому випадку відбувалося збільшення твердості, спостерігається зменшення нанотвердості з 3,5 ГПа до 2,4 ГПа, порівняно з неопроміненим матеріалом, та монотонно збільшується і досягає величин як у вихідного зразку на глибині 200 нм. Як вважають автори [9], таке зменшення можна пояснити зняттям наклепу з поверхні зразку, який був отриманий під час прокатки.

Також визначили, що максимальне значення модуля Юнга для зразку обробленого іонами з флюенсом 10^{14} cm^{-2} складає 125 ГПа порівняно з 100 ГПа для вихідного сплаву на глибині 50 нм, а для зразку опроміненого іонами з флюенсом 10^{13} cm^{-2} спостерігається зменшення модуля пружності до 92 ГПа на тій же глибині. Варто зауважити, що величина модуля пружності для першого зразку монотонно прямує до 120 ГПа, а для другого - до 110 ГПа (як для вихідного) на глибині 200 нм.

Таким чином, виявилось, що при відповідних параметрах опромінювання можна отримати загартування поверхні. Важливим результатом, отриманого за допомогою методу наноіндентування, є те, що при обробці високоенергетичним пучком Kr з флюенсом 10^{14} cm^{-2} відбувається зміцнення приповерхневого шару цирконієвого сплаву Zr1%Nb.

Відтворення умов аварійних випромінювальних навантажень потребує застосування відповідних джерел іонізуючого випромінювання. Прискорювач ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» ТЕМП-А був створений в рамках програми з реалізації керованого термоядерного синтезу. Його вплив супроводжується миттєвим підвищенням температури мішені.

Опромінення сплаву сильнострумовим електронним пучком середньою потужністю

$\sim 10^8$ Вт/см² при цьому зважаючи на нерівномірність густини пучка по перетину значення потужності варіювалось в межах 10^6 - 10^8 Вт/см². Це зумовило різну інтенсивність впливу на мішені.

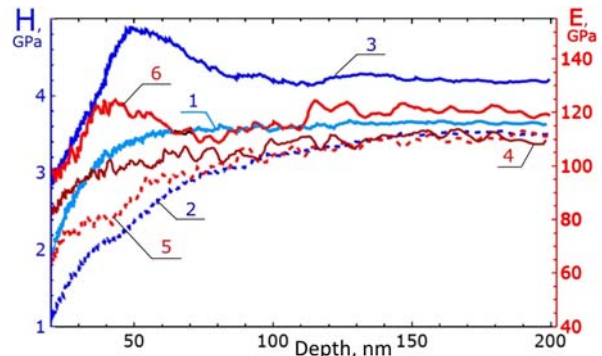


Рис. 1. Значення поверхневої нанотвердості в залежності від глибини поверхні зразку (ліва вісь крива 1 – вихідний зразок, крива 2 – флюенс 10^{13} іон/см², крива 3 флюенс 10^{14} іон/см²) та модуля пружності (права вісь, крива 4 – вихідний зразок, крива 5 – флюенс 10^{13} іон/см², крива 6 флюенс 10^{14} іон/см²) [10]

Фактор величини потужності дози відображається не тільки на розподілі температурного поля, але й на формуванні поля ударно акустичної дії. Так, згідно [11], ударні хвилі виникають за умови дотримання нерівності

$$I \leq \frac{C_L^4 \rho R_0 \tau}{S}, \quad (1)$$

де I – інтенсивність пучка, C_L – повздовжня швидкість звуку в матеріалі мішені, ρ – густина, R_0 – пробіг електронів в мішені, S – площа опромінюваної поверхні, τ – тривалість імпульсу.

З опроміненої мішені були виготовлені зразки з ділянок, що опромінювалися різними значеннями інтенсивності. Злам відбувся перпендикулярно напрямку прикладеного навантаження. Одержані нами фрактограми зламів опроміненої мішені цирконієвого сплаву показують відмінність структурного стану ділянок, що опромінювалися з різною інтенсивністю. Так для зони з найвищою інтенсивністю рис. 2а характерне відшарування зони, що була переплавлена пучком. Енергія пучка була витрачена на абляційний викид верхнього шару розплавленої речовини.

Для зони з помірнішим переплавом рис. 2б властиве утворення шаруватої структури в області, що лежить під зоною пучкового переплаву. До того ж в проміжній перехідній області спостерігаються пори та виділення в місцях присутності ротаційних мод, які виникають, як наслідок ділянок з підвищеною кривизною границь зерен [12]. Також відомо [13], що обробка металів сильноточковим релятивістським електронним пучком спричиняє утворення просторово складної поверхні поділу зерен.

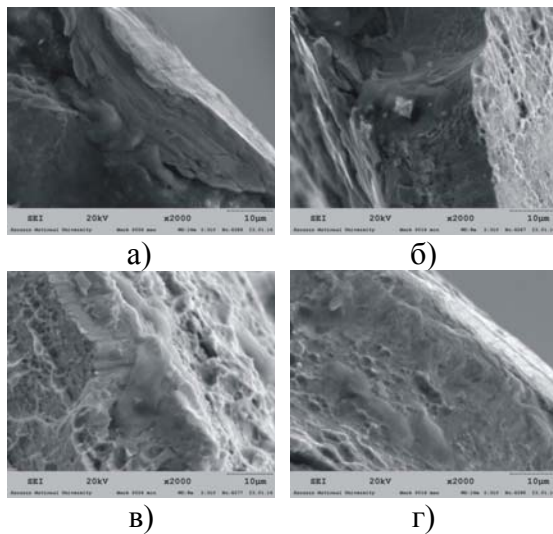


Рис. 2. Фрактограми зламів мішені зі сплаву Zr1%Nb, опроміненої СРЕП (від а до г інтенсивність опромінювання послідовно зменшується від 10^6 до 10^8 Вт/см²)

З рис. 2в та рис. 2г випливає, що подальше зменшення інтенсивності опромінення призводить до появи плавного переходу між опроміненою та неопроміненими областями а характер їх зламу стає в'язкішим.

Становить інтерес аналіз металографічних зображень шліфу мішені в області максимальної густини пучка. Якщо зазвичай на шліфі мішені відслідковується зона переплаву, перехідна зона, яка формується в полі високої температури та механічних напружень та зона з початковою структурою, то для цирконієвого сплаву, опроміненого з найбільшою інтенсивністю ми спостерігаємо більшу кількість відмінних між собою модифікованих пучком областей.

Так на рис. 3а спостерігаємо чотири шари з відмінною будовою, при цьому слід зважа-

ти, що інтефейсні шари між ними також являють собою окремі утворення.

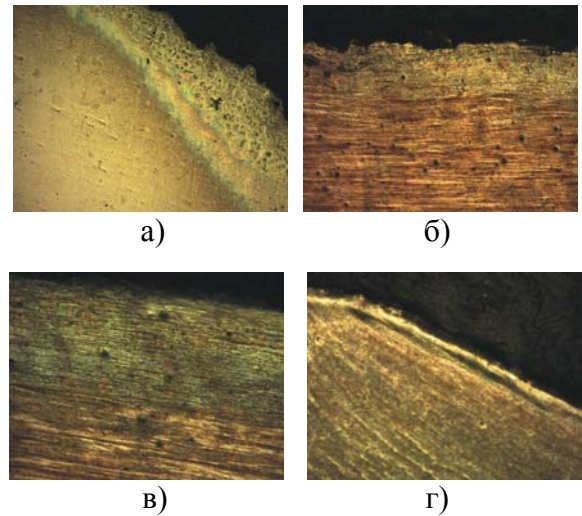


Рис. 3. Металографічні шліфи (збільшення x200) ділянок мішені зі сплаву Zr1%Nb, опроміненої СРЕП (від а до г інтенсивність опромінювання послідовно зменшується від 10^6 до 10^8 Вт/см²)

Зі зниженням інтенсивності рис. 3б – 3г, спостерігається зниження шорсткості поверхні та зменшення товщини переплавленого шару, відповідно з цим у меншій мірі модифікується і підповерхневий шар.

ВИСНОВКИ

У роботі реалізований підхід на основі імітаційного моделювання впливу на сплав Zr1%Nb газоподібних уламків поділу, яке полягало в його опроміненні пучком іонів $^{86}\text{Kr}^{+15}$ з енергією 107 МеВ. Досліджено фізико-механічні властивості приповерхневого шару сплаву, в межах якого частинки втрачали свою енергію та утворювали дефекти. Механічні властивості було визначено методом наноіндентування. Встановлено граничне значення флюенсу, яке призводить до змінювання механічних характеристик унаслідок генерації дефектів.

З огляду на необхідність прогнозування аварійних ситуацій на об'єктах атомної енергетики, є важливим вивчення стійкості матеріалів під впливом екстремальних чинників. Сильноточковий пучок електронів дозволяє відтворити низку чинників, що виникають при аварійних ситуаціях – потоки іонізуючого випромінювання, високі температури, ударно-хвильовий вплив.

Застосування сильноточових релятивістських електронних пучків при певній критичній потужності дозволяє одержувати багаточастотну поверхневу модифіковану структуру, властивості якої потребують подальшого дослідження, оскільки вони можуть мати вищу стійкість до високотемпературного окислення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Риволь Ж.-П. Электроядерная установка для уничтожения радиоактивных отходов // УФН. – 2003. – Т. 173. – № 3. – С. 747-755.
2. <https://www.iaea.org/newscenter/news/fukushima-nuclear-accident-update-log-15>
3. Маслов В. П. Фазовые переходы нулевого рода и квантование закона Ципфа // ТМФ. – 2007. – Т. 150. – № 1. – С. 118-142.
4. Neeb K.-H. The radiochemistry of nuclear power plants with light water reactors. – Berlin, New York: Walter de Gruyter, 1997. – 733 p.
5. Годин Ю. Г., Тенишев А. В., Новиков В. В. Том 6, часть 2. Ядерные топливные материалы // Физическое материаловедение: Учебник для вузов / Под общей ред. Б.А. Калина. – М.: МИФИ, 2008. – 604 с.
6. Шмаков А. А. Водородное охрупчивание и гидридное разрушение циркониевых изделий водоохлаждаемых ЯЭУ. – <http://www.dissercat.com/>, вільний.
7. Дидык А. Ю., Регель В. Р., Скуратов В. А., Михайлова Н. Ю. Радиационное упрочнение металлов, облученных тяжелыми ионами // ЖТФ. – 1989. – Т. 59, в. 5. – С. 107-111.
8. Oliver W. C., Pharr G. M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // J. Mater. Res. – 1992. – No. 7. – P. 1564-1583.
9. Довбня А. Н., Лавриненко С. Д., Закутин В. В., Аксёнова А. Н. Модификация поверхности циркония и сплава Zr1%Nb электронным пучком ускорителя на основе магнетронной пушки // ВАНТ, №2. – 2011. – с. 39-45.
10. Klepikov V. F., Lonin Yu. F., Lytvynenko V. V., Ponomarev A. G., Startsev O. S., Uvarov V. T. / Behavior of Zr1%Nb Alloy Under Swift Kr Ion and Intense Electron Irradiation // Journal of Nano- and Electronic Physics. 2015. – Vol. 7. – No. 4. – P. 040166(7pp).
11. В. И. Бойко, А. Н. Валяев, А. Д. Погребняк. Модификация металлических материалов импульсными мощными пучками частиц // УФН. – 1999. – Т. 169, № 11. – С. 1243-1271.

12. Панин В. Е., Егорушкин В. Е. Солитоны кривизны как обобщенные волновые носители пластической деформации и разрушения // Физ. мезомех. – 2013. – Т. 16. – № 3. – С. 7-26.
13. Klepikov V. F., Lonin Yu. F., Ponomarev A. G. et. al. Fractality of Fractures of Aluminum and Titanium Alloys Irradiated by Intensive Electron Beam // Journal of Nano- and Electronic Physics. – 2016. – Vol. 8. – No. 3, 03009 (5pp).

REFERENCES

1. Rivol Zh.-P. Elektroyadernaya ustanovka dlya unichtozheniya radioaktivnykh otkhodov // UFN. – 2003. – Т. 173. – № 3. – С. 747-755.
2. <https://www.iaea.org/newscenter/news/fukushima-nuclear-accident-update-log-15>
3. Maslov V. P. Fazovyye perekhody nulevogo roda i kvantovaniye zakona Tsipfa // TMF. – 2007. – Т. 150. – № 1. – С. 118-142.
4. Neeb K.-H. The radiochemistry of nuclear power plants with light water reactors. – Berlin, New York: Walter de Gruyter, 1997. – 733 p.
5. Godin Yu. G., Tenishev A. V., Novikov V. V. Tom 6. chast 2. Yadernyye toplivnyye materialy // Fizicheskoye materialovedeniye: Ucheb-nik dlya vuzov / Pod obshchey red. B.A. Kalina. – M.: MIFI. 2008. – 604 s.
6. Shmakov A. A. Vodorodnoye okhrupchivaniye i gidridnoye razrusheniye tsirkoniyevykh izdeliy vodoohlazhdayemykh YaEU. – <http://www.dissercat.com/>. vilniy.
7. Didyk A. Yu., Regel V. R., Skuratov V. A., Mikhaylova N. Yu. Radiatsionnoye uprochneniye metallov. obluchennykh tyazhelymi ionami // ZhTF. – 1989. – Т. 59. v. 5. – С. 107-111.
8. Oliver W. C., Pharr G. M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // J. Mater. Res. – 1992. – No. 7. – P. 1564-1583.
9. Dovbnya A. N., Lavrinenko S. D., Zakutin V. V., Aksenova A. N. Modifikatsiya poverkhnosti tsirkoniya i splava Zr1%Nb elektronnyim puchkom uskoritelya na osnove magnetronnoy pushki // VANT. №2. – 2011. – s. 39-45.
10. Klepikov V. F., Lonin Yu. F., Lytvynenko V. V., Ponomarev A. G., Startsev O. S., Uvarov V. T. / Behavior of Zr1%Nb Alloy Under Swift Kr Ion and Intense Electron Irradiation // Journal of Nano- and Electronic Physics. 2015. – Vol. 7. – No. 4. – P. 040166(7pp).
11. Boyko V. I., Valyayev A. N., Pogrebnyak A. D. Modifikatsiya metallicheskih materialov im-

- pulsnymi moshchnymi puchkami chastits // UFN. – 1999. – Т. 169. № 11. – S. 1243-1271.
12. Panin V. E., Egorushkin V. E. Solitony krivizny kak obobshchennyye volnovyye nositeli plasticheskoy deformatsii i razrusheniya // Fiz. mezhmekh. – 2013. – Т. 16. – № 3. – S. 7-26.
13. Klepikov V. F., Lonin Yu. F., Ponomarev A. G. et. al. Fractality of Fractures of Aluminum and Titanium Alloys Irradiated by Intensive Electron Beam // Journal of Nano- and Electronic Physics. – 2016. – Vol. 8. – No. 3, 03009 (5pp).

УДК 621.385.6

ПРИНЦИПЫ ФИЗИЧЕСКОЙ РАСШИФРОВКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СКАНИРУЮЩЕЙ МИКРОВОЛНОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Ю. Е. Гордиенко¹, А. В. Левченко¹, И. Н. Щербань¹

¹Харьковский национальный университет радиоэлектроники,
проспект Науки, 14, 61166 Харьков, Украина

E-mail: shcherban.ihor@gmail.com

Поступила в редакцию 27.03.2018

В работе численно исследуются приёмы построения изображений в СММ, обеспечивающие визуализацию профилей распределения физических параметров объекта в приповерхностной области. Показано, что изображение фундаментальных сигналов изменения резонансной частоты и добротности резонаторного сканирующего зонда далеко не всегда соответствуют профилю указанных параметров. Для обеспечения такого соответствия предлагается реконструировать изображение этих сигналов на основе аналитической аппроксимации соответствующих характеристик преобразования зонда и формирования оптимального пакета сигналов. В частности, для построения изображений профиля электропроводности $\sigma(x, y)$ следует использовать комбинированный сигнал вида $\Delta Q^{-1}/\Delta f(x, y)$. Для двухпараметровой диагностики профиля $\varepsilon(x, y)$ и профиля поверхности $\Delta h_z(x, y)$ целесообразно использовать два сигнала $\Delta f_1(x, y)$ и $\Delta f_2(x, y)$ при различных фиксированных значениях зазора h_{z1} и h_{z2} и аналитические аппроксимации соответствующих характеристик преобразования. Результаты исследования иллюстрируют демонстрацией профиля общего сигнала и восстановленным профилем физических величин. **Ключевые слова:** сканирующая микроволновая микроскопия, характеристики преобразования, реконструкция изображений, многопараметровость диагностики, аналитическая аппроксимация.

ПРИНЦИПИ ФІЗИЧНОГО РОЗШИФРУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ В СКАНУЮЧІЙ МІКРОХВИЛЬОВІЙ МІКРОСКОПІЇ

Ю. Є. Гордієнко¹, А. В. Левченко¹, І. М. Щербань¹

¹Харківський національний університет радіоелектроніки,
проспект Науки, 14, 61166 Харків, Україна

В роботі чисельно досліджуються прийоми побудови зображень в СММ, що забезпечують візуалізацію профілів розподілу фізичних параметрів об'єкта в приповерхневій області. Показано, що зображення фундаментальних сигналів зміни резонансної частоти і добротності резонатора скануючого зонда далеко не завжди відповідають профілю зазначених параметрів. Для забезпечення такої відповідності пропонується реконструювати зображення цих сигналів на основі аналітичної апроксимації відповідних характеристик перетворення зонда і формування оптимального пакету сигналів. Зокрема, для побудови зображень профілю електропровідності $\sigma(x, y)$ слід використовувати комбінований сигнал виду $\Delta Q^{-1}/\Delta f(x, y)$. Для двопараметрової діагностики профілю $\varepsilon(x, y)$ і профілю поверхні $\Delta h_z(x, y)$ доцільно використовувати два сигнали $\Delta f_1(x, y)$ і $\Delta f_2(x, y)$ при різних фіксованих значеннях зазору h_{z1} і h_{z2} і аналітичні апроксимації відповідних характеристик перетворення. Результати дослідження ілюструють демонстрацією профілю загального сигналу і відновленим профілем фізичних величин.

Ключові слова: скануюча мікрохвильова микроскопія, характеристики перетворювання, реконструкція зображень, багатопараметровість діагностики, аналітична апроксимація

PRINCIPLES OF PHYSICAL IMAGE DECODING IN SCANNING MICROWAVE MICROSCOPY

Yuriy Gordienko¹, Andriy Levchenko¹, Ihor Shcherban¹

¹Kharkiv National University of Radio Electronics, Nauky Avenue, 14, 61166 Kharkiv, Ukraine

In the paper, the methods of constructing images in SMM are numerically studied, providing visualization of profiles of the distribution of physical parameters of an object in the near-surface region. It is shown that the image of the fundamental signals of the change in the resonant frequency and Q of the resonator scanning probe does not always correspond to the profile of the indicated parameters. To ensure such correspondence, it is proposed to reconstruct the image of these signals on the basis of an analytical approximation of the corresponding conversion characteristics of the probe and formation of the optimal signal packet. In particular, to ensure an imaging of the electrical conductivity profile

© Ю. Е. Гордиенко, А. В. Левченко, И. Н. Щербань, 2018

$\sigma(x, y)$, a combined signal of the form $\Delta Q^{-1}/\Delta f(x, y)$ should be used. For two-parameter diagnostics of the profile $\varepsilon(x, y)$ and the surface profile $\Delta h_z(x, y)$, it is advisable to use two signals $\Delta f_1(x, y)$ and $\Delta f_2(x, y)$ for various fixed values of the gap h_{z1} and h_{z2} and analytical approximations of the corresponding conversion characteristics. The results of the study are illustrated by demonstrating the profile of the common signal and the reconstructed profile of physical quantities.

Keywords: scanning microwave microscopy, conversion characteristics, reconstruction of images, multiparameter diagnostics, analytical approximation

ORCID IDs

Yuriy Gordiienko: <https://orcid.org/0000-0002-3263-5268>

Andriy Levchenko: <https://orcid.org/0000-0002-7321-2085>

Ihor Shcherban: <https://orcid.org/0000-0002-6896-3095>

ВВЕДЕНИЕ

Сканирующая микроволновая микроскопия (СММ) относится к разделу так называемых сканирующих зондовых микроскопов (СЗМ), для которых характерно использование одиночного зонда со сверхвысоким пространственным разрешением (нанозонда) и системы пошагового его смещения относительно исследуемого объекта [1].

СММ в отличие от широко зарекомендовавших себя сканирующей туннельной микроскопии (СТМ), атомносиловой микроскопии (АСМ), сканирующей емкостной микроскопии (СЕМ) и их модификаций характеризуется перспективностью 3D диагностики объектов [2, 3] и, что, особенно важно, многопараметровостью информативных измерительных сигналов [4, 5]. Однако, эта особенность накладывает отдельные требования на анализ получаемых при СММ изображений.

Для аргументации сказанного достаточно указать, что в отличие от АСМ, показывающей в основном нанопрофиль поверхности объекта, изображение СММ содержит информацию не только о профиле поверхности, а ещё и, наноразмерную информацию о профиле распределения диэлектрической проницаемости и электропроводности (или $\tan \delta$ на СВЧ) [4, 5]; фоточувствительности [6], влагосодержания [7]; магнитных свойствах [8] и др. Естественно, что необходимая многопараметровость диагностики реализуется путем организации соответствующего количества выделяемых сигналов измерительной информации и выделением вклада каждого из них в процессе обработки изображений. Практика компьютерных томографий показательна в этом отношении, однако прямая аналогия, как правило, неприменима. В целом, проработка вопросов СММ томографии

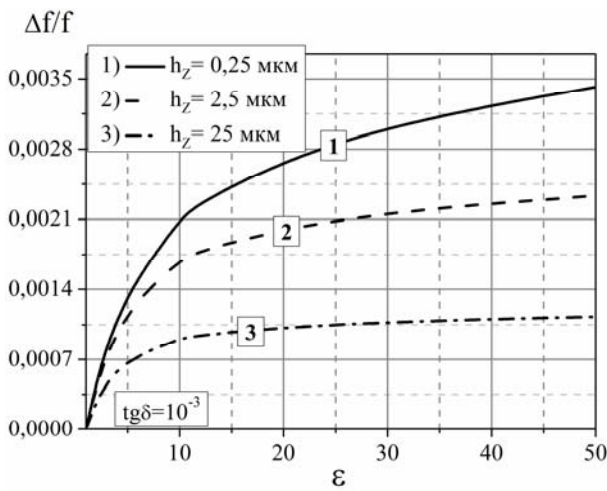
находится только в начальной стадии, хотя и является весьма актуальной [2, 3].

В работах [4, 5] осуществлены первые попытки постановки двухпараметровой диагностики при СММ и создания начал необходимой теории. Попутно следует заметить, что даже на этом начальном этапе в полный рост стала проблема решения так называемых обратных задач измерения [9]. Теоретически эта проблема существует только в ситуации, когда прямая задача решается сугубо приближенными численными методами [10]. Для СММ это как раз и является характерным. Целью данной работы является обоснование последовательности подходов к решению обратных задач реконструкции СММ изображений путем использования аналитических приближений результатов решения прямых электродинамических задач взаимодействия резонаторных СВЧ зондов с различными диагностируемыми объектами.

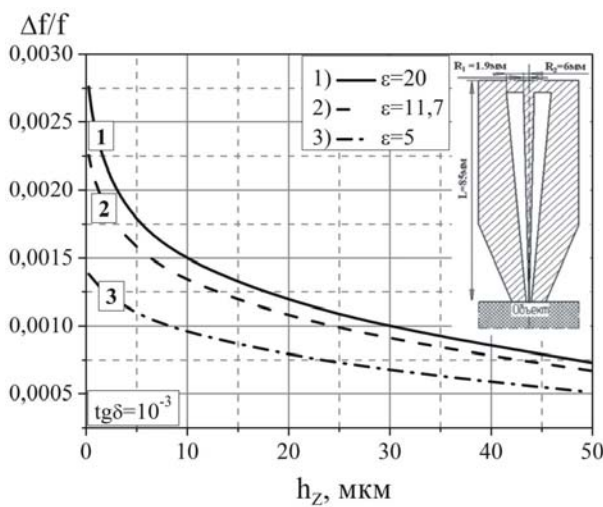
ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В [11] уже была предпринята попытка обработки одного такого подхода к реконструкции изображения профиля поверхности, получаемого в СММ с помощью коаксиального резонаторного зонда. Была показана необходимость такой реконструкции в связи с существенной нелинейностью зависимостей сигналов измерительной информации в такой системе от величины зазора между острием зонда и поверхностью объекта исследования [12]. Предложено аналитическое приближение для сигнала сдвига резонансной частоты обеспечивающее простое решение обратной задачи измерения и соответствующей реконструкции СММ изображений профиля поверхности.

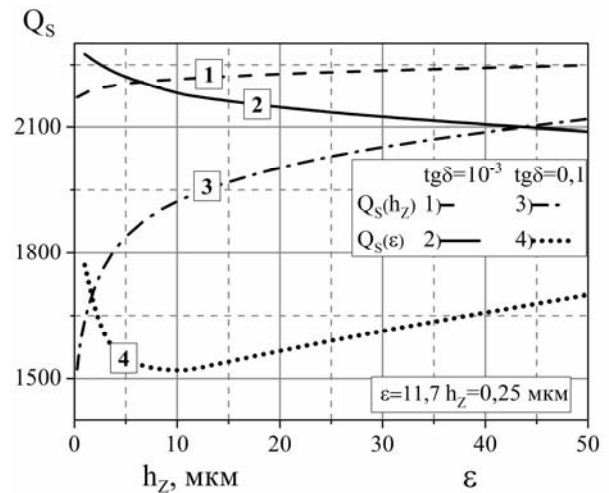
Следующим этапом решения указанных проблем является организация расшифровки СММ изображений при двух и трехпараметровой СММ диагностике различных объектов. В частности, при диагностике влагосодержащих структур [7] или биообъектов возникают проблемы одновременного наблюдения профиля поверхности и распределения по ней значений диэлектрической проницаемости. Если последнее имеет комплексный характер, то диагностика становится уже трехпараметровой, т. к. необходимо общий сигнал реконструировать по трём параметрам: неровность поверхности, неоднородность диэлектрической проницаемости $\varepsilon(x, y)$ и $\sigma(x, y)$.



а



б

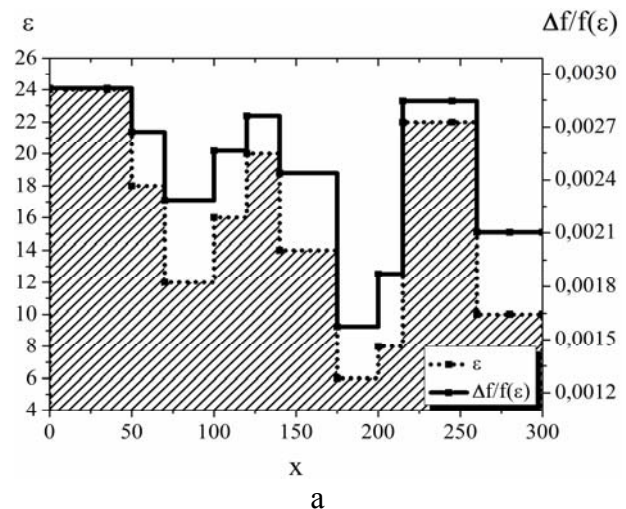


в

Рис. 1. Характеристики преобразования фундаментальных сигналов $\Delta f/f$ в зависимости от диэлектрической проницаемости объекта (а) и зазора между острием и образцом (б), и Q_s при различных значениях $\text{tg}\delta$ (в)

Численные решения прямых задач по этим параметрам уже обсуждалось нами в [12]. Приведём их в некотором общем виде (рис.1) для схематического конструктива, изображенного на вставке (рабочая частота 10 ГГц).

Очевидна существенная нелинейность характеристик преобразования, обуславливающая сложность (или, скорее, невозможность) физической трактовки соответствующих СММ изображений самих сигналов. Чтобы нагляднее это продемонстрировать, на рис. 2 приведены в одномерном варианте виртуальные профили параметров и ожидаемые по ним профили сигналов.



а

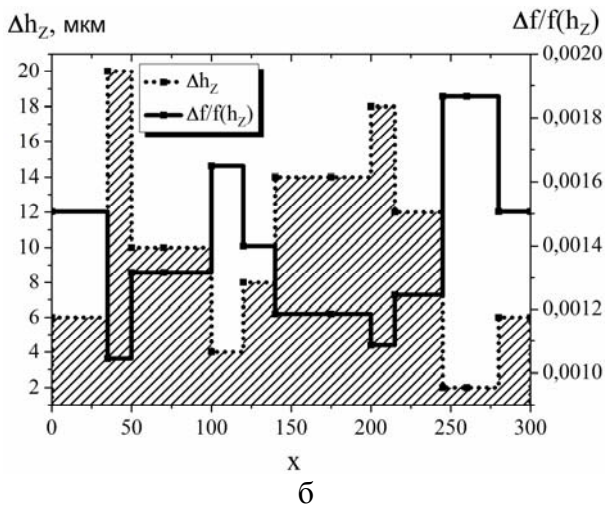


Рис. 2. Пробные виртуальные профили и соответствующие им профили сигналов $\varepsilon(x)$ (а) и $\Delta h_z(x)$ (б)

В первую очередь эти данные отчетливо убеждают в наличии серьезной проблемы реконструкции изображений по конкретным параметрам. В предыдущих работах [11, 12, 13] нами уже обсуждался вопрос аналитической аппроксимации характеристик преобразования для фундаментальных сигналов и возможность её использования при решении обратной задачи измерения. Была показана эффективность такого подхода при однопараметровой реконструкции изображения в СММ. Однако, совершенно очевидно, что СММ изображения, например, сигнала сдвига резонансной частоты одновременно в общем случае содержат информацию о влиянии зазора между зондом и объектом, и диэлектрической проницаемости объекта. Это

неоднократно подтверждено экспериментально в многочисленных работах [4, 14]. Как правило, такие СММ изображения требуется расшифровывать по двум параметрам. Если объект имеет значение $\text{tg}\delta > 0,1$, то указанный сигнал оказывается зависящим от трёх параметров и потребует соответствующее расшифровывание, или реконструкция его СММ изображений.

Для начала предположим, что зависимостью $\Delta f/f(x, y)$ от $\text{tg}\delta$ можно пренебречь, и достаточно ограничиться двухпараметровой расшифровкой и реконструкцией СММ изображений, получая изображение о пространственном распределении $\text{tg}\delta(x, y)$ через комбинированный сигнал [15]. В таком случае следует искать подход формируя аналитическое представление сигнала $\Delta f/f(x, y)$ для двух линейно не связанных изображений $\Delta f/f_1(x, y)$ и $\Delta f/f_2(x, y)$. Они могут быть получены, путем сканирования при двух положениях зонда по вертикали. Следует только позаботиться об оптимальном выборе этих положений.

Детальное исследование аналитического представления $\Delta f/f(x, y)$, аналогичного используемому нами в [13] показало, что по критериям слабой зависимости коэффициентов от $\varepsilon(x, y)$ и допустимой точности воспроизводимости зависимости сигнала от профиля поверхности $\Delta h_z(x, y)$ более подходящими оказываются ниже приведенные соотношения аппроксимации.

$$\frac{\Delta f}{f}(h_z, \varepsilon) = y_0(h_z) + \sum_{i=1}^3 ((A_i(h_z) \cdot \exp(\frac{-\varepsilon}{t_i(h_z)}))) \quad (1)$$

$$\frac{\Delta f}{f}(h_z + \Delta h_z, \varepsilon) = y_0(h_z + \Delta h_z) + \sum_{i=1}^3 ((A_i(h_z + \Delta h_z) \cdot \exp(\frac{-\varepsilon}{t_i(h_z + \Delta h_z)}))) \quad (2)$$

где: $y_0, t_1, A_1, t_2, A_2, t_3, A_3$ – коэффициенты, зависящие, в общем случае, от зазора h_z , зависимость которых имеет общий вид сигмоиды вида:

$$f(x) = \frac{L}{1 + e^{-k(x-x_0)}}$$

где: L – отвечает за диапазон, в котором функция претерпевает изменения; x_0 – зна-

чение по оси икс, отвечающее за местоположение центра сигмоиды; k – значение, отвечающее за крутизну кривой; x – в данном случае является значением зазора h_z .

Таким образом, получается система, состоящая из двух уравнений (1) и (2) и имеющая 2 неизвестных ε и h_z . Решая эту систему для каждой точки сканирования получаем значения этих параметров в этих точках.

Исследуем область применимости этого подхода на виртуальных моделях профилей $\varepsilon(x, y)$ и $\Delta h_z(x, y)$ представленных на рис.2. На рис. 3 для удобного сравнения приведено вид измеряемого одномерного профиля сигналов $\Delta f/f(h_z, \varepsilon)$ и результаты восстановления заданных виртуальных профилей $\varepsilon(x)$ и $\Delta h_z(x)$ в виде их процентного отклонения $\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon(x)}$ и $\frac{\Delta(\Delta h_z)}{\Delta h_z(x)}$.

Из них видно, что погрешность по всей длине сканирования кроме одного участка не превышает 3%, что является весьма приемлемым результатом. Наличие заметных отклонений объясняется тем, что погрешность аппроксимации сигнала по одному параметру и последующих аппроксимаций коэффициентов главной аппроксимационной функции по второму параметру складывается.

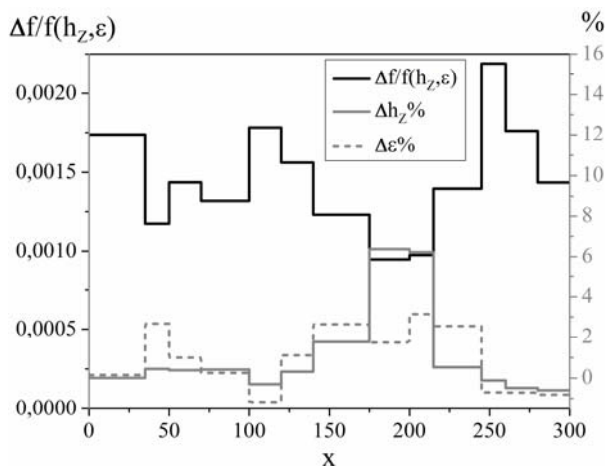


Рис. 3. Измеряемый общий профиль сигналов $\Delta f/f(h_z, \varepsilon)$ и восстановленные заданные виртуальные профили $\varepsilon(x)$ и $\Delta h_z(x)$ в виде их процентного отклонения

Идеальным является случай, когда эти погрешности друг друга ликвидируют, худшим – когда все эти погрешности имеют один и тот же знак. На участке $175 < x < 215$ погрешность восстановления профиля зазора находится в районе 6%. Очевидно, что резкое увеличение погрешности вызвано тем, что результирующий сигнал на этом участке принял наименьшее значение. Можно сделать вывод, что когда сигнал принимает значения менее чем 10^{-3} , что соответствует малому значению диэлектрической проницаемости и наибольшему значению зазора, из-за

явления насыщения сигнала при большом зазоре его вклад в общий сигнал выделяется с меньшей точностью. Поэтому проведение измерений при зазорах более 20 мкм является нецелесообразным по причине высоких погрешностей, возникающих в результате восстановления слишком низкого результирующего сигнала.

ВЫВОДЫ

Проведенные численные исследования наглядно убеждают в том, что СММ изображения имеют сложный комплексный характер, зависящий как от типа выделяемого при сканировании сигнала измерительной информации, так и от влияния на его величину физических параметров приповерхностной области объекта. Поэтому расшифровка этих изображений носит сложный характер.

Апробирован один из возможных подходов расшифровки, базирующийся на формировании комплекта измерительных сигналов, путём создания изображений при двух и более значениях величин зазора между острием зонда и объектом. Выполнена апробация подхода на примере двухпараметрового разделения изображения на изображение профиля поверхности $\Delta h_z(x, y)$ и распределение диэлектрической проницаемости $\varepsilon(x, y)$.

Если дополнить такой комплект изображением комбинированного сигнала вида $\Delta Q_S^{-1}(x, y)$, то будет осуществлено разделение комплексного СММ изображения на три физических составляющие $\varepsilon(x, y)$, $\sigma(x, y)$ и $\Delta h_z(x, y)$. Результат представлен в одномерном варианте зависимости профилей от координаты x .

При стабилизации зазора с помощью СТМ можно ограничиться выделением сигналов изображения $\Delta f/f(x, y)$ и $\Delta Q^{-1}(x, y)$. Во всех случаях для получения профилей истинных значений ε , $tg\delta$ и Δh_z необходимо пользоваться аналитически аппроксимированными характеристиками преобразования, вид которых описан нами в предыдущей работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bhushan B. Scanning Probe Microscopy - Principle of Operation, Instrumentation, and Probes Springer Handbook of Nanotechnology / B. Bhushan, M. Othmar // ISBN 978-3-540-

- 29855-7. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007, 591 p.
2. Вдовичева Н. К. Глубинная профилометрия свободных носителей в полупроводниках при помощи ближнеполюсной микроволновой томографии / Н. К. Вдовичева, М. А. Галин, А. Н. Резник, И. А. Шерешевский // Известия РАН. Серия физическая. – 2012. – Т. 76. – № 2. – С. 172-175.
 3. Гайдай Ю. А. Ближнеполюсная СВЧ томография приповерхностного слоя диэлектриков / Ю. А. Гайдай, В. С. Сидоренко, О. В. Синькевич // Радиоэлектроника. – 2012. – Т. 55, № 3. – С. 37-42.
 4. Gao C. Quantitative scanning evanescent microwave microscopy and its applications in characterization of functional materials libraries / C. Gao, B. Hu, I. Takeuchi, K.-S. Chang, X.-D. Xiang and G. Wang // Meas. Sci. Technol. – 2005. – Vol. 16, No. 1. – P. 248-260.
 5. Tselev A. Broadband dielectric microwave microscopy on micron length scales / A. Tselev, S. M. Anlage, Z. Ma, and J. Melngailis // Review of Scientific Instruments. – 2007. – Vol. 78. – P. 044701-044701-7.
 6. Weber J. C. A near-field scanning microwave microscope for characterization of inhomogeneous photovoltaics / J. C. Weber, J. B. Schager, N. A. Sanford, A. Imtiaz, T. M. Wallis, L. M. Mansfield, K. J. Coakley, K. A. Bertness, P. Kabos, V. M. Bright // Review of Scientific Instruments. – 2012. – Vol. 83, No. 8. – P. 083702.
 7. Tselev A. Seeing through Walls at the Nanoscale: Microwave Microscopy of Enclosed Objects and Processes in Liquids / A. Tselev, J. Velmurugan, A. V. Ievlev, S. V. Kalinin, and A. Kolmakov // ACS Nano. – 2016. – Vol. 10, No. 3. – P. 3562-3570.
 8. Joseph C. H. Scanning microwave microscopy technique for nanoscale characterization of magnetic materials / C. H. Joseph, G. M. Sardi, S. S. Tuca, G. Gramse, A. Lucibello, E. Proietti, F. Kienberger, R. Marcelli // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2016. – Vol. 420. – P. 62-69.
 9. Gaikovich K. P. Inverse problem of near-field scattering in multilayer media / K. P. Gaikovich, P. K. Gaikovich // Inverse Problems. – 2010. – Vol. 26, No. 12. – P. 125013.
 10. T. Monti Multiphysics simulation of a scanning microwave microscope: a joint electromagnetic and thermal analysis / T. Monti, S. W. Kingman // ARMMS. – 2015.
 11. Гордиенко Ю. Е. Алгоритм реконструкции изображений в ближнеполюсной сканирующей микроскопии / Ю. Е. Гордиенко, С. И. Мельник, Н. И. Слипченко, В. В. Петров, А. Л. Ищенко // Радиотехника. – 2003. – С. 135.
 12. Gordienko Yu. Ye. Analytical simulation of instrumentation performance of resonance probes in scanning microwave microscopy / Yu. E. Gordienko, S. U. Larkin, A. M. Prokaza // Telecommunications and Radio Engineering. – 2012. – Vol. 71, No. 12. – P. 1115-1123.
 13. Gordienko Yu. Ye. Naturalization of the image in scanning microwave microscopy / Yu. Ye. Gordienko, I. M. Shcherban, A. V. Levchenko // Telecommunications and Radio Engineering. – 2017. – Vol. 76, No. 19. – P. 1769-1775.
 14. Korolyov S. A. Quantitative characterization of semiconductor structures with a scanning microwave microscope / S.A.Korolyov, A.N. Reznik // Review of Scientific Instruments. – 2018. – Vol. 89, No. 2. – P. 023706.
 15. Gordienko Yu. Ye. Naturalization of the image in scanning microwave microscopy / Yu. Ye. Gordienko, I. M. Shcherban, A. V. Levchenko // Telecommunications and Radio Engineering. – 2017. – Vol. 76, No. 19. – P. 1769-1775.

REFERENCES

1. Bhushan B. Scanning Probe Microscopy - Principle of Operation, Instrumentation, and Probes Springer Handbook of Nanotechnology / B. Bhushan, M. Othmar // ISBN 978-3-540-29855-7. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007, 591 p.
2. Vdovicheva N.K. Glubinnaya profilometriya svobodnykh nositeley v poluprovodnikakh pri pomoschi blizhnepolnoy mikrovolnovoy tomografii / N. K. Vdovicheva, M. A. Galin, A. N. Reznik, I. A. Shereshevskiy // Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya. – 2012. – Т. 76. – No. 2. – S. 172-175.
3. Gayday Yu.A. Blizhnepolevaya SVCh tomografiya pripoverhnostnogo sloya dielektrikov / Yu.A. Gayday, V.S. Sidorenko, O.V. Sinkevich // Radioelektronika. – 2012. – Т. 55, No. 3. – S. 37-42.
4. Gao C. Quantitative scanning evanescent microwave microscopy and its applications in characterization of functional materials libraries / C. Gao, B. Hu, I. Takeuchi, K.-S. Chang, X.-

- D. Xiang and G. Wang // *Meas. Sci. Technol.* – 2005. – Vol. 16, No. 1. – P. 248-260.
5. Tselev A. Broadband dielectric microwave microscopy on micron length scales / A. Tselev, S. M. Anlage, Z. Ma, and J. Melngailis // *Review of Scientific Instruments.* – 2007. – Vol. 78. – P. 044701-044701-7.
6. Weber J. C. A near-field scanning microwave microscope for characterization of inhomogeneous photovoltaics / J. C. Weber, J. B. Schager, N. A. Sanford, A. Imtiaz, T. M. Wallis, L. M. Mansfield, K. J. Coakley, K. A. Bertness, P. Kabos, V. M. Bright // *Review of Scientific Instruments.* – 2012. – Vol. 83, No. 8. – P. 083702.
7. Tselev A. Seeing through Walls at the Nanoscale: Microwave Microscopy of Enclosed Objects and Processes in Liquids / A. Tselev, J. Velmurugan, A. V. Ievlev, S. V. Kalinin, and A. Kolmakov // *ACS Nano.* – 2016. – Vol. 10, No. 3. – P. 3562-3570.
8. Joseph C. H. Scanning microwave microscopy technique for nanoscale characterization of magnetic materials / C. H. Joseph, G. M. Sardi, S. S. Tuca, G. Gramse, A. Lucibello, E. Proietti, F. Kienberger, R. Marcelli // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* – 2016. – Vol. 420. – P. 62-69.
9. Gaikovich K. P. Inverse problem of near-field scattering in multilayer media / K. P. Gaikovich, P. K. Gaikovich // *Inverse Problems.* – 2010. – Vol. 26, No. 12. – P. 125013.
10. T. Monti Multiphysics simulation of a scanning microwave microscope: a joint electromagnetic and thermal analysis / T. Monti, S. W. Kingman // *ARMMS.* – 2015.
11. Gordienko Yu. E. Algoritm rekonstruktsii izobrazheniy v blizhnepolevoy skaniruyushey mikroskopii / Yu. E. Gordienko, S. I. Melnik, N. I. Slipchenko, V. V. Petrov, A. L. Ischenko // *Radiotekhnika.* – 2003. – С. 135.
12. Gordienko Yu. Ye. Analytical simulation of instrumentation performance of resonance probes in scanning microwave microscopy / Yu. E. Gordienko, S. U. Larkin, A. M. Prokaza // *Telecommunications and Radio Engineering.* – 2012. – Vol. 71, No. 12. – P. 1115-1123.
13. Gordienko Yu. Ye. Naturalization of the image in scanning microwave microscopy / Yu. Ye. Gordienko, I. M. Shcherban, A. V. Levchenko // *Telecommunications and Radio Engineering.* – 2017. – Vol. 76, No. 19. – P. 1769-1775.
14. Korolyov S. A. Quantitative characterization of semiconductor structures with a scanning microwave microscope / S.A.Korolyov, A.N. Reznik // *Review of Scientific Instruments.* – 2018. – Vol. 89, No. 2. – P. 023706.
15. Gordienko Yu. Ye. Naturalization of the image in scanning microwave microscopy / Yu. Ye. Gordienko, I. M. Shcherban, A. V. Levchenko // *Telecommunications and Radio Engineering.* – 2017. – Vol. 76, No. 19. – P. 1769-1775.

УДК 662.61.537.66.092

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ РАДИАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ЗАМЕДЛЕНИЯ ДЕГРАДАЦИИ U_{OL} БИПОЛЯРНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ В ПОЛЯХ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

С. В. Быткин¹

¹ПАО «Запорожсталь», ул. Южное шоссе, 72, 69008, Запорожье, Украина

E-mail: bytkin@birmir.net

Поступила в редакцию 16.03.2018

В работе анализируется распределение уровня сигнала «логический ноль» (U_{OL}) для выборки биполярных ИМС, изготовленных с применением радиационно-технологического процесса с использованием α -частиц от радиоизотопного источника и электронов с энергией $\cong 5$ МэВ при действии тестирующего γ - и электронного облучения. Показана возможность эффективного повышения радиационной стойкости ИМС, имеющих бимодальное распределение U_{OL} до облучения.

Ключевые слова: повышение радиационной стойкости ИМС, применение радиационно-технологического процесса

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ РАДІАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ (РТП) ДЛЯ УПОВІЛЬНЕННЯ ДЕГРАДАЦІЇ U_{OL} БИПОЛЯРНИХ ИНТЕГРАЛЬНИХ МІКРОСХЕМ (ІМС) У ПОЛЯХ ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

С. В. Биткін¹

¹ПАТ «Запоріжсталь», вул. Південне шосе, 72, 69008, Запоріжжя, Україна

В роботі аналізується розподіл рівня сигналу «логічний нуль» (U_{OL}) для вибірки биполярних ІМС, виготовлених із застосуванням радіаційно-технологічного процесу з використанням α -частинок від радіоізотопного джерела і електронів з енергією $\cong 5$ МеВ при дії γ - і електронного тестуючого опромінення. Доведена можливість ефективного підвищення радіаційної стійкості ІМС, що мають бимодальний розподіл U_{OL} до опромінення.

Ключові слова: підвищення радіаційної стійкості ІМС, застосування радіаційно-технологічного процесу

EXPERIMENTAL AND STATISTICAL MODELING OF THE APPLICATION OF RADIATION TECHNOLOGICAL PROCESSES (RTP) FOR DECELERATION OF BIPOLAR INTEGRAL CIRCUITS (IC) U_{OL} DEGRADATION IN THE FIELDS OF IONIZING RADIATIONS

Serhiy Bytkin¹

¹PJSC «Zaporizhstal», 72 South Highway Str., 69008, Zaporizhia, Ukraine

The work analyzes the distribution of the signal level “logical zero” (U_{OL}) for the sampling of bipolar ICs manufactured using the radiation-technological process based on using α -particles from a radioisotope source and electrons with an energy of $\cong 5$ MeV under the action of testing γ - and electron irradiation. The possibility of effectively increasing the radiation resistance of ICs having a bimodal U_{OL} distribution before irradiation was shown.

Keywords: increase of radiation resistance of IC, application of radiation-technological process

ORCID IDs

Serhiy Bytkin: <https://orcid.org/0000-0003-3583-3371>

ВВЕДЕНИЕ

Задача обеспечения радиационной стойкости [1, 2] актуальна не только для интегральных микросхем (ИМС) аэрокосмических систем,

© С. В. Быткин, 2018

чувствительных к воздействию протонов, но и для микроэлектроники наземного оборудования – с уменьшением топологических размеров активных элементов и повышением

плотности упаковки возрастает чувствительность микросхем к наземным высокоэнергетическим атмосферным нейтронам. Существует тенденция применения коммерческих ИМС в условиях действия ионизирующих излучений, несмотря на недостаточный уровень их надёжности (функциональные отказы) по суммарной накопленной дозе, их стойкость не контролируется от партии к партии, а надёжность в экстремальных условиях эксплуатации не определена. Основная причина: разработка и изготовление ИМС со специальными свойствами требует значительных затрат, вследствие чего $\cong 20\%$ полупроводниковых компаний прекратили производство стойких к радиации ИМС, выросли цены и сроки поставки специализированных изделий. Необходима разработка методов обеспечения низкой степени деградации электрофизических характеристик ИМС в условиях действия ионизирующего излучения, совместимых с типичной полупроводниковой технологией, например, различных форм радиационно-термической обработки пластин, на которых сформированы транзисторные структуры. Специфическая часть технологии цифровых биполярных ИС существенно улучшает их радиационную стойкость [3, 4]. Например, для повышения радиационной стойкости ИС могут быть предложены практические результаты разработки и сравнительного анализа радиационно-технологических процессов (РТП) для прп структур, представленные автором специалистам NASA на Military and Aerospace Applications of Programmable Devices and Technologies Conference (MAPLD 1999, 2000, 2001, 2004) в Johns Hopkins University – Applied Physics Laboratory, Laurel, Maryland, USA [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Физико-технологические аспекты радиационной технологии, использующей энергию пучка электронов $\cong 6 - 10$ МэВ для дискретных приборов изучены практически исчерпывающе [6]. Вместе с тем, для планарных мелких структур ИМС с глубиной залегания

$\leq 3..5$ мкм возможно применение изотопных источников высокоэнергетических α -частиц. Физические процессы в кремнии, протекающие при его облучении α -частицами описаны в обзоре [7] и полученные результаты подтверждают возможность легирования полупроводниковых материалов радиационными дефектами, а, следовательно, их технологическое применение. Используемая в этой работе технология включает процесс облучения пластин с ИМС потоком высокоэнергетических частиц, например, α -частиц с энергией $\approx 4,5$ МэВ после формирования прп транзисторов диффузией, но до осаждения металлизации. Для подтверждения принципиальной возможности использования РТП для повышения стабильности ИМС при действии облучения использованы изделия, изготовленные по технологии «кремний с диэлектрической изоляцией» (КСДИ) с целью практического исключения токов утечки планарных активных элементов на результаты измерений. Приборы изготовлены на пластинах CZn-Si с $\rho = 0,3$ Ом·см, концентрацией междоузельного кислорода $N_{O_i} = 7 \cdot 10^{17}$ см⁻³, углерода $C_s = 2 \cdot 10^{16}$ см⁻³. После облучения проводится изотермический отжиг пластин для получения предусмотренных технической документацией значений h_{21E} выходных прп транзисторов ИМС для обеспечения $U_{OL} \leq 0,4$ В. Для выбора эффективных режимов РТП с точки зрения замедления деградации коэффициентов усиления транзисторов h_{21E} проводился полный факторный эксперимент 2^2 с использованием тестовых прп структур для прогнозирования влияния радиационно-термической обработки на деградацию h_{21E} , или, иными словами, вычислялось численное значение $Y = h_{21E}(\Phi) / h_{21E}(0)$, (Φ – доза облучения, к которому необходимо повысить устойчивость ИС, например, Φ_γ для γ -облученных прп структур). Для тестовых транзисторов, облученных технологически α -частицами и прошедших отжиг в соответствии с режимами, предусмотренными матрицей планирования эксперимента (обычно 250 – 350 °С) исследована деградация коэффициента усиления по току при $D_\gamma \approx$

10^7 Rad (источник ^{60}Co). Изменения Y рассчитываются с использованием экспериментальных данных при изменении условий проведения радиационно-технологического процесса: интегрального потока α -частиц (Φ_α , см^{-2}) и температуры изотермического отжига ($t_{\text{ann.}}$, $^\circ\text{C}$). Условие $Y = 1$ является признаком отсутствия изменения $h_{21E}(D_\gamma)$. Наиболее эффективным является применение $\Phi_\alpha \geq 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и $t_{\text{ann.}} \leq 300$. Для ИМС, изготовленных с применением РТП, необходимо подтверждение возможности перехода от технологии повышения радиационной стойкости тестовых прн структур к статистически обоснованной технологии замедления деградации критериальных параметров цифровых ИМС, прежде всего наиболее чувствительного к радиации уровня «логический ноль», U_{OL} [8].

Выбор составляющих радиационной технологии ИМС, например, вида применяемого технологического облучения также далеко не тривиальная задача, требующая учёта вида воздействующего на изделие облучения в процессе его эксплуатации. Для оценки влияния типа технологического облучения (альфа-частицы или электроны) на радиационную стойкость ИМС, оцениваемую по деградации U_{OL} при облучении электронами с энергией ≈ 5 МэВ и γ -квантами, используем ранее полученные экспериментальные данные по распределению U_{OL} ТТЛ ИМС (рис. 1), изготовленных по технологии КСДИ.

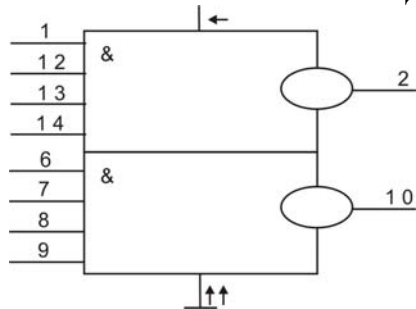
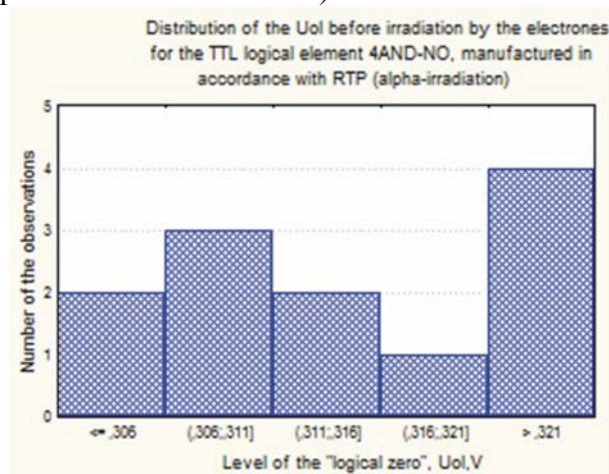


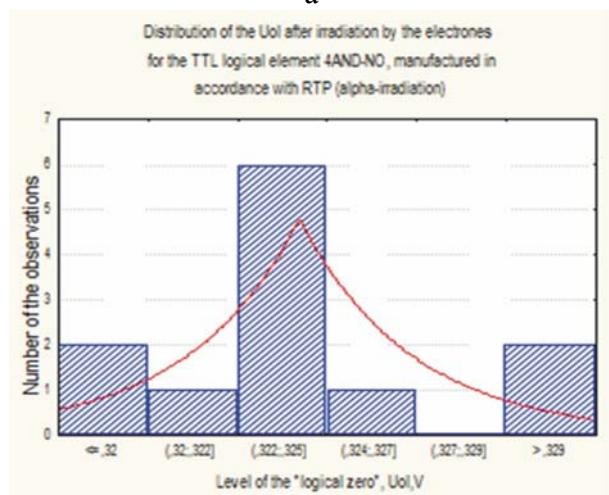
Рис. 1. Электрические режимы измерения U_{OL} для ИС 4И-НЕ: питание 4,5 В (вход 4); логические входы 1, 12, 13, 14 $U_{IH} = 2,4$ В; логические входы 6, 7, 8, 9 $U_{IL} = 0,4$ В; выходы 2, 10 $I_{OH} = 2,4$ мА, $I_{OL} = 45$ мА

Характеристики применённого РТП: $\Phi_\alpha \approx 8 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, $t_{\text{ann.}} \approx 350$ $^\circ\text{C}$, время отжига $\tau \approx 20$ min, $\Phi_e \approx 8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, $t_{\text{ann.}} \approx 350$ $^\circ\text{C}$, $\tau \approx 90$ min. Режим далеко не оптимален с точки зрения достижения $Y = 1$, но позволяет не вносить

изменения в существующий технологический процесс диффузии. Результаты измерения U_{OL} (данные с 12 логических выходов) обрабатывались в среде STATISTICA, полученные функции распределения признака обрабатывались в среде MathCAD по стандартным технологиям этих программ. Например, гистограмма U_{OL} ИМС, изготовленных с применением α -облучения, до облучения ускоренными электронами, приведена на рис. 2, а), то же после облучения – на рис. 2, б) (распределение плотности вероятности предложены программой, до коррекции в режиме custom function):



а



б

Рис. 2. Экспериментальные данные по деградации U_{OL} для ИС, изготовленных с применением радиационной технологии с использованием технологического α -облучения после испытательного облучения ускоренными электронами с энергией ≈ 5 МэВ, $\Phi_e \approx 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$

Аналогично проводилась обработка экспериментальных результатов для других вы-

борок ИС, стандартных и изготовленных с применением РТП на основе облучения ускоренными электронами. Наглядно радиационная стойкость ИС, изготовленных с применением различных технологий, проявляется в характере смещения распределений U_{OL} вправо (более высокие значения U_{OL} , т.е. изменение (деградация) критериального параметра). Нормальное распределение U_{OL} стандартных образцов до облучения электронами после облучения плавно переходит в экстремальное распределение (extreme value distribution) с образованием длинного правого «хвоста», создающего предпосылки для параметрического отказа изделия, что может указывать на монотонное накопление радиационных дефектов в при КСДИ структуре. Бимодальное распределение U_{OL} ИМС, изготовленных с применением α -РТП, становится «статистически более правильным» (распределение Лапласа после облучения), причём первый пик не наблюдается, а второй экстремум вправо смещается незначительно

и «хвост» распределения своей формы не меняет, рис. 3. Следует отметить, что для рассматриваемой выборки образцов, изготовленных с применением технологического α -облучения, принципиально важным является эффект, связанный с уменьшением U_{OL} (смещение распределений влево и переход от бимодального к логистическому распределению признака) при действии внешнего (не технологического) излучения. Фактически, внешнее воздействие расходует энергию на перестройку кристаллической структуры кремния, причём этот процесс тем эффективнее, чем более насыщена термическими и радиационными технологическими дефектами система планарных при структур, образующих ИМС. Уравнения (листинг 1 MathCAD), описывающие деградацию U_{OL} стандартных ИС и изготовленных по технологии КСДИ с применением РТП на основе α -облучения при облучении электронами с энергией 5 МэВ, $\Phi_e \cong 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ приведены ниже:

Распределение U_{ol} для выборки ИС, изготовленной по стандартной технологии, до облучения электронами:

$$\sigma_{10} := 0.004048 \quad a_{10} := 0.318$$

$$f_1(x) := 0.05 \cdot \frac{1}{\sigma_{10} \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(x - a_{10})^2}{(2 \cdot \sigma_{10}^2)}\right] \quad P_1(x) := \frac{f_1(x)}{12}$$

Распределение U_{ol} для выборки ИС, изготовленной по стандартной технологии, после облучения электронами:

$$a_{22} := 0.329$$

$$b_{22} := 0.0073969$$

$$f_2(x) := 0.085 \cdot \frac{1}{b_{22}} \cdot e^{-\frac{x - a_{22}}{b_{22}}} \cdot e^{-e^{-\frac{x - a_{22}}{b_{22}}}} \quad P_2(x) := \frac{f_2(x)}{12}$$

Распределение выборки ИС, изготовленной РТП с альфа-облучением до облучения электронами:

$$a_{31} := 0.309$$

$$b_{31} := 0.005559$$

$$a_{32} := 0.3233333$$

$$\sigma_{32} := 0.002582$$

$$f_3(x) := 0.06 \cdot \frac{1}{b_{31}} \cdot e^{-\frac{x - a_{31}}{b_{31}}} \cdot e^{-e^{-\frac{x - a_{31}}{b_{31}}}} + 0.025 \cdot \frac{1}{\sigma_{32} \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(x - a_{32})^2}{(2 \cdot \sigma_{32}^2)}} \quad P_3(x) := \frac{f_3(x)}{12}$$

Распределение выборки ИС, изготовленной РТП с альфа-облучением после облучения электронами:

$$a_4 := 0.324$$

$$b_4 := 0.0025$$

$$f_4(x) := 0.015 \cdot \frac{1}{b_4} \cdot e^{-\frac{|x - a_4|}{b_4}} \quad P_4(x) := \frac{f_4(x)}{12}$$

Листинг 1. Организация вычислений в MathCAD вероятностей численных значений U_{OL} для ИМС, изготовленных с применением технологического α -облучения и испытательного облучения ускоренными электронами

Визуализация результатов обработки гистограмм приведена на рис. 3:

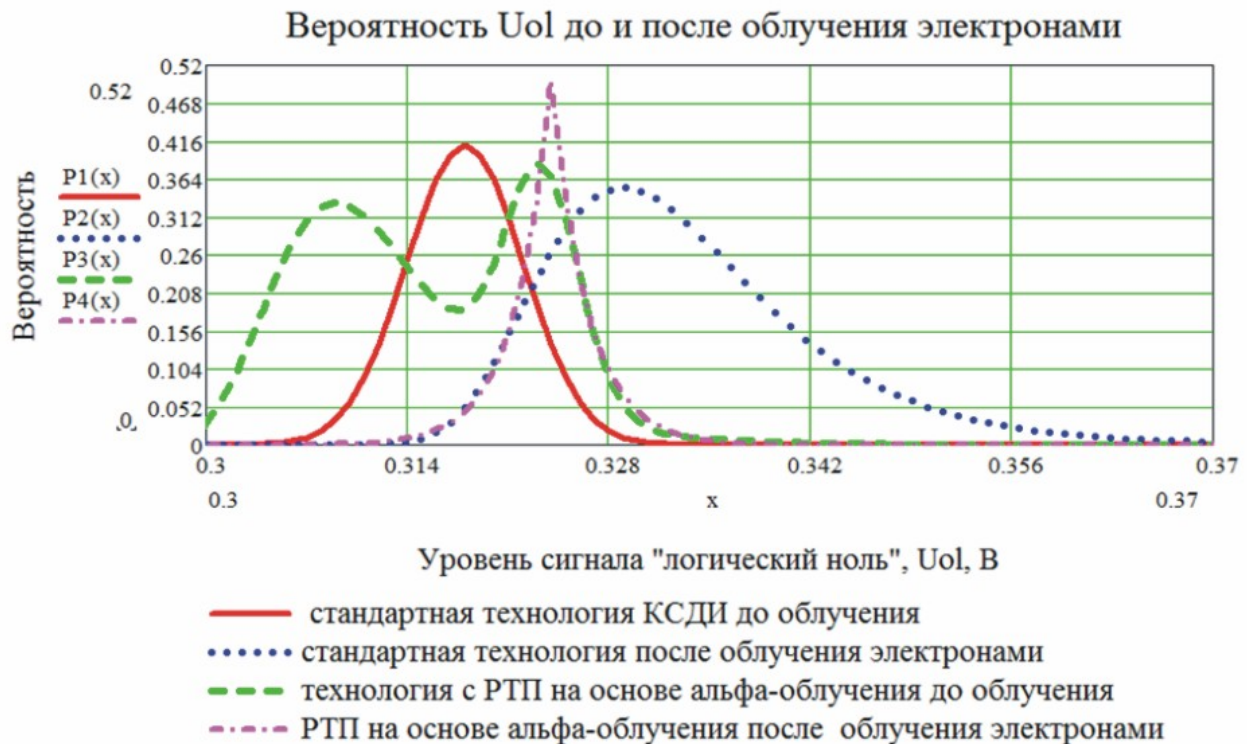


Рис. 3. Вероятность численного значения U_{OL} для ИС («кремний с диэлектрической изоляцией»), изготовленных с применением α -РТП (технологическое α -облучение) и по стандартной технологии до и после облучения электронами с энергией 5МэВ, флюенс $\Phi_e \cong 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$

Оценка повышения радиационной стойкости ИС, изготовленных с применением технологического α -облучения может быть проведена с использованием сравнения интегральной вероятности попадания численного значения U_{OL} в зону правого «хвоста» распределения, т.е. вероятности U_{OL} принять значение после облучения выше, чем наиболее вероятное (экстремум распределения) для изделий, изготовленных по стандартной технологии и исследуемой:

$$\frac{\int_{a22}^{\infty} P2(U_{OL})dU_{OL}}{\int_{a4}^{\infty} P4(U_{OL})dx} = 3,582 ,$$

где $a22$ и $a4$ – значения U_{OL} , соответствующие экстремумам соответствующих кривых.

Иными словами, для ИМС, изготовленной по стандартной технологии, интегральная

вероятность отклонения численного значения напряжения уровня «логического нуля» после облучения электронами с энергией 5МэВ не менее, чем в 3 раза выше, чем для ИМС, изготовленных с применением РТП на основе технологического α -облучения. Высокая устойчивость таких ИМС к ионизирующему излучению может быть связана с процессами накопления кластеров вакансионно-газовых дефектов при облучении кремниевой структуры ионами He с энергией $\approx 4,5$ МэВ [9] и последующим их радиационным отжигом, т. е. перестройкой структуры кремния за счет освобождения запасенной в кристалле энергии при проведении РТП [10].

Распределение U_{OL} для ИМС, изготовленных с применением электронного РТП подчиняется распределению Вейбулла и плавно смещается вправо при облучении электронами (см. листинг 2).

Оценка повышения радиационной стойкости ИМС, изготовленных с применением технологического облучения электронами:

$$\frac{\int_{a22}^{\infty} P2(U_{OL}) dU_{OL}}{\int_{b7}^{\infty} P7(U_{OL}) dx} = 2,23 \cdot$$

Следовательно, эффективность альфа-РТП при облучении электронами практически в 1,6 раза выше, чем РТП с применением ускоренных электронов, которое, тем не менее, может быть использовано, например, при производстве дискретных силовых полупроводниковых приборов.

Распределение выборки ИС, изготовленной РТП с облучением электронами до облучения электронами:

$$c5 := 56.27918 \quad b5 := 0.3255284$$

$$f5(x) := \frac{0.064 \cdot c5}{b5} \cdot \left(\frac{x}{b5}\right)^{c5-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{b5}\right)^{c5}}$$

Распределение выборки ИС, изготовленной РТП с облучением электронами после облучения электронами:

$$c7 := 55.9 \quad b7 := 0.334$$

$$f7(x) := \frac{0.0655 \cdot c7}{b7} \cdot \left(\frac{x}{b7}\right)^{c7-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{b7}\right)^{c7}}$$

Листинг 2. Уравнения в MathCAD, описывающие деградацию U_{OL} ИМС, изготовленных с использованием технологического облучения электронами

Следовательно, использование технологического облучения электронами менее эффективно с точки зрения повышения радиационной стойкости ИМС (рис. 4):



Рис. 4. Вероятность численного значения U_{OL} для ИС, изготовленных с применением РТП (технологическое облучение электронами) и по стандартной технологии «кремний с диэлектрической изоляцией» до и после облучения электронами с энергией 5 МэВ ($\Phi_e \cong 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$)

Сравним распределение U_{OL} для ИС, изготовленных по стандартной технологии и с применением α -РТП после облучения γ -квантами (листинг 3):

Распределение U_{OL} для выборки ИС, изготовленной по стандартной технологии, до облучения гамма-квантами:

$$b_{81} := 0.0015492 \quad b_{82} := 0.006036 \quad a_{81} := 0.3141 \quad a_{82} := 0.3261428$$

$$f_8(x) := 4.0 \cdot \frac{10^{-3}}{b_{81}} \cdot \exp\left(-\frac{|x - a_{81}|}{b_{81}}\right) + 3.65 \cdot \frac{10^{-2}}{b_{82}} \cdot \exp\left(-\frac{|x - a_{82}|}{b_{82}}\right)$$

Распределение U_{OL} для выборки ИС, изготовленной по стандартной технологии, после облучения гамма-квантами:

$$b_{92} := 0.004 \quad a_{92} := 0.320$$

$$f_9(x) := 9.2 \cdot \frac{10^{-2}}{b_{92}} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{x - a_{92}}{b_{92}}\right)}{\left(1 + \exp\left(-\frac{x - a_{92}}{b_{92}}\right)\right)^2}$$

Распределение выборки ИС, изготовленной РТП с альфа-облучением до облучения гамма-квантами:

$$b_{101} := 0.0018974 \quad b_{102} := 0.003181 \quad a_{101} := 0.3088 \quad a_{102} := 0.3202857$$

$$f_{10}(x) := 6.6 \cdot \frac{10^{-3}}{b_{101}} \cdot \exp\left(-\frac{|x - a_{101}|}{b_{101}}\right) + 1.8 \cdot \frac{10^{-2}}{b_{102}} \cdot \exp\left(-\frac{|x - a_{102}|}{b_{102}}\right)$$

Распределение выборки ИС, изготовленной РТП с альфа-облучением после облучения гамма-квантами:

$$b_{112} := 0.003 \quad a_{112} := 0.319$$

$$f_{11}(x) := 6.39996 \cdot \frac{10^{-2}}{b_{112}} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{x - a_{112}}{b_{112}}\right)}{\left(1 + \exp\left(-\frac{x - a_{112}}{b_{112}}\right)\right)^2}$$

Листинг 3. Уравнения в формате MathCAD, описывающие изменение распределения U_{OL} для стандартных ИМС и изготовленных с применением α -РТП после γ -облучения

Распределение вероятности U_{OL} для ИМС, изготовленных по стандартной технологии и с применением α -РТП до и после γ -облучения приведено на рис. 5.

Наблюдается существенное, двукратное улучшение качества ИС, изготовленных с применением α -РТП, выражающееся в уменьшении вероятности параметрического отказа ИС до облучения:

$$\frac{\int_{a_{82}}^{\infty} P_8(U_{OL}) dU_{OL}}{\int_{102}^{\infty} P_{10}(U_{OL}) dx} = 2,026.$$

Радиационная стойкость ИМС, изготовленных с применением α -РТП также существенно выше, чем у стандартных образцов:

$$\frac{\int_{0,32}^{\infty} P9(U_{OL}) dU_{OL}}{\int_{0,317}^{\infty} P11(U_{OL}) dx} = 1,438$$

Интересен эффект образования *статистически* стойких к действию ионизирующего облучения выборок ИМС, изготовленных по стандартной технологии. Выборка ИМС,

изготовленных по стандартной технологии, за счёт смещения выборки в сторону меньших значений U_{OL} и достижения «статистически более правильного» логистического распределения показывает более высокую радиационную стойкость, чем образцы, изготовленные с применением РТП на основе облучения электронами (листинг 4, рис. 6):



Рис. 5. Вероятность численного значения U_{OL} для ИС, изготовленных с применением α -РТП и по стандартной технологии «кремний с диэлектрической изоляцией» до и после облучения гамма-квантами

Распределение выборки ИС, изготовленной РТП с облучением электронами до облучения гамма-квантами:

$$c12 := 56.27918 \quad b12 := 0.3255284$$

$$f12(x) := \frac{0.094 \cdot c5}{b12} \cdot \left(\frac{x}{b12}\right)^{c12-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{b12}\right)^{c12}}$$

Распределение выборки ИС, изготовленной РТП с облучением электронами после облучения гамма-квантами:

$$a13 := 0.325 \quad b13 := 0.0055$$

$$f13(x) := 0.038 \cdot \frac{1}{b13} \cdot e^{-\frac{|x-a13|}{b13}}$$

Листинг 4. Влияние γ -облучения на изменение формы распределения U_{OL} ИМС, изготовленной с применением РТП на основе облучения электронами

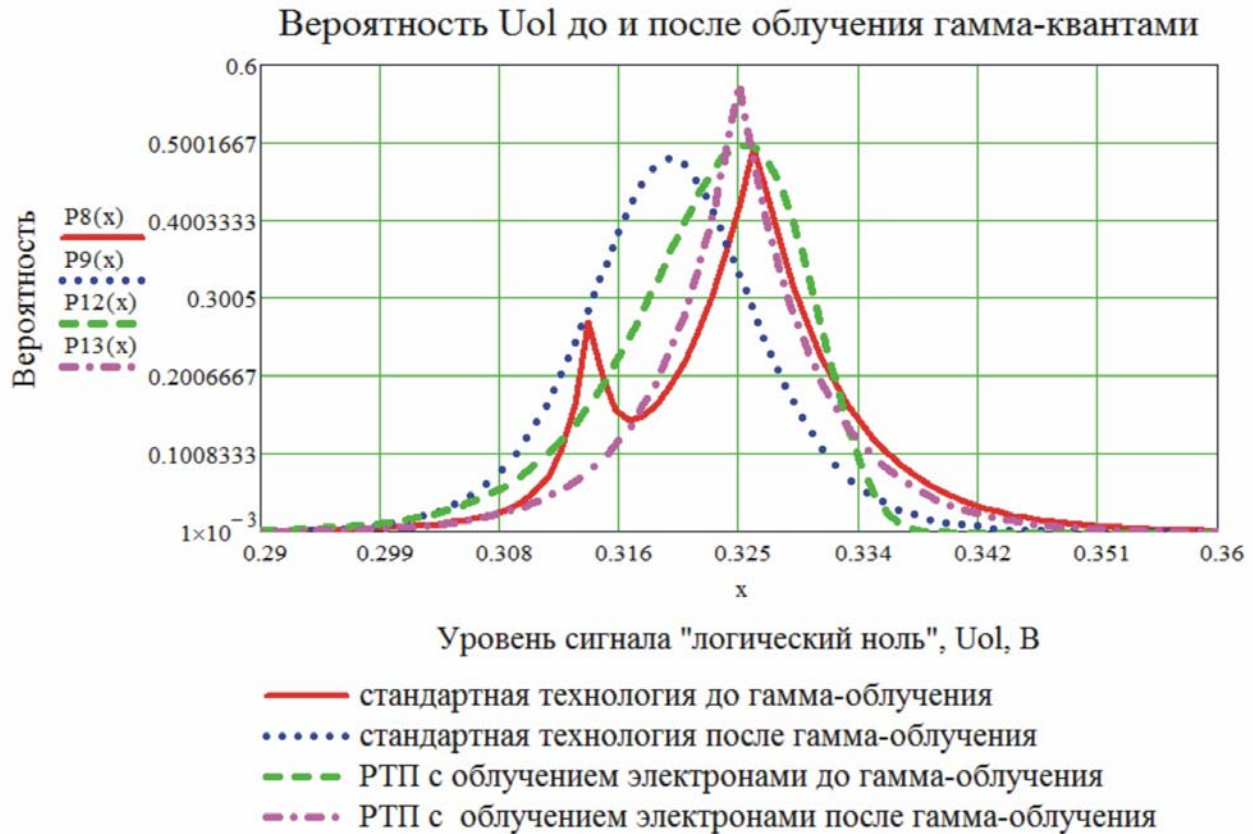


Рис. 6. Эффект образования «статистической» радиационной стойкости

«Статистически сложное» распределение U_{OL} для ИС, изготовленных по стандартной технологии оказывается более радиационно стойким, чем выборка ИС, изготовленных с применением РТП с электронным облучением: a₉₂=0,32В < a₁₃=0,325В, т.е. по критерию наиболее вероятного численного значения U_{OL} стандартная технология визуально (на ≈1,6%) более предпочтительна, чем РТП с технологическим облучением электронами.

$$\frac{\int_0^{\infty} \left(0.038 \cdot \frac{1}{b_{13}} \cdot e^{-\frac{|x-a_{13}|}{b_{13}}} \right) \cdot x \, dx}{\int_0^{\infty} \left[9.2 \cdot \frac{10^{-2}}{b_{92}} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{x-a_{92}}{b_{92}}\right)}{\left(1 + \exp\left(-\frac{x-a_{92}}{b_{92}}\right)\right)^2} \right] \cdot x \, dx} = 0.839$$

Листинг 5. Расчетное подтверждение более высокой радиационной стойкости ИМС, изготовленной с применением электронного облучения при действии γ-облучения

Однако средневзвешенное значение U_{OL} для стандартных ИС после облучения выше (≈ 16 %), чем для изделий, изготовленных с применением этого вида РТП, имеющих более «узкое» лапласовское распределение.

Таким образом, радиационная стойкость ИС, изготовленных с применением РТП на основе облучения α-частицами, существенно выше, чем для образцов, изготовленных с применением РТП на основе облучения электронами. Радиационная стойкость выборки ИМС после облучения существенно зависит от распределения в ней U_{OL} до облучения, т.е., фактически, от степени совершенства исходного материала и его склонности образовывать термические центры рекомбинации в базе тестовых структур. Это особенно наглядно проявляется при сравнении результатов γ-облучения стандартных образцов ИС и изготовленных с применением РТП на основе электронного технологического облучения. Возможно, понятие «радиационная стойкость» в большей степени относится к выборке испытываемых ИМС, а не

к отдельному образцу изделия, характеристики которого могут находиться в разных точках распределения ИМС по U_{OL} до и после облучения.

ВЫВОДЫ

1. Использование радиационно-технологических процессов, как с применением технологического α -облучения, так и электронов с энергией $\cong 5$ МэВ позволяет в 2 – 3 раза улучшить радиационную стойкость цифровых биполярных ИМС даже при использовании режимов РТП, позволяющих не корректировать существующий технологический режим изготовления при структур, т. е. не оптимальных с расчетной точки зрения.

2. Форма распределения U_{OL} до облучения позволяет прогнозировать радиационную стойкость выборки ИМС, причем чем сложнее форма распределения, тем выше вероятность отсутствия возникновения длинных правых «хвостов» распределения U_{OL} и, следовательно, вероятности параметрического отказа ИМС после воздействия испытательного ионизирующего излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мироненко Л. Повышение радиационной стойкости интегральных схем. Конструктивные методы на базе промышленной технологии / Л. Мироненко, В. Юдинцев // *Электроника*. – 2012, № 8 (00122). – С. 74-87.
2. Полесский С. Обеспечение радиационной стойкости аппаратуры космических аппаратов при проектировании / С. Полесский, В. Жаднов, М. Артюхова, В. Прохоров // *Компоненты и технологии*. – 2010, № 9. – С. 93-98.
3. Bytkin S. V. Improvement of the radiation hardness of the digital bipolar IC with dielectric isolation. manufactured in accordance with the RTP technology / S. V. Bytkin // *Components fit for Space Seminar Proceedings*. Royal Military College of Science. Shrivenham. Swindon. UK. (17th February 1999). pp. 99-108.
4. Bytkin S. V. Comparison of the Radiation Hardness of the Dielectric Isolation ICs Made in Accordance With Different Types of the Preliminary Radiation & Thermal Processing / S. V. Bytkin // *2nd Military and Aerospace Applications of Programmable Devices and Technologies Conference (MAPLD 1999) Proceedings*. September 28-30. 1999. The Johns Hopkins University - Applied Physics Laboratory. Laurel. Maryland. USA.
http://klabs.org/richcontent/MAPLDCon99/Paper/s/P4_Bytkin_P.pdf
5. Быткин С. В. Конкурентная разведка конъюнктурно-технологических перспектив традиционного и high-tech экспорта Украины: монография / С. В. Быткин // Запоріж. держ. інж. акад. – Запоріжжя: ЗДІА, 2017. – 276 с.
6. Лагов П. Б. Повышение импульсно-частотных, тепловых и инжекционных характеристик биполярных кремниевых структур методом радиационно-термической обработки. / П. Б. Лагов // *Дисс... доктора технич. наук по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах*. МИСиС, М.– 2017
7. Козлов В. А. Легирование полупроводников радиационными дефектами при облучении протонами и α -частицами. / В. А. Козлов, В. В. Козловский // *Обзор. Физика и техника полупроводников*. – 2001. – Т. 35, вып. 7. – С. 769-795.
8. Вологдин Э. Н. Радиационные эффекты в интегральных микросхемах и методы испытаний изделий полупроводниковой электроники на радиационную стойкость. Учебное пособие по дисциплине «Радиационная стойкость изделий электронной техники» // Научно-образовательный центр Московского региона в области фундаментальных проблем радиационной физики твердого тела и радиационного материаловедения. НОЦ – Московский государственный институт электроники и математики. Составители: Вологдин Э. Н., Лысенко А. П. М., 2002. – 46 с.
9. Starchyk M. I. Voids' layer structures in silicon irradiated with high doses of high-energy helium ions. *Semiconductor Physics*. / M. I. Starchyk, L. S. Marchenko, M. B. Pinkovska, G. G. Shmatko, V. I. Varnina // *Quantum Electronics & Optoelectronics*. – 2015. – Vol. 18. No. 3. – P. 292-296. doi: 10.15407/spqeo18.03.292
10. Чернов И. П. Упорядочение структуры кристаллов ионизирующим излучением (эффект малых доз ионизирующего излучения) / И. П. Чернов, А. П. Мамонтов // *Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ] / Томский политехнический университет (ТПУ)*. – Томск: Изд-во НТЛ, 2000. – Т. 303, вып. 1. – С. 74-80.

REFERENCES

1. Mironenko L. Povysheniye radiatsionnoy stoykosti integralnykh skhem. Konstruktivnyye metody na baze promyshlennoy tekhnologii / L. Mironenko, V. Yudinsev // Elektronika. – 2012. № 8 (00122). – S. 74-87.
2. Polesskiy S. Obespecheniye radiatsionnoy stoykosti apparatury kosmicheskikh apparatov pri proyektirovaniy / S. Polesskiy, V. Zhadnov, M. Artyukhova, V. Prokhorov // Komponenty i tekhnologii. – 2010. No. 9. – S. 93-98.
3. Bytkin S. V. Improvement of the radiation hardness of the digital bipolar IC with dielectric isolation. manufactured in accordance with the RTP technology / S. V. Bytkin // Components fit for Space Seminar Proceedings. Royal Military College of Science. Shrivenham. Swindon. UK. (17th February 1999). pp. 99-108.
4. Bytkin S. V. Comparison of the Radiation Hardness of the Dielectric Isolation ICs Made in Accordance With Different Types of the Preliminary Radiation & Thermal Processing / S. V. Bytkin // 2nd Military and Aerospace Applications of Programmable Devices and Technologies Conference (MAPLD 1999) Proceedings. September 28-30. 1999. The Johns Hopkins University - Applied Physics Laboratory. Laurel. Maryland. USA.
http://klabs.org/richcontent/MAPLDCon99/Papers/P4_Bytkin_P.pdf
5. Bytkin S. V. Konkurentnaya razvedka konyunktorno-tekhnologicheskikh perspektiv traditsionnogo i high-tech eksporta Ukrainy: monografiya / S.V. Bytkin // Zaporizh. derzh. inzh. akad. – Zaporizhzhya: ZDIA. 2017. – 276 s.
6. Lagov P. B. Povysheniye impulsno-chastotnykh. teplovykh i inzhektionsnykh kharakteristik bipolyarnykh kremniyevykh struktur metodom radiatsionno-termicheskoy obrabotki / P. B. Lagov // Diss... doktora tekhnich. nauk po spetsialnosti 05.27.01 – Tverdotelnaya elektronika. radioelektronnyye komponenty. mikro- i nanoelektronika. pribory na kvantovykh effektakh. MISiS. M.– 2017.
7. Kozlov V. A. Legirovaniye poluprovodnikov radiatsionnymi defektami pri obluchenii protonami i α -chastitsami / V. A. Kozlov, V. V. Kozlovskiy // Obzor. Fizika i tekhnika poluprovodnikov. – 2001. – Vol. 35. issue 7. – S. 769-795.
8. Vologdin E. N. Radiatsionnyye efekty v integralnykh mikroskhemakh i metody ispytaniy izdeliy poluprovodnikovoy elektroniki na radiatsionnuyu stoykost. Uchebnoye posobiye po distsipline «Radiatsionnaya stoykost izdeliy elektronnoy tekhniki». Nauchno-obrazovatelnyy tsentr Moskovskogo regiona v oblasti fundamentalnykh problem radiatsionnoy fiziki tverdogo tela i radiatsionnogo materialovedeniya. NOTs – Moskovskiy gosudarstvennyy institut elektroniki i matematiki. Sostaviteli: E. N. Vologdin, A. P. Lysenko. M., 2002. – 46 s.
9. Starchyk M. I. Voids' layer structures in silicon irradiated with high doses of high-energy helium ions. Semiconductor Physics. / M. I. Starchyk, L. S. Marchenko, M. B. Pinkovska, G. G. Shmatko, V. I. Varnina // Quantum Electronics & Optoelectronics. – 2015. – Vol. 18. No. 3. – P. 292-296. doi: 10.15407/spqeo18.03.292
10. Chernov I. P. Uporyadocheniye struktury kristallov ioniziruyushchim izlucheniym (effekt malykh doz ioniziruyushchego izlucheniya) / I. P. Chernov. A. P. Mamontov // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [Izvestiya TPU] / Tomskiy politekhnicheskiiy universitet (TPU). – Tomsk: Izd-vo NTL. 2000. – T. 303. vyp. 1. – S. 74-80.

УДК 536.2, 538.9, 53.06

ОТРИМАННЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ СИСТЕМИ «НАНОПОРИСТИЙ ВУГЛЕЦЕВИЙ МАТЕРІАЛ – КВАНТОВІ ТОЧКИ CdS»

С. Д. Бардашевська¹, І. М. Будзуляк¹, Б. І. Рачій¹, С. І. Будзуляк¹

¹Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, вул. Шевченка, 57, 76018 Івано-Франківськ, Україна

E-mail: svitlana.bardashevcka@gmail.com

Надійшла до редакції 30.03.2018

Квантові точки (КТ) на сьогодні є об'єктами інтенсивних досліджень багатьох наукових груп. КТ напівпровідникових сполук A^2B^6 привертають особливу увагу завдяки можливості управляти розмірами КТ в процесі їх синтезу, що дає можливість отримати необхідні електронні і оптичні властивості. Успішне вирішення проблеми отримання КТ напівпровідникових матеріалів з відповідними контрольованими властивостями в значній мірі залежить від вибору середовища, в якому реалізується їх синтез. Інкапсуляція наночастинок або введення їх у хімічно інертну матрицю дає можливість не тільки ізолювати КТ від хімічно активного середовища, а й отримати систему наночастинок з певними заданими розмірами (розмірами пор матриці). Саме тому, перспективним матеріалом матриці є нанопористий вуглецевий матеріал (НВМ), який є хімічно інертним для більшості лугів і кислот, і в якому можна отримувати необхідні розміри пор для впровадження КТ.

Ключові слова: квантові точки, нанопористий вуглецевий матеріал, гідротермальна карбонізація, електропровідність.

OBTAINING AND PROPERTIES OF THE SYSTEM «NANOPARTICLE CARBON MATERIAL – CdS QUANTUM DOTS»

Svitlana Bardashevskaya¹, Ivan Budzulyak¹, Bogdan Rachiy¹, Serhiy Budzulyak¹

¹Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, 57 Shevchenko Str., 76018 Ivano-Frankivsk, Ukraine

Quantum dots (QDs) today are the objects of intense research of many scientific groups. QDs semiconductor compounds A^2B^6 attract special attention due to the ability to control the size of QDs in the process of their synthesis, which gives the opportunity to obtain the necessary electronic and optical properties. Successful solution to the problem of obtaining QDs semiconductor materials with appropriate controllable properties largely depends on the choice of environment in which their synthesis is realized. Encapsulation of nanoparticles or introducing them into a chemically inert matrix makes it possible not only to isolate QDs from a chemically active medium, but also to obtain a system of nanoparticles with certain given sizes (pore size matrices). For this reason, the promising material of the matrix is a nanoporous carbon material (NCM) that is chemically inert to most alkalis and acids, and in which it is possible to obtain the required pore sizes for the introduction of QDs.

Keywords: quantum dots, nanoporous carbon material, hydrothermal carbonization, electrical conductivity.

ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА СИСТЕМЫ «НАНОПОРИСТЫЙ УГЛЕРОДНЫЙ МАТЕРИАЛ - КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ CdS»

С. Д. Бардашевская¹, И. М. Будзуляк¹, Б. И. Рачий¹, С. И. Будзуляк¹

¹Прикарпатский национальный университет имени Василя Стефаника, ул. Шевченко, 57, 76018 Ивано-Франковск, Украина

Квантовые точки (КТ) на сегодня являются объектами интенсивных исследований многих научных групп. КТ полупроводниковых соединений A^2B^6 привлекают особое внимание благодаря возможности управлять размерами КТ в процессе их синтеза, дает возможность получить необходимые электронные и оптические свойства. Успешное решение проблемы получения КТ полупроводниковых материалов с соответствующими контролируемыми свойствами в значительной степени зависит от выбора среды, в которой реализуется их синтез. Инкапсуляция наночастиц или введение их в химически инертную матрицу дает возможность не только изолировать КТ от химически активной среды, но и получить систему наночастиц с определенными заданными размерами (размерами пор матрицы). Именно поэтому, перспективным материалом матрицы является нанопористый угле-

родний матеріал (НУМ), который является химически инертным для большинства щелочей и кислот, и в котором можно получать необходимые размеры пор для внедрения КТ.

Ключевые слова: квантовые точки, нанопористый углеродный материал, гидротермальна карбонизация, электропроводность.

ORCID IDs

Svitlana Bardashevskaya: <https://orcid.org/0000-0002-5810-2427>

Ivan Budzulyak: <https://orcid.org/0000-0003-4055-0413>

Bogdan Rachiy: <https://orcid.org/0000-0001-8895-0737>

Serhiy Budzulyak: <https://orcid.org/0000-0002-8009-1656>

ВСТУП

Протягом останніх двох десятиліть значно зріс інтерес дослідників до фізичних, оптичних та транспортних властивостей напівпровідникових квантових точок (КТ) [1]. Оптичні та електричні властивості, структурна досконалість, температура плавлення та температура фазового переходу нанокристалів суттєво відрізняються від відповідного об'ємного напівпровідника та залежать від розміру кристалу внаслідок дії ефекту квантового обмеження. Коли розмір даних КТ близький до радіусу екситону Бора, відбуваються значні зміни їхніх властивостей, внаслідок того що атоми, які знаходяться на поверхні перебувають в іншому енергетичному стані, ніж атоми, які знаходяться в об'ємі. Оскільки число таких атомів співмірне з числом атомів в об'ємі частинки то змінюються і їх властивості, зокрема збільшується ширина забороненої зони. [2,3].

КТ напівпровідникових сполук A^2B^6 привертають значну увагу завдяки можливості управляти розмірами КТ в процесі їх синтезу, що дає можливість отримати необхідні електронні і оптичні властивості. Одним з найбільш перспективних напівпровідникових нанокристалів є CdS. Масивні монокристали CdS мають гексагональну структуру типу вюрцит з шириною забороненої зони $E_g = 2,5$ еВ. [4] Для нанокристалів CdS значення ширини забороненої зони може варіюватися в інтервалі 2,5 – 4,5 еВ. [4], а температура плавлення зростає з 400 до 1600 °C [5]. Цей діапазон у фундаментальних властивостях матеріалу відкриває додаткові можливості для відстеження еволюції електронних та оптичних властивостей матеріалу від насипного матеріалу до атомного кластеру. CdS є перспективним матеріалом через можливість його застосування в оптоелектроніці [6], фотокатализаторах [7], конверсії сонячної енер-

гії, детекторах X-випромінювання, як нелінійний оптичний матеріал [8].

Успішне вирішення проблеми отримання КТ напівпровідникових матеріалів з відповідними контрольованими властивостями в значній мірі залежить від вибору середовища, в якому реалізується їх синтез. Основними вимогами до таких середовищ є їх однорідність, хімічна стійкість, стабільність в часі та незначна чутливість до зовнішніх впливів.

Особливістю вільних КТ є нижча температурна стабільність і вища здатність до хімічних взаємодій з оточуючим середовищем. Інкапсуляція наночастинок або введення їх у хімічно інертну матрицю дає можливість не тільки ізолювати КТ від хімічно активного середовища, а й отримати систему наночастинок з певними заданими розмірами (розмірами пор матриці) [9]. В цьому плані перспективним матеріалом матриці є нанопористий вуглецевий матеріал (НВМ), який є хімічно інертним для більшості лугів і кислот, і в якому можна отримувати необхідні розміри пор для впровадження КТ. Тому пропонується використовувати отриманий нами нанопористий вуглець з сировини рослинного походження в якості матриці для КТ напівпровідника CdS [10, 11].

ЕКСПЕРИМЕНТ

Нами були спеціально синтезовані два сорти нанопористого вуглецю з відповідним розподілом пор за розмірами, які служили матрицями для КТ CdS. В сорті C_A пори розміром 5 – 15 нм становили 15 % від загальної кількості пор, в сорті C_B пори розміром 2 – 5 нм становили 10 % від загальної кількості пор.

Нанопористий вуглецевий матеріал отримувався із сировини рослинного походження шляхом її карбонізації та активації калій гідроксидом. Вихідною сировиною були сухі

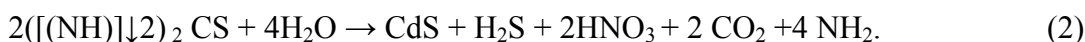
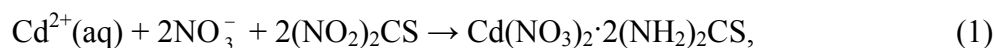
абрикосові кісточки, подрібнені до фракції 0,25 – 1 мм, карбонізація яких проводилася в закритій печі при температурі 380 – 400 °С зі швидкістю нагрівання 10 °С/хв. Отриманий карбонізований вуглець механічно подрібнювався до фракції 200 – 250 мкм і змішувався з гідроксидом калію та водою у ваговому відношенні: $X = 1$, де $X = m(\text{KOH}, \text{H}_2\text{O})/m(\text{C})$.

Отриману суміш ретельно перемішували впродовж 1 – 2 годин, після чого її висушували у термостаті до постійної маси при температурі 90 °С. Сухий матеріал поміщали у піч та нагрівали в аргоновій атмосфері до 850 – 920 °С при швидкості нагрівання 10 °С/хв. І витримували при даній температурі впродовж 20 хв. Після охолодження

отриманий матеріал промивався в 5 % водному розчині HCl та дистильованій воді до нейтрального рН і висушувався при 90 °С до постійної маси.

В залежності від параметрів термохімічної обробки (температура, співвідношення між реагентами) отримувався необхідний розподіл пор за розмірами.

Отримання КТ CdS здійснювалося шляхом інкорпорації ацетату кадмію $\text{Cd}(\text{Ac})_2$ в матрицю вуглеців C_A і C_B . Було отримано 6 груп зразків. Для зразків № 1, 2, 3 використовувався гранульований вуглець C_A . Наступні реакції, є головними при формуванні КТ CdS:



Зразок № 1. Ацетат кадмію $\text{Cd}(\text{Ac})_2$ розчиняли в спирті з подальшим додаванням дистильованої води в наступних співвідношеннях $[\text{Cd}(\text{Ac})_2] : [\text{CH}_3\text{-OH}] = 1,35 \div 200$. Після розчинення кадмій ацетату, розчин фільтрували, з подальшим додаванням вуглецю C_A масою 0,5 г. Отриману суміш піддавали ультразвуку, після охолодження осад промивали дистильованою водою, центрифугували протягом 5 хв, 3000 об/хв і висушували при $T = 60$ °С в Na_2S протягом 16 годин.

Зразки № 2 та № 3 були отримані за цією ж методикою, вміст $\text{Cd}(\text{Ac})_2$ складав 10,8 г, який був розділений на 2 частини, тобто на 100 мл отриманого розчину, додавалося по 0,5 г вуглецю C_A . Зразок № 2 сушили при $T = 60$ °С в Na_2S протягом 16 годин. Зразок № 3 отримували через апарат Кіппа пробулькуванням протягом 1 години в H_2S .

Для отримання зразків № 4, 5 та 6 використовували мікропористий вуглець C_B . Ацетат кадмію $\text{Cd}(\text{Ac})_2$ розчиняли в спирті з подальшим додаванням дистильованої води в наступних співвідношеннях $[\text{Cd}(\text{Ac})_2] : [\text{CH}_3\text{-}$

$\text{OH}] = 10,8 \div 200$. Після розчинення кадмій ацетату, розчин фільтрували та розділили на 2 рівні частини. На 100 мл розчину додано 0,5 г вуглецю. Зразок № 4 висихав в ексикаторі протягом 7 годин в Na_2S . Зразок № 5 отримували через апарат Кіппа пробулькуванням протягом 1 години в H_2S .

Вміст ацетату кадмію $\text{Cd}(\text{Ac})_2$ у зразку № 6 становив 1,35 г, зразок висихав в ексикаторі протягом 15 годин в Na_2S .

ПОРОМЕТРІЯ

Контроль пористої структури (площу поверхні та загальний об'єм пор) НВМ визначали на основі аналізу ізотерм адсорбції/десорбції азоту при температурі його кипіння (77 К), отриманих з використанням приладу Quantachrome Autosorb Nova 2200 e. Перед вимірюваннями вуглецеві зразки дегазували при 180 °С протягом 18 год. Аналізуючи ізотерми адсорбції/десорбції, визначено характеристики пористої структури вуглецевих матеріалів, а саме: загальну площу поверхні ($S_{\text{ВЕТ}}$), багатоточковим методом ВЕТ в області ізотерми, обмеженої діапазоном віднос-

ного тиску $P/P_0 = 0.050 \dots 0.035$. Загальний об'єм пор (V_{total} , cm^3/g) розрахований за кількістю сорбованого азоту при $P/P_0 \sim 1$. Об'єм мікропор (V_{micro} , cm^3/g), величини питомих поверхонь мікро- і мезопор (S_{micro}, S_{mezo} , m^2/g) визначали, використовуючи t-метод та теорію DFT.

Ізотерми адсорбції/десорбції азоту для вуглецевих матеріалів C_B і C_A представлено на рис. 1а.

Ізотерми (рис. 1б) характерні для полімолекулярної адсорбції в мікро- та мезопорах матеріалів органічного походження [12]. Для всіх зразків спостерігається петля гістерезису типу H4 за класифікацією IUPAC [13], яку пов'язують з капілярною конденсацією в мезопорах. Зростання адсорбційної гілки ізотерми поблизу $P/P_0 = 1$ викликане багаторазовими процесами конденсації та випаровування азоту в мезо- та макропорах.

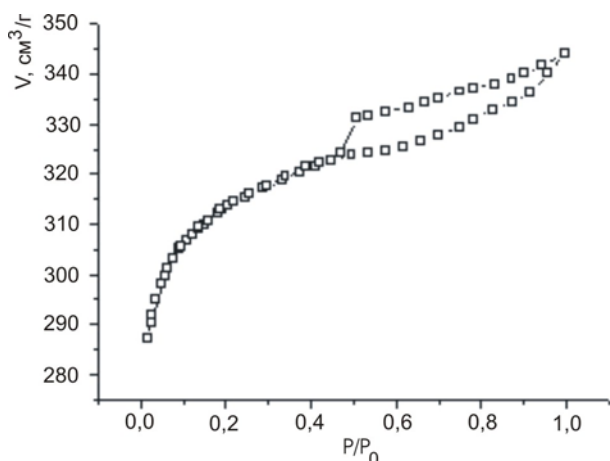


Рис. 1а. Ізотерми адсорбції/десорбції азоту для вуглецевих матеріалів C_B і C_A

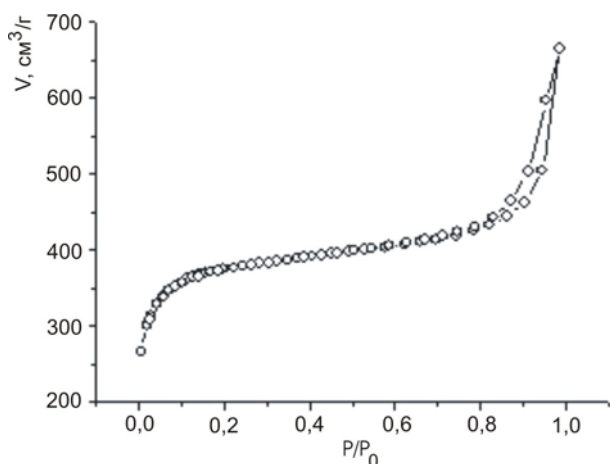


Рис. 1б. Ізотерми, характерні для полімолекулярної адсорбції в мікро- та мезопорах матеріалів органічного походження

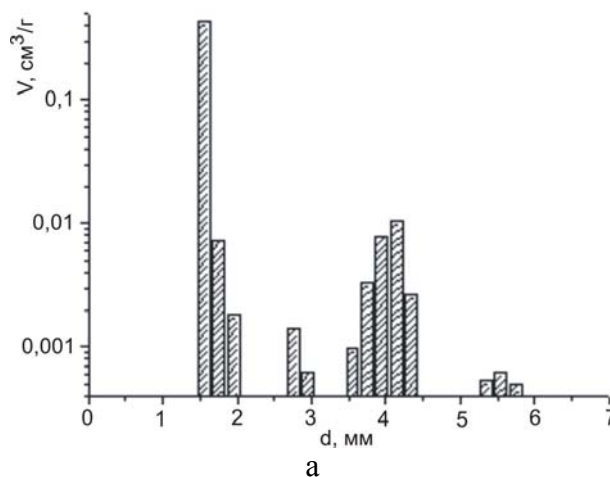
Основні параметри наноструктури вуглецевих матеріалів наведені в табл. 1.

Таблиця 1
Структурно-адсорбційні характеристики НВМ

Параметр	C_A	C_B
Площа поверхні Multipoint BET, $m^2 \cdot g^{-1}$	1438	1187
Загальний об'єм пор, $cm^3 \cdot g^{-1}$	1,03	0,521
Об'єм мікропор, $cm^3 \cdot g^{-1}$	0,57	0,452
Площа поверхні мікропор, $m^2 \cdot g^{-1}$	1275	1110
Середній діаметр пор, <i>нм</i>	2,86	1,76

Розподіл пор за розміром НВМ оцінювали за теорією функціонала густини (DFT) (рис. 2а). Як видно з даних табл. 1 і рис. 2б, досліджувані НВМ мають велику кількість мікропор, які істотно впливають на питому площу поверхні. У даних вуглецевих матеріалах мезопори становлять 8 – 12 % від загальної кількості пор.

На представлених зображеннях, отриманих при різних збільшеннях, чітко видно поверхневі мікротріщини та круглі або овальні пори розмірами 0,4 – 4 мкм (рис. 3а і рис. 3б). Внаслідок дії лужного активатора поверхня вуглецю стає більш шорсткою. По всій поверхні спостерігаються пори розміром 10 – 20 нм (рис. 3в і рис. 3г) і включення білого кольору, пов'язані із залишками золи та продуктів взаємодії гідроксиду калію з вуглецевим матеріалом.



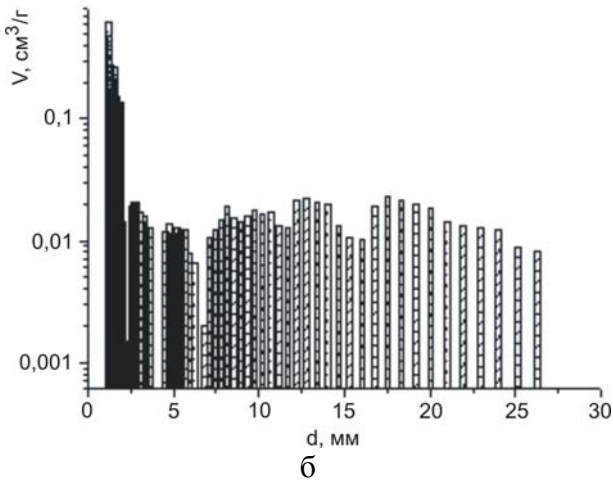
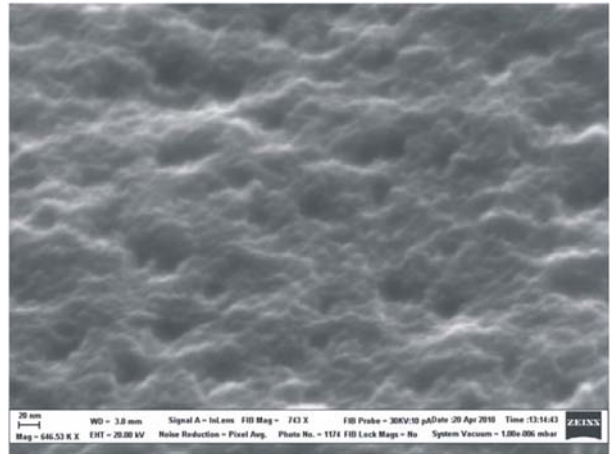
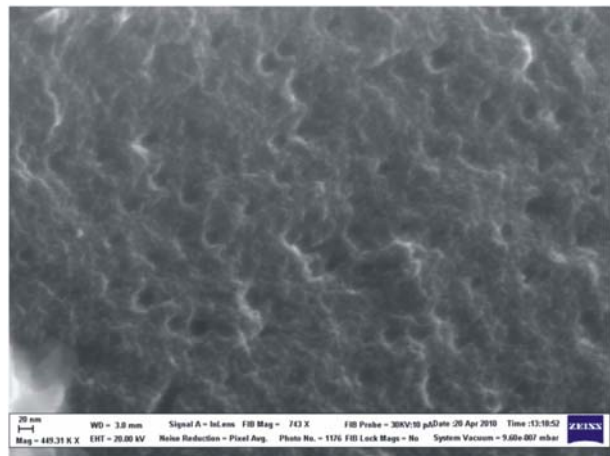


Рис. 2. Розподіл пор за розміром НВМ

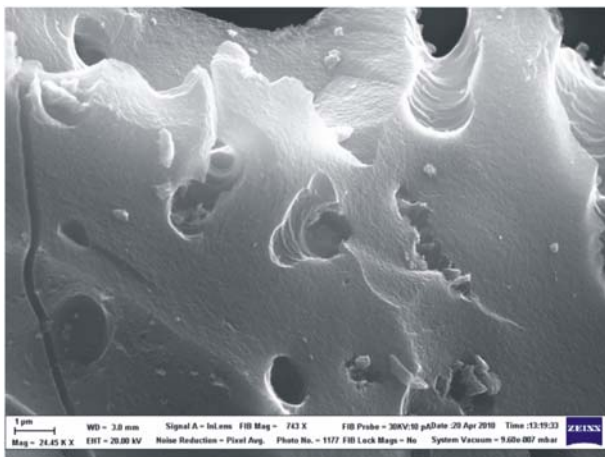
Результати низькотемпературної порометрії добре узгоджуються з даними електроно-мікроскопічних досліджень. Використання додаткової хімічної активації призводить до формування пористої структури в досліджуваному матеріалі С_В (рис. 3).



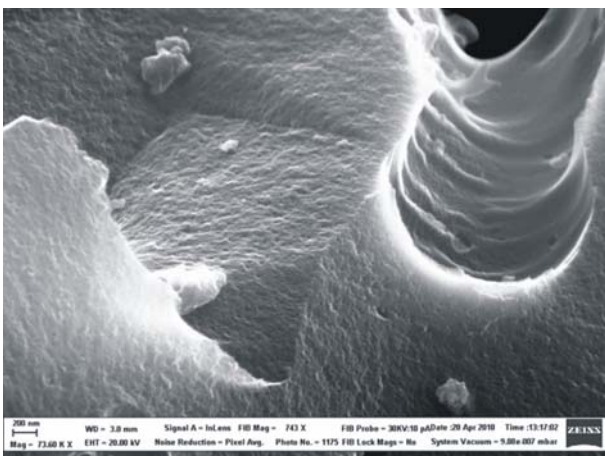
В



Г



а



б

Рис. 3. Фотознімки пористої структури поверхні

ОПИС ИМПЕДАНСУ

Дослідження електропровідності вуглецевого матеріалу здійснювалися за допомогою вимірювального комплексу AUTOLAB PGSTAT100 фірми «ECO CHEMIE» (Нідерланди), укомплектованого програмою FRA-2. Вимірювання дійсної Z' та уявної Z'' частин комплексного опору ($Z = Z' - jZ''$) проводилося в діапазоні частот $f = 10^{-2} \div 10^5$ Гц при напрузі 1 мВ. Значення питомих опорів визначалися з рівняння $\rho = \rho' - j\rho''$, де $\rho' = Z' \cdot S/h$ і $\rho'' = Z'' \cdot S/h$ дійсна та уявна частини комплексного питомого опору, h і S – товщина і площа поверхні зразка відповідно [14].

Значення повної питомої електропровідності матеріалів обчислювалися за формулою: $|\sigma| = \sqrt{(\sigma')^2 + (\sigma'')^2}$.

Частотні залежності комплексної електропровідності були визначені із імпедансних

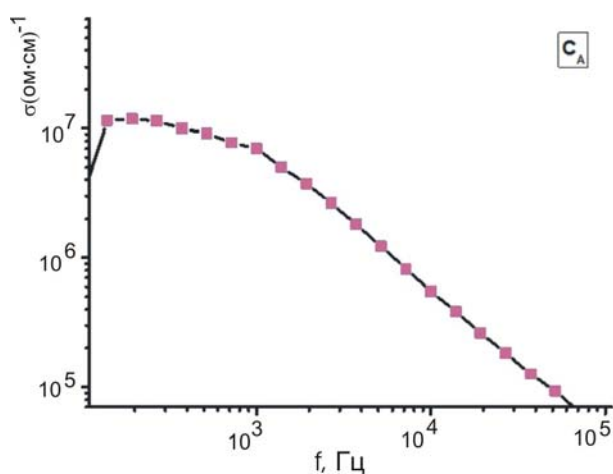
спектрів. Метод імпедансної спектроскопії в ряді випадків дозволяє розділити і визначити внески від різних елементів мікроструктури в повну електропровідність зразків та широко застосовується як у прикладних, так і у фундаментальних дослідженнях. За допомогою імпедансної спектроскопії можна отримати інформацію про транспорт носіїв заряду в композиті з урахуванням його мікроструктури. Так, можуть бути розділені і визначені вклади в електропровідність від КТ CdS і вуглецю C_B, охарактеризовані особливості транспорту зарядів в композитах, вивчений вплив домішок на електрофізичні властивості легованих матеріалів. Годограф імпедансу КТ CdS має вигляд характерний для полікристалічного зразка [15] (два послідовних незакінчені півкола, які відповідають за вклад в імпеданс міжфазної релаксації).

На рис. 4 (а, б) представлені залежності електропровідності вуглецевих матеріалів C_A та C_B відповідно.

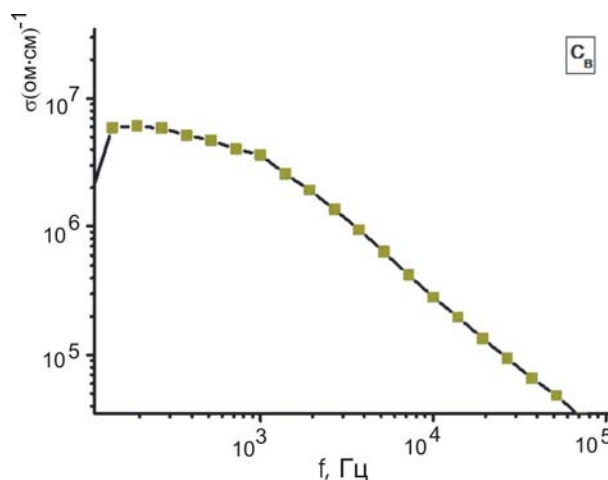
Електрична провідність НВМ залежить від способу його отримання та подальших модифікацій.

Вихідна рослинна сировина, як правило, є ізолятором. У процесі її карбонізації збільшується вміст sp² – зв'язаного вуглецю та видалення продуктів розпаду, що призводить до збільшення електропровідності карбонізованого матеріалу [16].

Для досліджених вуглецевих матеріалів у низькочастотному інтервалі, питома електропровідність залишається незмінною.



а



б

Рис. 4. Залежності електропровідності вуглецевих матеріалів C_A (а) та C_B (б) відповідно

У даному діапазоні частот змінювання питомого електроопору може відповідати особливостям розподілу стрибкових бар'єрів між провідними областями. Відсутність частотної залежності електропровідності в діапазоні $f = 10^{-2} - 10^3$ Гц можна пояснити утворенням вуглецевими частинками електропровідних сіток [17]. Для всіх зразків питома електропровідність при підвищенні частоти зменшується.

Поява дисперсії електропровідності в області $f \leq 10^5$ Гц можлива внаслідок залежності глибини проникнення поля в зразок (скін-ефект). Іншою поширеною причиною виникнення дисперсії імпедансу є виконання умови $\omega \sim 1/\tau$, де τ – час релаксації. Дана залежність здебільшого характерна для напівпровідників, для яких τ може приймати досить широкий діапазон значень [18]. Високочастотне змінювання електропровідності також можливе через виникнення колективних збуджень хвильового типу густини зарядів у дрібнодисперсних системах.

Рис. 5 демонструє змінювання дійсної та уявної частин імпедансу (Z' і Z'') з частотою в різних концентраціях вмісту ацетату кадмію та сорту вуглецю у CdS. Збільшення значення Z' та зменшення Z'' зі збільшенням частоти вказує на ефект поляризації просторового заряду. Величини Z' та Z'' є максимальними для зразків 4, 5 і 6 мінімум спостерігається для 1, 2 і 3 відповідно. (QD – квантові точки).

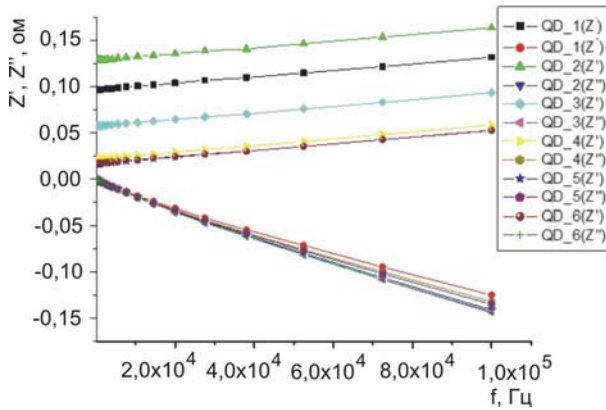


Рис. 5. Змінювання дійсної та уявної частин імпедансу

Рис. 6 представляє значення електропровідності CdS/C_A, CdS/C_B в залежності від частоти, як видно, з рис. 6 вміст ацетату кадмію та вуглецю, а також природа вуглецевого матеріалу, істотно впливають на значення електропровідності отриманого матеріалу. Для зразків (1, 2, 3) використовували вуглецевий матеріал C_A. Зразки 1, 2 висихали в атмосфері насиченою Na₂S, а зразок 3 отримували шляхом пробулькування через апарат Кіппа. Вміст ацетату кадмію у зразках 2, 3 є значно більшим у порівнянні зі зразком 1.

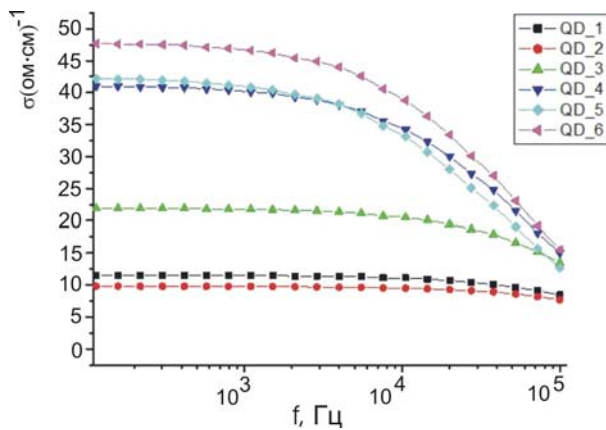


Рис. 6. Значення електропровідності CdS/C_A, CdS/C_B у залежності від частоти

У значеннях електропровідності для зразків 1, 2 не спостерігається суттєвої відмінності, а електропровідність зразка 3, значно відрізняється. Це свідчить про те, що спосіб отримання КТ CdS/C, має суттєвий вплив на електропровідність отриманого матеріалу. Аналогічно для зразків (4, 5, 6) використовувався вуглецевий матеріал типу C_B. Значення електропровідності для зразків 1, 2 практич-

но не змінюється з частотою, в той час, як для зразків 4, 5, 6 спостерігається спадання електропровідності в області високих частот.

ВИСНОВКИ

Розроблено спосіб отримання НВМ для інкорпорації КТ CdS в його матрицю шляхом гідротермальної карбонізації вихідної сировини рослинного походження та наступної термохімічної активації. Показано, що термохімічна активація дозволяє отримати НВМ з питомою площею поверхні 1100 м²/г, сумарним об'ємом 0,5 см³/г. В отриманих вуглецевих матеріалах мезопори становлять до 15 % від загальної кількості пор.

Досліджено електрофізичні властивості комплексу НВМ – КТ CdS, виявлено, що природа та концентрація НВМ спричиняють значний вплив на електропровідність отриманого матеріалу. У низькочастотному інтервалі питома електропровідність залишається незмінною, в той час як в області високих частот спостерігається спадання електропровідності.

Показано, що в залежності від способу отримання КТ CdS в матриці вуглецю, залежність дійсної та уявної частини імпедансу від частоти змінюється. Зі збільшенням частоти значення Z' збільшується, при цьому зменшується Z''.

ЛІТЕРАТУРА

1. Alivisatos A. P. Perspective son the physical chemistry of semiconductor nanocrystals // J. Phys. Chem. – 1996. – Vol. 100, No. 31. – P. 13226-13239.
2. Alivisatos A. P. Semiconductor clusters, nanocrystals, and quantum dots // Science – 1996. –V. 271, №5251. – P. 933-937.
3. Brus L. E. Electron-electron and electron-hole interaction sinsmall semiconductor crystallites: the size dependence of the lowes texcited electronicstate // J. Chem. Phys. – 1984. – Vol. 80. – P. 4403-4409.
4. Colvin V. L., Alivisatos A. P., Tobin J. G., Superlattices Microstruct // Phys. Rev. Lett., – 1991. – Vol. 66. – P. 2786.
5. Goldstein A. N., Echer C. M., Alivisatos A. P. // Science. - 1992. – Vol. 256. – P. 1425-1427.
6. Hikmet M., Talapin V., Weller H. Study of conduction mechanism and electroluminescence

in CdSe/O^zZnS quantum dot composites // *J. Appl. Phys.* – 2003. – Vol. 93. – P. 3509-3514.

7. Huynh W.V., Dittmer J.J., Alivisatos A.P. Hybrid nanorod-polymer solarcells // *Science.* – 2002. – Vol. 295, No. 5564. – P. 2425-2427.
8. Brus L.E. Quantum crystallites and nonlinear optics // *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process.* – 1991. – Vol. 53, No. 2283. – P.465-474.
9. Burova L. I., Pelukhov D. I., Eliseev A. A. Preparation and properties of ZnO nanoparticles in the mesoporous silicamatrix // *Superlattices and Microstructures.* – 2006. – Vol. 39. – P. 257-266.
10. Shvets R. Ya., Grygorchak I. I., Borysyuk A. K., Shvachko S. G., Kondyr A. I., Baluk V. I., Kurepa A. S., and Rachiy B. I. New Nanoporous Biocarbons with Iron and Silicon Impurities: Synthesis. Properties. and Application to Supercapacitors // *Physics of the Solid State.* – 2014. – Vol. 56, No. 10. – P. 2021-2027.
11. Rachiy B. I., Nykoliuk M. O., Budzulyak I.M., Kachmar A. I. Ultrasonic modification of carbon materials for electrochemical capacitors // *Nanoscale Research Letters.* – 2017. – Vol. 12:79. DOI 10.1186/s11671-017- 1842-1
12. Marsh H. *Rodriguez-Reinos of Activatedcarbon* // Amsterdam: Elsevier. – 2006. –542 p.
13. Fitzer E., Kochling K., Boehm H., Marsh H. Recommended terminology for the description of carbon as a solid // *International union of pure and applied chemistry.* – 1995. – Vol. 67, No. 3. – P. 473-506.
14. Стойнов З. Б., Графов Б. М., Савова-Стойнова Б., Елкін В. В. Електрохімічний імпеданс // *Наука*, 1991. – 336 с.
15. Bobnar V., Lunkenheimer P., Paraskevopoulos M., Loidl A. Separation of grainboundary effects and intrinsic properties in perovskite-like Gd_{0.6}Y_{0.4}BaCo₂O_{5.5} using high-frequency dielectric spectroscopy. // *Phys. Rev. B.* – 2002. – Vol. 65. – P. 184403-184403.
16. Biniak S., Swiatkowski A., Pakula M., Radovic R. *Chemistry and physics of carbon.* // New York: Marcel Dekker. – 2001. – Vol. 27. – P. 125.
17. Лебовка М., Гончарук А., Бойко Ю. Міжфазові взаємодії та електрична провідність в композитах вуглецеві нанорурки/рідкий кристал // *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології.* – 2009. – Т. 7, № 3. – С. 701-715.
18. Орешкин П. Т. *Фізика напівпровідників и діелектриков* // Москва: Высшая школа. – 1977. – С. 448.

REFERENCES

1. Alivisatos A. P. Perspective son the physical chemistry of semiconductor nanocrystals // *J. Phys. Chem.* – 1996. – Vol. 100. No. 31. – P. 13226-13239.
2. Alivisatos A. P. Semiconductor clusters. nanocrystals. and quantum dots // *Science* – 1996. –Vol. 271. No. 5251. – P. 933-937.
3. Brus L. E. Electron-electron and electron-hole interaction sinsmall semiconductor crystallites: the size dependence of the lowes texcited electronicstate // *J. Chem. Phys.* – 1984. – Vol. 80. – P. 4403-4409..
4. Colvin V. L., Alivisatos A. P., Tobin J. G., Superlattices Microstruct // *Phys. Rev. Lett.* – 1991. – Vol. 66. – P. 2786.
5. Goldstein A. N., Echer C. M., Alivisatos A. P. // *Science.* – 1992. – Vol. 256. – P. 1425-1427.
6. Hikmet M., Talapin V., Weller H. Study of conduction mechanism and electroluminescence in CdSe/O^zZnS quantum dot composites // *J. Appl. Phys.* – 2003. – Vol. 93. – P. 3509-3514.
7. Huynh W.V., Dittmer J.J., Alivisatos A.P. Hybrid nanorod-polymer solarcells // *Science.* – 2002. – Vol. 295. No. 5564. – P. 2425-2427.
8. Brus L. E. Quantum crystallites and nonlinear optics // *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process.* – 1991. – Vol. 53. No. 2283. – P.465-474.
9. Burova L. I., Pelukhov D. I., Eliseev A. A. Preparation and properties of ZnO nanoparticles in the mesoporous silicamatrix // *Superlattices and Microstructures.* – 2006. – Vol. 39. – P. 257-266.
10. Shvets R. Ya., Grygorchak I. I., Borysyuk A. K., Shvachko S. G., Kondyr A. I., Baluk V. I., Kurepa A. S., and Rachiy B. I. New Nanoporous Biocarbons with Iron and Silicon Impurities: Synthesis. Properties. and Application to Supercapacitors // *Physics of the Solid State.* – 2014. – Vol. 56, No. 10. – P. 2021-2027.
11. Rachiy B. I. .Nykoliuk M. O.. Budzulyak I.M.. Kachmar A.I. Ultrasonic modification of carbon materials for electrochemical capacitors // *Nanoscale Research Letters.* – 2017. – Vol. 12:79. DOI 10.1186/s11671-017- 1842-1.
12. Marsh H. *Rodriguez-Reinos of Activatedcarbon* // Amsterdam: Elsevier. – 2006. –542 p.
13. Fitzer E., Kochling K., Boehm H., Marsh H. Recommended terminology for the description of carbon as a solid // *International union of pure and applied chemistry.* – 1995. – V. 67. № 3. – R. 473–506.
14. Stoynov Z. B., Grafov B. M., Savova-Stoynova B., Elkin V.V. *Elektrokhimicheskiy impedans* // *Nauka* – 1991. – 336 s.

15. Bobnar V., Lunkenheimer P., Paraskevopoulos M., Loidl A. Separation of grainboundary effects and intrinsic properties in perovskite-like $Gd_{0.6}Y_{0.4}BaCo_2O_{5.5}$ using high-frequency dielectric spectroscopy // *Phys. Rev. B* – 2002. – Vol. 65. – P. 184403-184403.
16. Biniak S., Swiatkowski A., Pakula M., Rado-
vic R. Chemistry and physics of carbon //
New York: Marcel Dekker. – 2001. – Vol. 27. –
P. 125.
17. Lebovka M., Goncharuk A., Boyko Yu.
Mizhfazovi vzaemodii ta elektrichna providnist
v kompozitakh vugletsevi nanorurki/ridkiy
kristal // *Nanosistemi. nanomateriali.
nanotekhnologii.* – 2009. – T. 7. № 3. – S. 701-
715.
18. Oreshkin P. T. Fizika poluprovodnikov i dielek-
trikov // Moskva: Vysshaya shkola. – 1977. – С.
448.

Тематичні напрямки:

- фізика поверхні – модифікації, покриття, плівки, приповерхневі і перехідні шари різних видів, як результат впливу плазми, корпускулярно-фотонних потоків і випромінювання;
- взаємодія різноманітних видів випромінювання з поверхнями металів, напівпровідників, діелектриків;
- фізика і техніка низькотемпературної плазми;
- фізика і техніка лазерів;
- фізичні властивості плівок і покриттів;
- нанофізика, мікро- і нанотехнології, мікро- та наноелектроніка;
- фізичні та технічні аспекти сучасних технологій обробки поверхні, діагностики і контролю технологічних процесів.

Topic directions:

- surface physics – modifications, coatings, films, near-surface and transient layers of different kinds, as outcome of influencing of plasma, corpuscular-photon flows and radiation;
- interaction of miscellaneous kinds of radiation with surfaces of metals, semiconductors, dielectrics;
- physics and engineering of low-temperature plasma;
- physics and engineering of lasers;
- physical characteristics of films and coatings;
- nanophysics, micro- and nanotechnologies, micro- and nanoelectronics;
- physical and engineering aspects of modern technologies of surfacing, diagnostic and control of technological processes.

Тематические направления:

- физика поверхности – модификации, покрытия, пленки, приповерхностные и переходные слои различных видов, как результат воздействия плазмы, корпускулярно-фотонных потоков и излучения;
- взаимодействие разнообразных видов излучения с поверхностями металлов, полупроводников, диэлектриков;
- физика и техника низкотемпературной плазмы;
- физика и техника лазеров;
- физические свойства пленок и покрытий;
- нанофизика, микро- и нанотехнологии, микро- и наноэлектроника;
- физические и технические аспекты современных технологий обработки поверхности, диагностики и контроля технологических процессов.

Наукове видання
Журнал фізики та інженерії поверхні
Том 3, № 1, 2018

Українською, російською та англійською мовами

Комп'ютерне верстання: Турбін П. В.
Макет обкладинки: Скіпенко К. В.

Підписано до друку 23.01.2019 р. Формат 60 × 84/8. Папір офсетний. Друк ризографічний.
Ум. друк. арк. 7,6. Обл.-вид. арк. 8,2. Наклад 60 пр. Зам. № Безкоштовно

61022, м. Харків, майдан Свободи, 6.
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
Науковий фізико-технологічний центр МОН і НАН України

Надруковано: ХНУ імені В. Н. Каразіна,
61022, Харків, майдан Свободи, 4.
Видавництво
Тел. 705-24-32
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3367 від 13.01.09