

## АНОТАЦІЯ

**Шумакова М.О.** Електрофізичні та магніторезистивні властивості плівкових матеріалів на основі феромагнітних і благородних металів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 – прикладна фізика та наноматеріали. – Сумський державний університет, МОН України, Суми, 2020.

Дисертаційна робота присвячена експериментальному і теоретичному вивченню особливостей електротранспорту при зміні температури і зовнішнього магнітного поля в нанорозмірних плівкових матеріалах у вигляді обмежених твердих розчинів (т.р.) атомів Fe або Co у ГЦК решітках Ag або Au, в яких формуються елементи гранульованого стану сферичної або неправильної форми та у вигляді острівців плівки магнітної компоненти. В останньому випадку плівкові зразки отримали назву «квазігранульовані».

Відповідно до мети та поставлених задач, дослідження мали характер комплексних, оскільки були використані ряд методів і методик, які знайшли своє застосування у металофізиці плівкових матеріалів. Зокрема, формування гранульованих плівкових т.р. здійснювалося методом одночасної або пошарової конденсації компонент із наступною гомогенізацією фазового складу шляхом відпалювання до температури  $T_b = 700 - 900$  К. Квазігранульовані плівки конденсувалися у вигляді тришарової системи, у якій середній шар представляв острівцеву плівку. Кристалічна структура, фазовий і елементний склад плівок досліджувався із використанням підкладок у вигляді плівки вуглецю товщиною  $d = 30 - 50$  нм (для електроннографічних і електронно-мікроскопічних досліджень методом ПЕМ) або природньо окисленої пластини Si із поверхневим шаром  $\text{SiO}_x$  ( $x \cong 2$ ) товщиною до 60 нм

(для досліджень методом растрової мікроскопії РЕМ та мікроаналізу хімічного складу методом енергодисперсійної спектроскопії ЕДС).

Електрофізичні та магніторезистивні властивості досліджувалися методом високоточної резистометрії із використанням відповідних комп'ютеризованих комплексів лабораторного виробництва. Інтерпретація результатів здійснювалась із використанням класичної моделі M.Csontos et al. і запропонованої нами напівкласичної моделі для магнітного коефіцієнту  $\beta_{mB} = \frac{d \ln \rho_m}{dB}$  ( $\rho_m$  – т.зв. магнітний питомий опір) для розбавлених т.р., в яких ще не сформувалися гранули магнітної компоненти.

Перший етап роботи був присвячений освоєнню методики формування гранульованих плівкових сплавів при різних загальних концентраціях магнітної компоненти (тобто сумарних концентраціях атомів, на основі яких формується решітка розбавлених т.р. і система гранул) та паспортизації їх фазового і елементного складу та системи гранул. У результаті було встановлено, що фазовий склад завжди відповідає ГЦК решітці т.р. Ag (Fe), Ag (Co), Au (Fe) або Au (Co) із слідами ОЦК - Fe або ГЦП - Co (на електроннограмах фіксуються слабкі лінії при надлишку магнітної компоненти або точкові рефлексії від гранул). Обробка ПЕМ - мікроснімків дозволяє розрахувати середній розмір гранул  $2 r_0 = 2 - 12$  нм та їх поверхневу концентрацію  $-(8 \cdot 10^{14} - 2 \cdot 10^{15}) \cdot \text{м}^{-2}$ . На першому етапі досліджень особлива увага була приділена питанню про концентрацію атомів магнітної компоненти та легких газових атомів (O, C, N та ін).

Перед тим, як скористатися методом ЕДС були вперше отримані розрахункові формули для концентрації атомів магнітної компоненти у гранулах і в розбавлених т.р. із урахуванням середнього радіусу  $r_0$  гранул та товщини плівки т.р. Розрахункові величини могли уточнюватися при використанні високоточного методу ЕДС. Паралельно вперше була

установлена максимально можлива концентрація легких атомів у плівці т.р. при умові конденсації в вакуумі  $10^{-4}$  Па. Виявилося, що концентрація атомів кисню, вуглецю і азоту має такі значення: до 2 ат.% O; до 1 ат.% C і близько нуля ат. % N (ці дані отримувалися шляхом порівняння ЕДС спектрів плівки (т.р. + гранули)/SiO<sub>x</sub>/Si та підкладки SiO<sub>x</sub>/Si.

Додаткові дослідження методом Венда функції розподілу дефектів типу «вакансія - інорідний атом» показали, що енергія активації заліковування цих вакансійних комплексів менше 1 еВ, що має типові значення для комплексів («вакансія-легкий атом газу»). Це означає, що легкі атоми газів локалізуються у своєрідних «пастках» у вигляді вакансій металевих атомів (при таких умовах вони не будуть утворювати хімічні з'єднання, і приймати участь в електроперенесенні шляхом дифузії в т.р.). У результаті зроблено висновок, що атоми кисню і вуглецю не можуть помітним чином впливати на кінетичні властивості плівкових т.р.

На другому етапі вивчалися електрофізичні властивості (питомий опір та ТКО) гранульованих т.р. Як і слід було очікувати, виходячи із аналізу літературних даних, величина  $\rho$  має велике значення порядку  $10^{-7}$  Ом·м, що на порядок більше, ніж у масивних металевих зразках, а ТКО має порядок  $10^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ , що в декілька разів менше у порівнянні і масивними зразками. Основна увага на цьому етапі досліджень була приділена питанню про внесок у загальну величину ТКО процесів розсіювання електронів на гранулах (мова йде про т.зв. термічний магнітний коефіцієнт або  $\beta_{mT} = \frac{d \ln \rho_m}{dT}$ ).

На момент постановки задачі досліджень була відома єдина феноменологічна модель для ТКО гранульованих т.р., яка дозволяла більш-менш коректно оцінити  $\beta_{mT}$  як різницю  $\beta_{екс} - \beta_{роз}$ . Було встановлено, що дана різниця має порядок  $(0,10 - 0,15) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  для гранульованих плівок на основі Ag і Co, отриманих як одночасною, так і пошаровою конденсацією, а також у випадку плівок Pd/Co/П та Pt/Fe/П. Відмітимо, що вказані величини

$\beta_{mB}$  на даний момент можна розглядати як найбільш коректні, хоча використана феноменологічна модель має свої обмеження, точність і границі застосування.

На третьому етапі проведені дослідження магніторезистивних властивостей плівок і була звернута увага на аномально малі величини МО, який у більшості випадків має усі ознаки ГМО, але при певних умовах реалізовувався анізотропний МО із такою ж аномально малою амплітудою. Відмітимо, що у цьому випадку практично повторилася ситуація із ТК $\rho_m$ . Виникла необхідність у розробці теоретичної моделі для  $\beta_B$  розбавлених т.р. без магнітних гранул.

Запропонована нами напівкласична модель, на відміну від використаної феноменологічної моделі, більш коректно враховує можливі варіанти розсіювання електронів і залежність від магнітного поля не тільки середньої довжини вільного пробігу, але і коефіцієнтів дзеркальності і проходження межі та інтерфейсів (в останньому випадку - при умові повного або часткового збереження індивідуальності окремих шарів). Це дало можливість оцінити максимально коректно величину  $\beta_{mB}$ , яка приймає значення  $10^{-3}$ - $10^{-2}$  Тл $^{-1}$ .

Адаптувавши класичну модель M.Csontos et all., яка описує залежність  $\rho_m$  від величини магнітного моменту (спіна  $S$ ) гранули, ми вперше отримали співвідношення для  $\beta_{mT}$  і  $\beta_{mB}$  у залежності від  $S$ . При фізично коректних величинах  $S$  (від 1 до 50 магнетонів Бора) розрахункові  $\beta_{mT}$  і  $\beta_{mB}$  співпадають із експериментальними. На основі цих результатів сформульовано висновок про те, що малі величини  $\beta_{mT}$  і  $\beta_{mB}$  реалізуються у плівках із відносно малими значеннями ТКО  $(1 - 3) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  і аномально малими величинами ГМО  $(0,01 - 0,40 \%)$ . Критерії малості до деякої міри умовні і нами вибрані таким чином: ТКО менше  $5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ , а ГМО менше 0,5 %. Фізична природа цього пов'язана із недосконалою системою гранул (багато із них знаходяться у

суперпарамагнітному стані або мають відносно малий спіні), що не дозволяє реалізацію ефективного спіні-залежного розсіювання електронів.

У результаті основний внесок у питомий опір плівки дає питомий опір т.р., оскільки в об'ємі наногранул реалізується балістичний механізм провідності. Недосконалий низькоомний спіновий канал не шунтує у повній мірі високоомний омичний канал провідності, що обумовлює малі величини ТКО і ГМО. На феноменологічному рівні проаналізовані питання про температурну і концентраційну залежності ГМО і АМО, що може бути використано при вирішенні задач прикладного характеру.

**Ключові слова:** гранульовані плівкові сплави, тверді розчини, гранули, ТКО, ГМО, малі величини ТКО і ГМО, спіні гранули.

*Список публікацій здобувача*

#### **Наукові праці, в яких опубліковані основні результати**

1. Electrophysical properties of granular film alloys/ Koltunowicz T. N., Bondariev V., Odnodvoretz L.V., Protsenko S.I., **Shumakova M.**, Tkach O.P. // *Vacuum* V. 164, P. 165-169 (2019) – **Q2**. (*Особистий внесок – брала участь у проведенні експериментів, виконанні розрахунків та підготовці статті*).

2. Physical properties of film alloys based on ferromagnetic and noble metals (Review). I. Film materials based on Fe and Ag or Au /Odnodvoretz L.V., Protsenko I.Yu., Shabelnyk Yu.M., **Shumakova M.O.**, Tkach O.P. // *J.Nano- Electron. Phys.* V.8, №3. – P. 03034-1 – 03034-11 (2016) – **Q3**. (*Особистий внесок – брала участь у пошуку літературних джерел, отриманні експериментальних даних за тематикою статті, підготовці підрозділів 2.1 і 2.2 та оформленні тексту*).

3. Physical Properties of Film Alloys Based on Ferromagnetic and Noble Metals (review). II. Film Materials Based on Co and Ag or Au /Cheshko I.V., Odnodvoretz L.V., Protsenko I.Yu., **Shumakova M.O.**, Tkach O.P. // *J.Nano- Electron. Phys.* V.8, №4. – P. 04028-1 – 04028-7 (2016) – **Q3**.

*(Особистий внесок – брала участь у пошуку літературних джерел, отриманні експериментальних даних за тематикою статті, підготовці розділу 3 і оформленні тексту).*

4. The contribution to the scattering of electrons in the magnetoresistance of multilayers of nonmagnetic metals /Protsenko I.Yu., Odnodvoretz L.V., Protsenko S.I., **Shumakova M.O.** //Probl. Atomic Sci. Technol., №1 (101), P. 121-123 (2016) – **Q3**. *(Особистий внесок – брала участь у пошуку літературних джерел, отриманні експериментальних даних за тематикою статті, підготовці розділу 3 і оформленні тексту).*

5. The concentration anomaly of strain coefficient binary film system based on Au and Fe atoms/ Pylypenko O.V., Odnodvoretz L.V., **Shumakova M.O.**, Protsenko I.Yu. //Probl. Atomic Sci. Technol. №5 (105), P. 131-135 (2016) – **Q3**. *(Особистий внесок – отримання зразків, проведення електронографічних досліджень, підготовка розділу 2).*

#### **Наукові праці апробаційного характеру**

6. **Shumakova M.O.**, Rylova A.K. On the possible cause of abnormally small GMR in granular film alloys// Матеріали міжнародної конференції ФЕЕ-2020.- Суми: СумДУ, 2020. *(Особистий внесок – проведення розрахунків та підготовка тексту тез доповіді).*

7. **Shumakova M.**, Odnodvoretz L.V. Electrophysical Properties of Granular Film Alloys as Elements of Sensor Electronics//LIV Zakopane School of Physics International Symposium, May 21-25, 2019, Zakopane, Poland (2019). *(Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень та розрахунків).*

8. **Shumakova M.**, Odnodvoretz L.V. Electrophysical Properties of Granular Film Alloys as Elements of Electronics//International Conference Nanomaterials: Applications and Properties'2019, September 15-20, 2019, Odesa, Ukraine. *(Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень та розрахунків).*

9. Approbation of the Semiphenomenological Model for Magnetoresistance of Films Based on Magnetic and Noble Metals/**Shumakova M.O.**, Odnodvoretz L.V., Protsenko S.I., Rylova A.K. // XVII International Freik Conference on physics and technology of thin films and nanosystems. Ivano-Frankivsk, May 20-25, 265 (2019). (*Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень та розрахунків*).

10. **Shumakova M.**, Odnodvoretz L.V., Protsenko I.Yu./ Physical Properties of Film Alloys Based on Ferromagnetic and Noble Metal //International Research and Practice Conference «Nanotechnology and Nanomaterials NANO-2016».- Lviv: LNU 83 (2016). (*Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень та підготовка тези доповіді*).

11. **Шумакова М.О.**, Однодворець Л.В., Проценко І.Ю. Метод формування плівкових матеріалів із спін-залежним розсіюваннм електронів//Тези доповідей «Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «ЄВРИКА-2014».- Львів: ЛНУ ім. І.Франка, 2014.- С.151. (*Особистий внесок –брала участь у пошуку літературних джерел*).

12. Temperature and concentration dependences of anisotropic magnetoresistance film materials/ Protsenko S.I., Hrychanovs'ka O.A., Odnodvoretz L.V., Protsenko I.Yu, **Shumakova M.O.** //Proceedings of the International Conference Nanomaterials: Applications and Properties, V. 4, № 1, P. 0100-1–0100-2 (2015). (*Особистий внесок –брала участь у проведенні аналітичних викладок*).

#### **Наукові праці, які додатково відображають результати**

13. Features strain properties anomalous small of strain coefficient/ Protsenko I.Yu, Tyschenko K.V., Odnodvoretz L.V., **Shumakova M.O.** //J. Mech. Eng. Technol.- V. 1, № 1, P. 34-39 (2013). (*Особистий внесок –брала участь у проведенні експериментальних досліджень*).

14. Strain Effect on Magneto-optical and Magnetic Properties of Film System Based on Fe and Pt/ Cheshko I.V., Makukha Z.M., Odnodvoretz L.V.,

**Shumakova M.O., Velykodnyi D.V., Protsenko I.Yu.** // Universal J. Mater. Sci.- № 1(2).- P. 13-17 (2013). (*Особистий внесок –брала участь у проведенні експериментальних досліджень*).



## SUMMARY

**Shumakova M.O.** Electrophysical and magneoresistivity properties of film materials based on ferromagnetic and noble metals.— Qualification scientific work with the manuscript copyright.

The thesis submitted for the degree doctor of philosophy, specialty 105 – applied physics and nanomaterials. – Sumy State University, Ministry of Education and Science, Sumy, 2020.

The thesis is devoted to the experimental and theoretical study of electrotransport features in changing temperature and external magnetic field in nanoscale film materials in the form of limited solid solutions (s.s.) Fe or Co atoms in hcc lattices Ag or Au, in which granular state elements of spherical or irregular shape in the form of islands of magnetic film component. In the latter case, the film samples were called «quasi-granular».

In accordance with the purpose and the study objectives were complex in nature, because they used a number of methods and techniques that have found application in the metallophysics of film materials. In particular, the formation of granular film soils. were carried out by the method of simultaneous or layered condensation of the components, followed by homogenization of the phase composition by annealing to a temperature  $T_{\text{an}} = 700 - 900$  K. Quasi-granular films were condensed in the form of a three-layer system, in which the middle layer was an island film. The crystalline structure, phase and elemental composition of the films were investigated using carbon film substrates with a thickness  $d = 30 - 50$  nm (for electron diffraction and electron microscopy studies using the TEM method) or a naturally oxidized Si plate with a  $\text{SiO}_x$  surface layer ( $x \cong 2$ ) thickness up to 60 nm (for REM scanning microscopy and chemical composition by energy dispersion spectrometry EDS).

Electrophysical and magnetoresistive properties were investigated by the method of high-precision resistometry using appropriate computerized laboratory complexes. The results were interpreted using the classic M.Csontos et all. model

and our proposed semiclassical model for the magnetic coefficient  $\beta_{mB} = \frac{d \ln \rho_m}{dB}$  ( $\rho_m$  – so-called magnetic resistivity) for diluted s.s. in which magnetic component granules have not yet formed.

The first stage of the work was devoted to the development of the method of formation of granular film alloys at different total concentrations of the magnetic component (i.e. the total atoms concentrations, based on diluted s.s. and the granule system is formed) and certification their of phase and elemental composition and granules system. As a result, it was found that the phase composition always corresponds to the FCC lattice s.s. Ag (Fe), Ag (Co), Au (Fe) or Au (Co) with traces of BCC-Fe or HPC-Co (weak lines are recorded on the electronograms with excess magnetic component or point reflexes from the granules).

TEM micro-images processing allows us to calculate the average granule size of  $2r_0 = 2 - 12$  nm and their surface concentration -  $(8 \cdot 10^{14} - 2 \cdot 10^{15}) \text{ m}^{-2}$ . In the first stage of research, particular attention was paid to the magnetic component atoms concentration and light gas atoms (O, C, N, etc.). Before using the EDS method, the first formulas were obtained for the concentration of magnetic component atoms in granules and in diluted s.s. given the average granules radius  $r_0$  and the thickness of the film, etc.

Estimated values should be specified when using the high-precision EDS. For the first time, the maximum possible concentration of light atoms in the so-called film was established. subject to condensation in a vacuum of  $10^{-4}$  Pa. It was found that the concentration of oxygen, carbon and nitrogen atoms has the following values: up to 2 at % O; up to 1 at % C and about zero at % N (these data were obtained by comparing the EDS of the film spectra (s.s.+granules)/ $\text{SiO}_x/\text{Si}$  and  $\text{SiO}_x/\text{Si}$  substrates).

Additional studies by the Vend method of the function of the distribution of defects of the type «vacancy - foreign atom» showed that the activation energy of healing of defects of these vacancy complexes is less than 1 eV, which has a typical value of complexes («vacancy-light atom of gas»). This means that light

atoms of gases are localized into peculiar «traps» in the form of vacancies of metal atoms (under such conditions they will not form chemical compounds, and participate in electrical transfer by diffusion in s.s.). As a result, it is concluded that atoms oxygen and carbon cannot appreciably affect the kinetic properties of s.s. films.

In the second stage, the electrophysical properties (resistivity and TCR) of granular soils were studied. As expected, based on the analysis of the literature data, the  $\rho$  value is of great importance on the order  $10^{-7}$  Ohm, which is an order of magnitude larger than in massive metal samples, and the TCR has an order  $10^{-3}$  K<sup>-1</sup>, which in several times smaller compared to bulk samples. The main focus at this stage of the research was on the contribution to the total value of the TCR of electron scattering processes on the granules (we are talking about the so-called thermal magnetic coefficient or  $\beta_{mT} = \frac{d \ln \rho_m}{dT}$ ).

At the time of formulation of the research problem, a single phenomenological model was known for TCR the granular s.s., which allowed more or less correct estimation  $\beta_{mT}$  of the difference  $\beta_{exp} - \beta_{cal}$ . This difference was found to be of the order  $(0,10 - 0,15) \cdot 10^{-3}$  K<sup>-1</sup> granular films based on Ag and Co obtained by both simultaneous and layer condensation in the case Pd / Co / S and Pt / Fe / S. Note that these values  $\beta_{mT}$  can currently be regarded as the most correct, although the phenomenological model used has its limitations, accuracy and limits of application.

In the third stage, the studies of the magnetoresistive properties of the films were carried out and attention was paid to the abnormally small values of the MR, which in most cases has all the features of GMR, but under certain conditions anisotropic MR with the same abnormally small amplitude was realized. It should be noted that in this case the situation with  $TC\rho_m$  practically repeated. There was a need to develop a theoretical model for  $\beta_B$  of dilute s.s. without magnetic granules. Our semiclassical model, unlike the phenomenological model used, more correctly takes into account possible electron scattering and dependence on the magnetic

field not only of the average free path length, but also the parameter of specular reflection from external surfaces and the transmission parameter at the grain boundary and interfaces of electrons (in the latter case, provided that they are complete).

This made it possible to estimate the maximum correct value  $\beta_{mB}$ , which takes on value  $10^{-3} - 10^{-2} \text{ T}^{-1}$ . Adapting the classic model of M.Csontos et al., which describes the dependency  $\rho_m$  from the magnitude of the magnetic moment (spin  $S$ ) of the granule we first obtained the relation for  $\beta_{mT}$  and  $\beta_{mB}$  depending on  $S$ . At physically correct values  $S$  (from 1 to 50 Bohr magnets) are calculated  $S$  (від 1 до 50) Bohr magneton settlement  $\beta_{mT}$  and  $\beta_{mB}$  coincide with experimental ones. Based on these results, we conclude that small quantities  $\beta_{mT}$  and  $\beta_{mB}$  are implemented in films with relatively small values TCR  $(1-3) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  i abnormally small quantities of GMR  $(0,01 - 0,40 \%)$ . The smallness criterion is to some extent conditional and we are chosen as follows: TCR is smaller  $5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  and GMR less than 1 %.

The physical nature of this is due to the imperfect granule system (many of which are in superparamagnetic state or have relatively small spin), which does not allow efficient spin-dependent electron scattering. As a result, the main contribution to the resistivity of the film is given by the resistivity of the so-called, since the ballistic mechanism of conductance is implemented in the nanogranule volume. The imperfect low-ohmic spin channel does not completely shunt the high-ohmic conductivity channel, which causes small values of TCR and GMR. At the phenomenological level the questions of temperature and concentration dependence of GMR and AMR are analyzed, which can be used in solving problems of applied character.

**Keywords:** granular film alloys, solid solutions, granules, TCR, GMR, small values of TCR and GMR, spin granules.

*List of publications of the applicant*

**Scientific works in which the main results are published**

1. Electrophysical properties of granular film alloys/ Koltunowicz T. N., Bondariev V., Odnodvoretz L.V., Protsenko S.I., **Shumakova M.**, Tkach O.P.// *Vacuum* V. 164, P. 165-169 (2019) – **Q2**. (*Personal Contribution - Participated in experiments, calculations, and article preparation*).

2. Physical properties of film alloys based on ferromagnetic and noble metals (Review). I. Film materials based on Fe and Ag or Au /Odnodvoretz L.V., Protsenko I.Yu., Shabelnyk Yu.M., **Shumakova M.O.**, Tkach O.P. // *J.Nano-Electron. Phys.* V.8, №3. – P. 03034-1 – 03034-11 (2016) – **Q3**. (*Personal contribution - participated in the search of literary sources, obtaining experimental data on the topic of the article, the preparation of the subsection 2.1, 2.2 and the design of the text*).

3. Physical Properties of Film Alloys Based on Ferromagnetic and Noble Metals (review). II. Film Materials Based on Co and Ag or Au /Cheshko I.V., Odnodvoretz L.V., Protsenko I.Yu., **Shumakova M.O.**, Tkach O.P. // *J.Nano-Electron. Phys.* V.8, №4. – P. 04028-1 – 04028-7 (2016) – **Q3**. (*Personal Contribution - participated in the search for literature sources, obtaining experimental data on the topic of the article, the preparation of section 3 and the design of the text*).

4. The contribution to the scattering of electrons in the magnetoresistance of multilayers of nonmagnetic metals /Protsenko I.Yu., Odnodvoretz L.V., Protsenko S.I., **Shumakova M.O.** // *Probl. Atomic Sci. Technol.*, №1 (101), P. 121-123 (2016) – **Q3**. (*Personal contribution - participated in the search of literature, obtaining experimental data on the topic of the article, the preparation of section 3 and the layout of the text*).

5. The concentration anomaly of strain coefficient binary film system based on Au and Fe atoms/ Pylypenko O.V., Odnodvoretz L.V., **Shumakova M.O.**, Protsenko I.Yu. // *Probl. Atomic Sci. Technol.* №5 (105), P. 131-135 (2016) – **Q3**. (*Personal Contribution - Sampling, Electronographic Research, Section 2 Preparation*).

### **Scientific works of approbation character**

6. **Shumakova M.O.**, Rylova A.K. On the possible cause of abnormally small GMR in granular film alloys// Матеріали міжнародної конференції ФЕЕ-2020.- Суми: СумДУ, 2020. (*Personal contribution - calculations and preparation of the text of the report*).

7. **Shumakova M.**, Odnodvoretz L.V. Electrophysical Properties of Granular Film Alloys as Elements of Sensor Electronics//LIV Zakopane School of Physics International Symposium, May 21-25, 2019, Zakopane, Poland (2019). (*Personal contribution - Experimental research and calculations*).

8. **Shumakova M.**, Odnodvoretz L.V. Electrophysical Properties of Granular Film Alloys as Elements of Electronics//International Conference Nanomaterials: Applications and Properties'2019, September 15-20, 2019, Odesa, Ukraine. (*Personal contribution - Experimental research and calculations*).

9. Approbation of the Semiphenomenological Model for Magnetoresistance of Films Based on Magnetic and Noble Metals/ **Shumakova M.O.**, Odnodvoretz L.V., Protsenko S.I., Rylova A.K. // XVII International Freik Conference on physics and technology of thin films and nanosystems. Ivano-Frankivsk, May 20-25, 2019. (2019). (*Personal contribution - Experimental research and calculations*).

10. **Shumakova M.**, Odnodvoretz L.V., Protsenko I.Yu./ Physical Properties of Film Alloys Based on Ferromagnetic and Noble Metal // International Research and Practice Conference «Nanotechnology and Nanomaterials NANO-2016».- Lviv: LNU 83 (2016). (*Personal Contribution - Experimental Research and Presentation*).

11. **Шумакова М.О.**, Однодворець Л.В., Проценко І.Ю. Метод формування плівкових матеріалів із спін-залежним розсіюваннм електронів//Тези доповідей «Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «ЕВРИКА-2014».- Львів: ЛНУ ім. І.Франка, 2014.- С.151.

(Personal contribution - participated in the search for literary sources).

12. Temperature and concentration dependences of anisotropic magnetoresistance film materials/ Protsenko S.I., Hrychanovs'ka O.A., Odnodvoretz L.V., Protsenko I.Yu, **Shumakova M.O.** //Proceedings of the International Conference Nanomaterials: Applications and Properties, V. 4, № 1, P. 0100-1–0100-2 (2015).

(Personal contribution - participated in the analytical work).

### **Scientific works that further reflect the results**

13. Features strain properties anomalous small of strain coefficient/ Protsenko I.Yu, Tyschenko K.V., Odnodvoretz L.V., **Shumakova M.O.** //J. Mech. Eng. Technol.- V. 1, № 1, P. 34-39 (2013). (*Personal contribution - participated in the experimental studies*).

14. Strain Effect on Magneto-optical and Magnetic Properties of Film System Based on Fe and Pt/ Cheshko I.V., Makukha Z.M., Odnodvoretz L.V., **Shumakova M.O.**, Velykodnyi D.V., Protsenko I.Yu. // Universal J. Mater. Sci.- № 1(2).- P. 13-17 (2013). (*Personal Contribution - Participated in experimental research*).