

## **Вплив йонного опромінення на структуру, абсорбційну здатність та корозійні властивості нанорозмірних металевих композицій**

## **Влияние ионного облучения на структуру, абсорбционную способность и коррозионные свойства наноразмерных металлических композиций**

## **Influence of ion irradiation on structure, absorption capacity and corrosion properties of nanosized metal compositions**

**1. Номер державної реєстрації теми – 0118U000221,**

**2. Науковий керівник – д.ф.-м.н., проф. С.І. Сидоренко, С.И. Сидоренко, Sergii Sydorenko**

### **3. Суть розробки, основні результати.**

**(укр.)** Показано перспективність методу бомбардування нанотовщинної вакуумно-конденсованої металевої речовини іонами малих енергій – як інструменту цілеспрямованого формування таких градієнтних розподілів структурно-фазових станів, які забезпечують нові властивості. Розроблено нові методичні підходи до структурного аналізу нанорозмірних матеріалів із використанням синхротронного випромінювання (із щільністю потоку фотонів більшою на 12 порядків, а тривалістю експозиції – в 150 разів меншою, ніж за традиційними методами рентгеноструктурного аналізу). Показано пасивуючий вплив йонного опромінення низької енергії (до 2000 еВ) поверхні тонкоплівкових систем (товщиною до 100 нм) на матеріали металевих шарів, що сприяє відновленню оксидів на внутрішніх інтерфейсах, зменшує кількість домішкових атомів вуглецю та збільшує ступень кристалічності провідного шару із збереженням вихідного фазового складу. Запропоновано нову модель відновних процесів у нанорозмірних плівкових системах, засновану на ефекті дальності бомбардуючих йонів, яка пояснює видалення домішок з границь зерен та границь розділу компонентів, потовщення шарів та покращення корозійних властивостей за рахунок «армування» поверхневого шару аргоном. Вперше продемонстровано, що комбінування низькоенергетичної йонної обробки за оптимального режиму ( $E \sim 800$  еВ,  $t \sim 20$  хвилин) з термічним відпалом (в інтервалі  $200^\circ\text{C} - 450^\circ\text{C}$ ) дозволяє зберегти позитивні ефекти йонного впливу і додатково підвищити ступень досконалості кристалічної структури шару провідного матеріалу, стабілізувати нанокристалічну структуру шляхом гальмування процесів рекристалізації, уповільнити дифузійну взаємодію компонентів, значно підвищити фізико-механічні та адгезійні властивості і тим самим підвищити термічну стабільність плівкового матеріалу. Визначено закономірності щодо фізичної природи залежності ймовірності іонізації розпорошених атомів від атомарної й електронної структури металів, розбавлених твердих розчинів і концентрованих сплавів, що піддаються бомбардуванню іонами нейтральних газів (матричний ефект).

**(рос.)** Показана перспективність метода бомбардировки нанотолщинного вакуумно-конденсированного металлического вещества ионами малых энергий - как инструмента целенаправленного формирования таких градиентных распределений структурно-фазовых состояний, которые обеспечивают новые свойства. Разработаны новые методические подходы к структурному анализу наноразмерных материалов с использованием синхротронного излучения (с плотностью потока фотонов больше на 12 порядков, а длительностью экспозиции - в 150 раз меньше, чем при традиционных методах рентгеноструктурного анализа). Показано пассивирующее влияние ионного облучения низкой энергии (до 2000 эВ) поверхности тонкопленочных систем (толщиной до 100 нм) на материалы металлических слоев, которое способствует восстановлению оксидов на внутренних интерфейсах, уменьшает количество примесных атомов углерода и увеличивает степень кристалличности проводящего слоя с сохранением исходного фазового состава. Предложена новая модель восстановительных процессов в

наноразмерных пленочных системах, основанная на эффекте дальнего действия бомбардирующих ионов, которая объясняет удаление примесей из границ зерен и границ раздела компонентов, утолщение слоев и улучшение коррозионных свойств за счет «армирования» поверхностного слоя аргоном. Впервые продемонстрировано, что комбинирование низкоэнергетической ионной обработки при оптимальном режиме ( $E \sim 800$  эВ,  $t \sim 20$  минут) с термическим отжигом (в интервале  $200^\circ\text{C} - 450^\circ\text{C}$ ) позволяет сохранить положительные эффекты ионного воздействия и дополнительно повысить степень совершенства кристаллической структуры слоя проводящего материала, стабилизировать нанокристаллическую структуру путем торможения процессов рекристаллизации, замедлить диффузионное взаимодействие компонентов, значительно повысить физико-механические и адгезионные свойства и тем самым повысить термическую стабильность пленочного материала. Определены закономерности относительно физической природы зависимости вероятности ионизации распыленных атомов от атомарной и электронной структуры металлов, разбавленных твердых растворов и концентрированных сплавов, подверженных бомбардированию ионами нейтральных газов (матричный эффект).

**(eng.)** It is shown that the method of bombardment of a nanothick vacuum-condensed metallic substance with low-energy ions is a promising tool for the purposeful formation of such gradient distributions of structural-phase states that provide new properties. New methodological approaches have been developed in the structural analysis of nanoscale materials using synchrotron radiation (with a photon flux density by 12 orders of magnitude, and an exposure duration 150 times shorter than provided by traditional methods of X-ray structural analysis). The passivating effect of low-energy (up to 2000 eV) ion irradiation of the surface of thin-film (up to 100 nm thick) systems on the materials of metal layers is shown, which promotes the reduction of oxides at internal interfaces, reduces the number of carbon impurity atoms, and increases the crystallinity degree of the conductive layer while maintaining the initial phase composition. A new model of reduction processes in nanoscale film systems based on the long-range effect of bombarding ions is proposed, which explains the removal of impurities from grain boundaries and interfaces between components, thickening of layers and improvement of corrosion properties due to the "reinforcement" of the surface layer by argon. It has been demonstrated for the first time that the combination of low-energy ion treatment using the optimal mode ( $E \sim 800$  eV,  $t \sim 20$  minutes) with thermal annealing (in the range of  $200^\circ\text{C} - 450^\circ\text{C}$ ) allows to maintain the positive effects of ion action and additionally increases the crystal structure perfection degree of the material of conductive layer, stabilizes the nanocrystalline structure by inhibition of recrystallization processes, slows down the diffusion interaction of components, significantly increases the physical, mechanical and adhesive properties and thereby increases the thermal stability of the film material. The regularities related to the physical nature of the dependence of the probability of sputtered atoms ionization on the atomic and electronic structure of metals, dilute solid solutions, and concentrated alloys exposed to bombardment with ions of neutral gases (matrix effect) have been determined.

#### **4. Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності**

•Владимирський І.А., Шаміс О.В., Волошко С.М., Сидоренко С.І. Спосіб визначення температури Кюрі в тонкоплівкових нанорозмірних феромагнітних композиціях, Патент на корисну модель №132717 від 11.03.2019.

•Сидоренко С.І., Волошко С.М. Спосіб йонно-плазмового керування хімічною активністю поверхні плівкових композицій та захисту від корозії. Літературний письмовий твір наукового характеру, свідоцтво № 79086 (зарєєстровано в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір 16.05.2018).

•Сидоренко С.І., Васильєв М.О., Волошко С.М., Янчук В.В. Особливості застосування плазмонної спектроскопії для визначення фізико-хімічного стану поверхні нанощарових плівкових композицій. Літературний письмовий твір наукового характеру,

свідоцтво № 79087 (zareєстровано в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір 16.05.2018)

• Сидоренко С.І., Васильєв М.О., Волошко С.М., Янчук В.В. Методика визначення коефіцієнту термічного розширення поверхні із застосуванням плазмонної спектроскопії. Літературний письмовий твір наукового характеру, свідоцтво № 79088 (zareєстровано в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір 16.05.2018)

• Сидоренко С.І., Васильєв М.О., Волошко С.М., Бурмак А.П. Спосіб антибактеріальної обробки поверхні металевих імплантатів (подано заявку на патент).

## **5. Порівняння зі світовими аналогами**

Роботу виконано у відповідності до сучасних високих світових наукових стандартів, а результати роботи відповідають світовим аналогам та висвітлені в 2 монографіях та 3 розділах монографій; 27 статтях, що індексуються міжнародною базою даних Scopus (з них 11 статей – у фахових виданнях); численних виступах на конференціях та у дипломних студентських роботах. Результати роботи захищені відповідними охоронними документами на об'єкти права інтелектуальної власності (патент, заявка на патент та 3 свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір).

## **6. Економічна привабливість для просування на ринок.**

Показники економічної привабливості для просування на ринок будуть визначатися на стадії підготовки угоди із можливими інвесторами із ряду: ТОВ «Мікросенсор», Київ; НВО «Мелта»; холдингу «Квазар-Мікро. Компоненти та системи» (Дизайн-центр КМ211 – компанії-лідера в області дизайну наносистем); «МОТОР СІЧ ИНЭТС-1,2»; АТ «Київський завод "Радар"» Державного концерну Укроборонпром; Нікопольський завод трубопровідної арматури ТОВ "М-ЛИТ"; Союз хіміків України; ПАТ "Українське Дунайське пароплавство".

## **7. Потенційні користувачі.**

Результати роботи будуть мати перспективу практичного використання у міждисциплінарних галузях – медичному матеріалознавстві, теоретичній та біомедичній інженерії, виробництві елементної бази комп'ютерної техніки, прикладній фізиці та хімії твердого тіла, гетерогенному каталізі, мікро- і наноприладобудуванні (мікро-, опто-, кріо-, магніто- і наноелектроніці), тощо.

Зокрема, результати роботи становлять практичний інтерес для холдингу «Квазар-Мікро. Компоненти та системи», НВО «Мелта» (для підвищення корозійної стійкості аморфних стрічок товщиною декілька сотень мікрометрів без погіршення затребуваних магнітних властивостей і без змін хімічного складу), для Міжнародного центру електронно-променевих технологій ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України для розробки технології іонної активації поверхні перед нанесенням твердих покриттів на м'які сплави для покращення адгезії (вакуумно-дугова технологія "Булат"). Ще одним напрямом використання результатів може бути поліпшення корозійної стійкості титанових імплантатів, які виготовляються на підприємстві «Мотор-Січ» (Запоріжжя).

## **8. Стан готовності розробки.**

За результатами роботи створено лабораторний зразок вакуумно конденсованої речовини підданої впливу йонів малої енергії (до 2000 eV) із підвищеною корозійною стійкістю. Технічні параметри процесу є предметом патентування.

## **9. Існуючі результати впровадження.**

Наукові положення та результати роботи, що стосуються сучасних теоретичних та прикладних уявлень про формування структурно-фазових станів у вакуумно конденсованих нано- та субнанотовщинних матеріалах під дією зовнішніх енергетичних впливів, викладено в монографіях: «Модифікація металевих поверхонь йонним опроміненням: структура та фізико-хімічні властивості» (LAP LAMBERT Academic

Publishing) та Modern Magnetic and Spintronic Materials. NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics (Springer). За результатами роботи захищено кандидатську дисертацію А.К. Орлова на тему «Дифузійне фазоутворення та властивості нанорозмірних плівкових матеріалів V/Ag, Fe/Pt/Au, Ni/Cu/Cr, Ni/Cu/V». На основі результатів роботи видано 3 навчальні посібники, які впроваджені в початковий процес.

### 10. Назва підрозділу, телефон, email.

Кафедра фізики металів, Інститут матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона, КПІ ім. Ігоря Сікорського; (044)204-9199, email: sidorenko@kpi.ua

### 11. Фото розробки.

**В РАМКАХ РОБОТИ СТВОРЕНО БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИЙ НАДВИСОКОВАКУУМНИЙ ДОСЛІДНИЦЬКИЙ КОМПЛЕКС**

проектуються основних вузлів

- вакуум  $10^{-8}$  Па
- термічна обробка до  $1000^{\circ}\text{C}$  в  $\text{Ar}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$
- 4 випаровувачі
- обробка 50-2000 еВ
- прецизійна зміна положення зразка в 6-ти напрямках

основна робоча камера  $10^{-8}$  Па

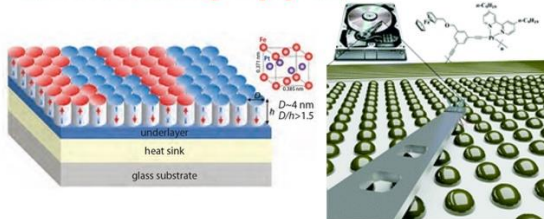


камера для вихалу у вакуумі

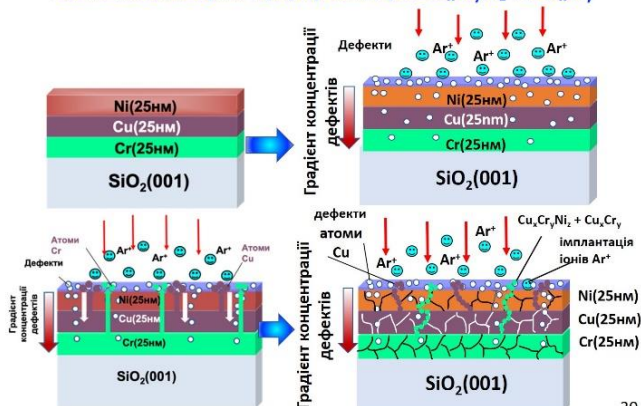


**МОТИВАЦІЯ ПРИ ВИБОРІ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ – ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ. СИСТЕМА Fe-Pt**

**Хімічно впорядкована фаза  $L1_0$  еквімолярного сплаву системи  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$  – матеріал для надшвидкого ( $> 60$  Гбіт/дюйм<sup>2</sup>) магнітного запису інформації**



**Запропоновані моделі генерації дефектів при впливі іонів низьких (до  $\sim 3$  KeV) енергій, дифузії атомів Cu і Cr границями зерен до зовнішньої поверхні і формування фаз  $\text{Cu}_x\text{Cr}_y\text{Ni}_z$  та  $\text{Cu}_x\text{Cr}_y$**



30

### ВИБІР МАТЕРІАЛІВ:

**ШАРИ З ОЦК, ГЦК ТА ГЦТ ГРАТКАМИ ЗАГАЛЬНОЮ ТОВЩИНОЮ ПЛІВКОВИХ КОМПЗИЦІЙ 25-75 НМ**

<b>ОЦК</b> V (25 – 50 нм) Cr (25 нм) Fe (15 нм)	<b>ГЦК</b> Au (7,5 нм) Ni (25 нм) Cu (25 нм)
<b>ГЦТ</b> FePt (15 нм)	Ag (25 нм) Pt (15 нм)

**оскільки саме в таких комбінаціях шарів можна очікувати яскраво виражені металознавчі ефекти**

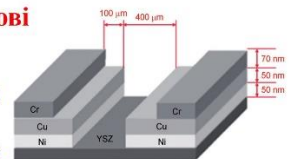
**Підкладинки:  $\text{SiO}_2(001)$ ,  $\text{MgO}(100)$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ ,  $\text{SrTiO}_3(100)$**

**МОТИВАЦІЯ ПРИ ВИБОРІ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ – ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ. СИСТЕМА Ni-Cu-Cr**

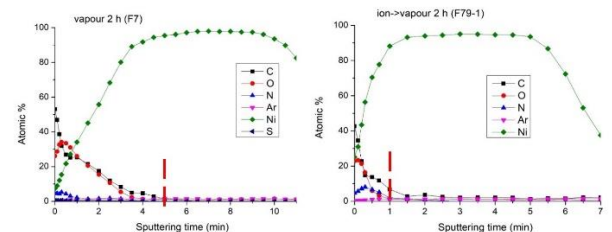
**Каталізатори на основі Ni/Cu/Cr**

**Можуть використовуватися для:**

- відновлення оксидів азоту;
- комплексної очистки газів від  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$ ;
- глибокого окиснення  $\text{CO}$ ;
- та розкладання  $\text{CH}_4$  на водень та вуглець.



**Зменшення концентрації та глибини проникнення домішок за рахунок попередньої іонної обробки**



**Пошаровий Оже-розподіл компонентів тонкоплівкової системи Ni/Cu/Cr після витримки у холодному парі (зліва) та аналогічної витримки з попередньою іонною обробкою (справа)**

5

**12. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання (вагомі: монографії, підручники, посібники, наукові статті, дисертації, інші публікації).**

1. Ю.Н. Макогон, С.И. Сидоренко, Р.А. Шкарбань. Формирование фазового состава и структуры в термоэлектрических наноразмерных пленках на основе скуттерудита  $\text{CoSb}_3$  // Наука про матеріали: досягнення та перспективи. У 2-х т. Т.1 / Редкол.: Л.М. Лобанов (голова) та ін.; НАН України. – Київ : Академперіодика, 2018. – 652 с. (С. 295–310).

2. М.А. Васильев, П.А. Гурин. Поверхность денальных имплантатов: электронная, ионная спектроскопия, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019 – 123 с.

3. С.І. Сидоренко, М.О. Васильєв. «Модифікація металевих поверхонь йонним опроміненням: структура та фізико-хімічні властивості», LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019 – 242 с.

4. Ю.Н. Макогон, Р.А. Шкарбань, С.И. Сидоренко «Наноразмерные термоэлектрические пленки на основе скуттерудита  $\text{CoSb}_3$ », LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. – 169 с.

5. A. Kaidatzis, S. Sidorenko, I. Vladymyrskyi, D. Niarchos. Modern Magnetic and Spintronic Materials. NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics: Springer, 2020.– 162 p.

6. Теорія тепло- та масопереносу в матеріалах [текст] : підручник для студентів, які навчаються за спеціальністю 132 «Матеріалознавство», освітньою програмою «Металофізичні процеси та їх комп'ютерне моделювання» (протокол Вченої ради КПП ім. Ігоря Сікорського № 6 від 7 вересня 2020 р.) / автори: С.І. Сидоренко, С.М. Волошко; КПП ім. Ігоря Сікорського. – Київ : Видавництво «Політехніка», КПП ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 220 с. (С. 106-200).

7. Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів [текст] : навч. посіб. для студ. спеціальності 132 «Матеріалознавство» / КПП ім. Ігоря Сікорського; уклад. : В.В. Холяк, І.А. Владимирський; КПП ім. Ігоря Сікорського. – Київ: Вид-во «Центр учбової літератури», 2019. – 116 с.

8. Структура і властивості металів [Електронний ресурс] : конспект лекцій для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство» (освітня програма "Металофізичні процеси та їх комп'ютерне моделювання") / Серія «Педагогічне надбання : Ларіков Л.Н.» ; укладачі: Сидоренко С.І., Волошко С.М. ; КПП ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 14,98 Мбайт). – Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2020. –1-200 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37764>

9. Сучасні експериментальні методи аналізу низькорозмірних структур: лабораторний практикум [текст]: навч. посіб. для студ. спеціальності 132 «Матеріалознавство», освітньої програми «Металофізичні процеси та їх комп'ютерне моделювання» / КПП ім. Ігоря Сікорського; уклад.: М.В. Карпець, С.І. Сидоренко, А.П. Бурмак. – Київ : Вид-во «САК ЛТД», 2020. – 113 с.

5. Термодинаміка та кінетика дифузії [текст] : навч. посіб. для студ. спеціальності 132 «Матеріалознавство», освітньої програми «Металофізичні процеси та їх комп'ютерне моделювання» / КПП ім. Ігоря Сікорського; уклад. : С.І. Сидоренко, С.М. Волошко. – Київ: Вид-во «САК ЛТД», 2020. – 103 с.

10. Аномальне масоперенесення [текст] : навч. посіб. для підготовки докторів філософії за освітньо-науковою програмою «Матеріалознавство / КПП ім. Ігоря Сікорського; уклад. : С.І. Сидоренко, О.В. Філатов, С.М. Волошко, І.О. Круглов. – Київ : Вид-во «САК ЛТД», 2020. – 82 с.

11. В.Т. Черепин, М.А. Васильев, С.И. Сидоренко, С.М. Волошко, І.А. Круглов. Вторично-ионная эмиссия: матричный эффект // Progress in Physics of Metals. – 2018. – vol. 19. – P. 422–449.

12. М.А. Васильев, И.Н. Макеева, П.А. Гурин. Электрохимическая коррозия стоматологических сплавов // Progress in Physics of Metals. – 2019. – vol. 20. – P. 317–356.

13. V. T. Cherepin, M. O. Vasylyev, I. M. Makeeva, V. M. Kolesnik, and S. M. Voloshko. Secondary Ion Emission during the Proton Bombardment // Progress in Physics of Metals. – 2018. – vol. 19. – P. 49–73.
14. O.V. Shamis, I.A. Vladymyrskiy, Yu.M. Makogon, and S.I. Sidorenko. Materials science aspects of FePt-based thin films' formation // Progress in Physics of Metals. – 2018. – 19. – №3. – P. 337–363.
15. Makogon Yu.M. Fabrication of Nanosize Films on the Base of Scutterudite CoSb<sub>3</sub> for Thermoelectric Devices / Makogon Yu. M., Sidorenko S. I., Shkarban R.A. // Progress in Physics of Metals. – 2018. – № 19. – P. 5-24.
16. A.K. Orlov, I.O. Kruhlov, O.V. Shamis, I.A. Vladymyrskiy, I.E. Kotenko, S.M. Voloshko, S.I. Sidorenko, T. Ebisu, K. Kato, H. Tajiri, O. Sakata, T. Ishikawa. Synchrotron analysis of structure transformations in V and V/Ag thin films // Vacuum. – 2018. – 150. – P. 186-195. Є посилання на проект.
17. A.K. Orlov, O.O. Zhabynska, I.A. Vladymyrskiy, S.M. Voloshko, S.I. Sidorenko, K. Kato, T. Ishikawa. Diffusion of Au and its influence on the coercivity of [FePt/Au/FePt]<sub>2x</sub> thin films during annealing in different atmospheres // Thin Solid Films. – 2018.– 658.– P. 12-21. Є посилання на проект.
18. M.A. Vasylyev, B.N. Mordyuk, S.I.Sidorenko, S.M. Voloshko, I.O. Kruhlov. Characterization of ZrN coating low-temperature deposited on the preliminary Ar<sup>+</sup> ions treated 2024 Al-alloy // Surface and Coatings Technology. – 2019. -361. - P. 413-424. Є посилання на проект.
19. M.A. Vasylyev, S.I. Sidorenko, S.M. Voloshko, I.O. Kruhlov. Low-temperature synthesis of TiN coatings with preliminary treatment of the substrate surface with ion Ar<sup>+</sup> // NanoScience & NanoTechnology. – 2018. – т.18, №2. – С. 33-38. Є посилання на проект.
20. I.O. Kruhlov, I.A. Vladymyrskiy, O. Dubikovskiy, S.I. Sidorenko, T. Ebisu, K. Kato, O. Sakata, T. Ishikawa, Y. Iguchi, G.A. Langer, Z. Erdélyi, and S.M. Voloshko. Reduction processes in Ni/Cu/Cr/Si(100) thin films under low-energy Ar<sup>+</sup> ion bombardment. Materials Research Express. – 2019. – 6.- P.126431. Є посилання на проект.
21. O.V. Shamis, N.Y. Safonova, M.M. Voron, A.P. Burmak, S.I. Sidorenko, G.L. Katona, S. Gulyas, D.L. Beke, M. Albrecht, I.A. Vladymyrskiy. Phase transformations in Pt/Fe bilayers during post annealing probed by resistometry // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2019.– 31.– P. 285401.
22. A. Hafarov, S. Sidorenko, D. Makarov, I. Vladymyrskiy. L10 Ordered Thin Films for Spintronic and Permanent Magnet Applications // Modern Magnetic and Spintronic Materials. NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics. – 2020.– p. 73-94.
23. I.O. Kruhlov, O.V. Shamis, N.Y. Schmidt, M.V. Karpets, S. Gulyas, E. Hadjixenophontos, A.P. Burmak, S.I. Sidorenko, G.L. Katona, G. Schmitz, M. Albrecht, I.A. Vladymyrskiy Kruhlov I.O. Structural phase transformations in annealed Pt/Mn/Fe trilayers // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2020.– 32.– P. 365404.
24. I.O. Kruhlov, O.V. Shamis, N.Y. Schmidt, S. Gulyas, R. Lawitzki, A.P. Burmak, S.I. Konorev, G.L. Katona, G. Schmitz, M. Albrecht, I.A. Vladymyrskiy. Thermally-induced phase transitions in Pt/Tb/Fe trilayers // Thin Solid Films – 2020.– 709.– P. 138134.
25. I.O. Kruhlov, L.M. Kapitanchuk, S.I. Sidorenko, Y. Iguchi, Z. Erdélyi, T. Ishikawa, S.M. Voloshko. Diffusion processes in Ni/Cu/V/Si(100) thin films under complex effect of low-energy ion irradiation and post annealing // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, B – 2020.
26. Гетьман О. И., Капитанчук Л. М. Возникновение диффузионной пористости в пленках импрегнированных WBa-термокатодеов М-типа и ее влияние на эмиссионные характеристики катодов // Порошкова металургія. – 2018. – №7/8. – С. 51-65.
27. М.О. Васильєв, В.М. Колесник, С.І. Сидоренко, С.М. Волошко, В.В. Янчук (студент), А.К. Орлов. Плазмонна спектроскопія поверхні плівок перехідних металів після низькоенергетичного йонного впливу // Металофізика і новітні технології. – 2018. – т. 40. – №7. – С. 919-930.

28. А.К. Орлов, І.О. Круглов, С.М. Волошко, І.Є. Котенко, С.І. Сидоренко, Т. Ішикава. Структура та особливості термічного окиснення плівок ванадію на підкладках SiO<sub>2</sub>(001), MgO(100), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0001), SrTiO<sub>3</sub>(100) // Металофізика і новітні технології. – 2018. – т. 40. – №6. – С. 777-794.
29. Круглов И.А., Котенко И.Е., Грищенко В.А., Сидоренко С.И., Волошко С.М. Структурно-фазовые превращения в наноразмерной системе Cu/Cr при термическом и ионном воздействии // Металофізика і новітні технології. – 2019. – т. 41. – №1. – С. 1-11.
30. I.O. Kruhlov, L.M. Kapitanchuk, S.I. Sidorenko, Z. Erdélyi, T. Ishikawa, S.M. Voloshko, Effect of barrier underlayer on diffusion and phase composition of Ni/Cu thin films under annealing, 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology ELNANO // IEEE Xplore – 2020. – P. 148-151.
31. С. І. Конорев, С. І. Сидоренко, С. М. Волошко, В. Гонг. Структурна трансформація поверхневих шарів Fe, індукована наявністю графену. // Металофізика і новітні технології. – 2020. – vol. 42, No. 5. – P. 669–694.
32. М. А. Васильев, С. И. Сидоренко, С. М. Волошко, В. С. Филатова, П. А. Гурич. Антибактериальная обработка титана ионами Ar<sup>+</sup>. // Металофізика і новітні технології. – 2020. – vol. 42, No. 2. – P. 215–236.
33. М. О. Васильев, С. І. Сидоренко, І. О. Круглов, Д. І. Трубочанінова. Адсорбційна здатність поверхні металевих тонких плівок після бомбардування йонами Ar<sup>+</sup> низьких енергій // Металофізика і новітні технології. – 2020. – vol. 42, No. 5. – P. 621–630
34. М. О. Васильев, С. І. Сидоренко, Т.І. Братусь, С. І. Конорев. Ефекти пасивації поверхні аморфних композицій на основі Fe внаслідок бомбардування йонами Ar<sup>+</sup> низьких енергій. // Металофізика і новітні технології. – 2020. – vol. 42, No. 7. – P. 963–976.
35. Effect of Au Layers on A1→L10 Phase Transition and Magnetic Properties of FePt Thin Films / P. Makushko, M. Shamis, T. Verbytska, S. Sidorenko, I. Makogon // Modern Magnetic and Spintronic Materials. NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics, 2020.– P. 95-117. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-024-2034-0\\_5](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-024-2034-0_5)
36. І. О. Круглов, Л. М. Капітанчук, Т. Ішикава, С. І. Сидоренко, С. М. Волошко. Структурні дефекти у багатошаровій наносистемі Ni/Cu/Cr/Si, індуковані термічним та йонним впливом // Металофізика та новітні технології. – 2020. – т. 42, №. 12.

### 13. Надати ключові слова до розробки

Йонна обробка, вакуумно конденсовані матеріали, термічна обробка, дифузійна взаємодія, корозійна стійкість, пасивація