

АНОТАЦІЯ

Бездідько О. В. Фізичні процеси в функціональних елементах гнучкої електроніки на основі металевих наноструктурованих матеріалів. –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, 2021.

Дисертаційна робота присвячена комплексному дослідженню структури, електрофізичних, магнітооптичних та магніторезистивних властивостей нанорозмірних плівкових шаруватих несиметричних структур на основі феромагнітних металів Fe, Ni, Co і сплавів FeNi і (Co-Cr) та немагнітних металів Cu, Cr і Pt. Крім того, окремо досліджено вплив температури відпалу (600-1100K) на структурно - фазовий склад наночастинок феритів Fe_3O_4 , $NiFe_2O_4$ та $CoFe_2O_4$, які можуть виступати базовою магнітною компонентою в структурах типу магнітні наночастинки / провідна матриця, в яких, за аналогією з гранульованими структурами, може реалізовуватись ефект гігантського магнітоопору (ГМО).

Багатошарові плівкові структури отримували методом пошарої конденсації незалежних джерел, з подальшим відпалом до температури 400 – 800 К. Наночастинки феритів отримувались методом хімічного синтезу за допомогою реакції між ацетилацетонатами Fe, Ni та Co з 1,2-гексадекандіолом та олеїновою кислотою і олеїламіном у ролі попередника поверхнево активної речовини у феніловому ефірі. При нанесенні частинок на підкладку використовувались декілька методів, а саме капання розчину з наночастинками на підкладку, модифікована методика Ленгмюра – Блоджет і метод спін – коатингу. Крім просвічуючої мікроскопії для дослідження структури наночастинок додатково використовувались методи растрової електронної мікроскопії і атомно - силової мікроскопії, для контролю досконалості сформованих шарів.

Оскільки для багат шарових плівкових структур надзвичайно важливим є збереження індивідуальності шарів то були досліджені структурно - фазовий стан та дифузійні процеси у двошарових структурах. Показано, що в двошарових структурах Cr/Fe/Pt та Pt/Fe/Pt (де Pt – підкладка) дифузія може відбуватись вже в процесі нанесення шарів за рахунок так званої конденсаційно – стимульованої дифузії. Так, для систем Fe/Cr, незалежно від концентрації компонент та температури відпалу формуються неупорядковані тверді розчини. У системах Fe/Pt спостерігається інша картина. Залежно від концентрації атомів компонент у невідпалених зразках можна сформува три фази: Fe_3Pt ; $FePt$, $FePt_3$, а також твердий розчин т.р. Fe (Pt). Постійна решітки для цих систем дуже близька і лежить в діапазоні 0,384 – 0,386 нм. Перераховані фази можуть формуватись при кімнатній температурі, при зміні концентрації компонент. Крім того, подальший відпал тієї чи іншої фази може призводити до переходу до іншої фази.

Акцент в роботі було зроблено на дослідженні та аналізі зміни магнітних характеристик плівкових систем (коерцитивна сила V_c , залишкова намагніченість V_R , намагніченість насичення V_s та кут Керра), які можуть бути індикатором переходу від однієї фази до іншої. Показано, що для одношарових плівок Fe в діапазоні товщин 20 – 100 нм коерцитивність скаладає порядка 12 мТл. Найбільша зміна магнітних параметрів спостерігалась для систем Fe/Cr та Fe/Pt в діапазоні товщин 5 – 20 нм для хрому і 3 – 15 нм для платини. В обох випадках плівки не піддавались процесу відпалювання, оскільки очевидно, що вже в процесі конденсації сформувались тверді розчини. Температура підкладки 450 К під час осадження шару Cr на шар Fe значно підвищує процеси дифузії між шарами, зменшує коерцитивність системи і не впливає на величину кута Керра. Цікавим являється результат для мультишарів Fe(3)/Pt(3) з кількістю повторюваних елементів від 2 до 8. Для таких систем спостерігається збільшення основних магнітних параметрів порівняно з двошаровими плівками при однаковій ефективній товщині.

Наступним етапом було дослідження структурно фазового стану та магніторезистивних властивостей асиметричних структур (Co-Cr)/Cu/Co/П та Fe/Pt/Cr/Fe/П, де (Co-Cr – плівковий сплав Co-Cr, який отримувався одночасним випаровування металів із незалежних джерел: Cr – з вольфрамової стрічки, Co – електронно-променевої гармати).

Електронно-мікроскопічні дослідження невідпалених плівок Co-Cr/Cu/Co з $C_{Cr} < 30$ ат.%, $d_F = 20 - 30$ нм, $d_N = 3 - 15$ нм (де F – ферромагнетик, N – немагнітний матеріал) мають дрібнокристалічну структуру (розмір зерен менше 10 нм). Для них електроннографічно фіксуються широкі дифракційні кільця, що очевидно належать фазам ГЦК-Cu, α -Co-ГЦП та α -Co(Cr). Отже, при формуванні покриваючого шару утворюється твердий розчин хрому в кобальті Co(Cr) і ця фаза має ГЦП решітку. Після відпалювання за температури 700 К у плівках Co-Cr/Cu/Co/П наявні ті ж фази, що і в свіжосконденсованих зразках: α -Co та ГЦК-Cu і α -Co(Cr). Ширина дифракційних максимумів після відпалювання суттєво зменшується, але лінії які належать фазам α -Co та т.р. α -Co(Cr) внаслідок близьких міжплощинних відстаней електроннографічно не розділяються. Дифузія атомів Cr в процесі відпалювання відбувається значно інтенсивніше. Для відпалених плівок відбувається проникнення атомів Cr через прошарок Cu із подальшою взаємодифузією атомів Co та Cr в базовому шарі Co.

Теоретично показано, що для несиметричних структур можлива інверсія (зміна знаку) ефекту ГМО за умови, якщо спінова асиметрія в розсіюванні електронів протилежна в суміжних ферромагнітних шарах.

Для свіжосконденсованих та відпалених за температур 400 і 550 К плівок Co-Cr/Cu/Co/П з $C_{Cr} < 30$ ат.%, $d_F = 20 - 30$ нм, $d_N = 3 - 15$ нм спостерігається нетиповий як для анізотропного так і гігантського магнітоопору характер поведінки польових залежностей магнітоопору (МО). Такі особливості польових залежностей магнітоопору можливо обумовлені різними значення коефіцієнтів спінової асиметрії ферромагнітних шарів α ($\alpha < 1$ для сплаву Co-Cr та $\alpha > 1$ для Co).

Для структур Fe/Pt/Cr/Fe/П та Co/Cu/Cr/Fe/П з $d_F = 20 - 30$ нм, $d_N = 3 - 5$ нм спостерігався анізотропний характер магнітоопору. Причиною анізотропного характеру магнітоопору структур з відносно тонкими немагнітними прошарками є перемішування компонент системи та утворення твердих розчинів у процесі конденсації.

До несиметричних систем також відносяться структури, в яких, в якості одного з магнітних шарів, може виступати сплав. В нашому випадку це був сплав на основі пермалою $Fe_{0,5}Ni_{0,5}$ та Cu. Дослідження фазового складу плівок методом дифракції електронів показало, що в усіх свіжосконденсованих та відпалених за температури 700 К плівках FeNi товщиною $d = 20 - 100$ нм, як і в масивних зразках відповідного складу, фіксується ГЦК - фаза NiFe із параметром решітки $a = 0,360 - 0,361$ нм. Фазовий склад свіжосконденсованих плівок FeNi(Cu) товщиною $d = 20 - 100$ нм та при $c_{FeNi} = 0,5 - 0,9$ відповідає ГЦК-фазі т.р. FeNi(Cu) з параметром решітки $a = 0,360 - 0,361$ нм. Після відпалювання плівок при температурі 700 К, внаслідок збільшення розміру кристалітів до 50 нм, ширина дифракційних кілець зменшується. При цьому зміни фазового складу та параметра решітки електроннографічно не фіксуються. Для плівкових сплавів $d = 20 - 70$ нм і $c_{Cu} = 5 - 50$ ат. % у температурному інтервалі 120 - 400 К фіксується анізотропний характер магнітоопору з амплітудою поздовжнього та поперечного ефекту 0,02 - 0,5 % залежно від товщини і концентрації компонент. Зауважимо, що амплітуда магніторезистивного ефекту для плівкових сплавів із концентрацією Cu менше 50 ат. % складає величину меншу за 0,02 %.

Останнім етапом було дослідження структурно - фазових змін при термообробці наночастинок феритів Fe_3O_4 , $NiFe_2O_4$ та $CoFe_2O_4$. Термообробка необхідна по причині того, що вихідні наночастинки мають дуже малі розміри (3 - 10 нм) і знаходяться у суперпарамагнітному стані. Саме тому потрібно досягти ефекту збільшення розмірів частинок, при збереженні їх фазового складу. Було показано, що в діапазоні температур 300 - 600 К

зберігається фазовий стан частинок з незначним їх збільшенням розмірів. Подальше збільшення температури відпалу до 800 К призводить до значного зменшення інтенсивності деяких ліній, що свідчить про початок фазового переходу. Після 800 К починається розпад оксидів і утворюється велика кількість допоміжних фаз. За температури 1100 К оксиди остаточно розпадаються і стабілізуються фази Fe та Ni. Фактично, наночастинки залишаються в вихідному фазовому стані лише до 800 К, після чого починається їх розпад. Збільшення розмірів частинок відбувається за рахунок їх коагуляції з сусідніми частинками. Однак таке збільшення не призвело збільшення сумарного магнітного моменту.

З аналізу даних стає зрозумілим, що найбільш ефективною методикою отримання однорідних шарів є методика Ленгмюра - Блоджет. Однак вона є найскладнішою у використанні, низькопродуктивною та неможливою для виробництва у промислових масштабах. У той же час техніка простого капання розчину наночастинок на поверхню підкладки є найпростішою та найефективнішою, що дозволяє отримувати впорядковані моно - та неупорядковані мультишари НЧ, з правильним підбором їх концентрації в розчині. Окремо потрібно виділити метод спін - коатингу. Завдяки своїй відносній простоті, залежно від використовуваних параметрів (концентрація НЧ та швидкість обертання), можна отримати структури абсолютно різних типів, з різним розподілом на підкладці. Однак нам не вдалося отримати однорідний шар наночастинок, оскільки, навіть за низьких концентрацій НП у розчині, спостерігалось утворення скупчень різного розміру (кластерів).

Ключові слова: асиметричні системи, твердий розчин, наночастинки, ТКО, ГМО, МОКЕ.

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковані основні результати

1. Formation of Ordered Magnetic Nanoparticles Arrays Using Various Obtaining Techniques / **Bezdidko O. V.**, Cheshko I. V., Kostiuk D. M., Protsenko S. I. // J. Nano- Electron. Phys. 11 № 3, P. 03037-1-03037-5 (2019).

– **Q3** (*Особистий внесок – проведення експериментів, написання статті*).

2. Electrical Conductivity and Magnetoresistive Properties of Film Alloys Based on Permalloy $\text{Fe}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}$ and Copper / **Bezdidko O.V.**, Shkurdoda Yu.O., Shpetnyi I.O., // J. Nano- Electron. Phys. 12 № 3, P. 03034-1-03034-4 (2020). – **Q3** (*Особистий внесок – участь в обробці експериментальних даних та підготовці тексту статті*).

3. Magneto-Optical Properties of Two – Layer Film Systems Based on Fe And Cr / Bezdidko O. V., Shkurdoda Yu.O, Fedchenko O., Cheshko I. V., Protsenko S. I. // Int. J. of Mod. Ph. B 34 №27, P. 2050521-1-2050521-8 (2020). – **Q4** (*Особистий внесок – обробка експериментальних даних та підготовка тексту статті*).

4. Structure and magnetoresistive properties of three-layer films (Co - Cr) / Cu / Co / Bezdidko O.V., Nepijko S.O., Shkurdoda Yu. O., Shabelnyk Yu. M. // J. Nano- Electron. Phys. 13 № 3, P.03042-1-03042-4 (2021). – **Q3** (*Особистий внесок – участь в обробці експериментальних даних та підготовці тексту статті*).

5. Magneto-optical properties of two – layer film systems based on Fe and Pt Bezdidko O.V., Shkurdoda Yu. O., Vashchenko S. M. // Physics and Chemistry of Solid State 22 №2, P. 242-247 (2021). **Q4** – (*Особистий внесок – обробка експериментальних даних та підготовка тексту статті*).

Наукові праці апробаційного характеру

6. **Bezdidko O. V.**, Kostiuk D. M., Cheshko I. V., Protsenko S. I. Formation of Co / Cu / NiFe_2O_4 (Nanoparticles) Spin-Valve Type Functional Elements, International Conference Nanomaterials: Applications and Properties 2018, September 9-14, 2018, Odesa, Ukraine. (*Особистий внесок – обробка експериментальних даних та підготовка тексту статті*).

7. **Bezdidko O. V.**, Shumakova M.O., Cheshko I. V., Protsenko S. I. Investigation of the Structure and Thermal Stability of NiFe_2O_4 Nanoparticles Monolayers, Electronics and Informational Technologies, August 30 –

September 2, 2018, Ukraine. (*Особистий внесок – обробка експериментальних даних та підготовка тексту статті*).

8. Dekhtyaruk L.V., Kharchenko A.P., Klymenko Yu.O., Shkurdoda Yu.O., Shabelnyk Yu.M., **Bezdidko O.V.**, Chornous A.M. Negative and Positive Effect of Giant magnetoresistance in the Magnetically Ordered Sandwich, International Conference Nanomaterials: Applications and Properties 2020, November 9-13, 2020, Sumy, Ukraine. (*Особистий внесок – допомога в обробці експериментальних даних та підготовці тексту статті*).

9. **Bezdidko O. V.**, Cheshko I. V., Protsenko S. I. Investigation of the Structure and Thermal Stability of NiFe_2O_4 Nanoparticles Monolayers, International Conference Nanomaterials: Applications and Properties 2019, September 15-20, 2019, Odesa, Ukraine. (*Особистий внесок – обробка експериментальних даних та підготовка тези доповіді*).

10. **Bezdidko O. V.**, Cheshko I. V., Protsenko S. I. Magneto-Optical Properties of Film Systems Based on Fe and Cr, Ion Implantation and Other Applications of Ions and Electrons, June 18-21, 2018, Kazimierz Dolny, Poland. (*Особистий внесок – обробка експериментальних даних та підготовка тези доповіді*).

11. **Bezdidko O. V.**, Protsenko S. I. Magnetoresistive Properties of Iron Oxide Nanoparticles Arrays in Conducting Matrix, LIV Zakopane School of Physics International Symposium, May 21-25, 2019, Zakopane, Poland. (*Особистий внесок – обробка експериментальних даних та підготовка тези доповіді*).

12. **Bezdidko O. V.**, Cheshko I. V., Protsenko S. I. Formation of Ordered Magnetic Nanoparticles Arrays Using Various Obtaining Techniques, XVII International Freik Conference on physics and technology of thin films and nanosystems, May 20 - 25, 2019, Ivano-Frankivsk, Ukraine. (*Особистий внесок – обробка експериментальних даних та підготовка тези доповіді*).

13. **Бездідько О.В.**, Кучменко Д.М. Особливості польових залежностей магнітоопору тришарових плівок $\text{Co}/\text{Cu}/\text{Co}_x\text{Cr}_{1-x}/\text{P}$,

Матеріали міжнародної конференції ФЕЕ-2020, Суми, Україна, 2020.
(*Особистий внесок – обробка експериментальних даних та підготовка тези доповіді*).

14. **Bezdidko O.V.**, Kulak A.S., Shabelnyk Yu. M., Shkurdoda Yu. O., Protsenko S.I. Structural, Electrophysical and Magnetoresistive Properties of Superparamagnetic Particles Placed in a Silver Matrix, Condensed Matter & Low temperature Physics 2020, June 8 – 14, 2020, Kharkiv, Ukraine.
(*Особистий внесок – обробка експериментальних даних та підготовка тези доповіді*).

15. **Bezdidko O.**, Shkurdoda Yu.O., Shabelnyk Yu. M., Protsenko S.I., Tkach O.P., Kosenko O.S. Magneto-optical properties of bilayer film systems based on Fe and Pt, 8-th International Conference on Nanotechnologies and Nanomaterials, August 26 – 29, 2020, Lviv, Ukraine. (*Особистий внесок – обробка експериментальних даних та підготовка тези доповіді*).

Наукові праці, які додатково відображають результати

16. Формування багатошарових упорядкованих масивів магнітних наночастинок CoFe_2O_4 , Чешко І.В., Бездідько О.В., Логвинов А.М., Проценко С.І. // J. Nano- Electron. Phys. 9 № 6, 2017. (*Особистий внесок – участь в обробці експериментальних даних*).

SUMMARY

Bezdidko O.V. Physical processes in functional elements of flexible electronics based on metallic nanostructured materials. - 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 complex research of the structure, electrophysical, magneto - optical and magnetoresistive properties of nanosized film layered asymmetric structures, in which the effect of giant magnetoresistance is observed. The basis for the formation of such structures are ferromagnetic metals Fe, Ni, Co, as well as their alloys: Fe_xNi_x and CoCr. Thin layers of Cu, Cr and Pt were used as a non-magnetic component. In addition, the effect of temperature influence on the structural - phase composition of Fe_3O_4 , $NiFe_2O_4$ and $CoFe_2O_4$ ferrite nanoparticles, which can act as a basic magnetic component in structures such as magnetic nanoparticles / conductive matrix, in which, like in granular structures, giant magnetoresistance effect can be realized

Usual sampling techniques were used the for film systems, such as layer-by-layer and simultaneous deposition from two independent sources, followed by annealing to a temperature of 500 - 800 K. Transmission electron microscopy was used as a method to control the structure and change of the phase composition after annealing.

Multilayer film structures were obtained by layer-by-layer deposition from independent sources, followed by annealing to a temperature of 400 - 800 K. Nanoparticles of ferrites were obtained by chemical synthesis by reaction between acetylacetonate Fe, Ni and Co with 1,2 - hexadecanediol and oleic acid and oleilamino surfactant in phenyl ether. Several methods were used to apply the particles to the substrate, namely the dripping of a solution with nanoparticles on the substrate, the modified Langmuir-Blodget technique, and the spin-coating

method. In addition to transmission microscopy for nanoparticles, raster electron microscopy and atomic force microscopy methods were additionally used to control the perfection of the formed layers.

Since asymmetric film structures are complex in nature, the properties of their individual elements were first investigated. Literature data indicate that in two-layer structures Fe / Cr and Fe / Pt diffusion can occur already in the process of layer deposition due to the so-called condensation-stimulated diffusion. Thus, for Fe / Cr systems, regardless of the concentration of components and annealing temperature, disordered solid solutions are formed. A different picture is observed in Fe / Pt systems. Depending on the concentration of component atoms in the annealed samples, three phases can be formed: FePt₃; Fe₃Pt; FePt and s.s. Fe(Pt). The lattice constant for these systems is very close and lies in the range of 0.384 - 0.386 nm. The difference can be seen by analyzing the intensity of the line. Interestingly, these phases can be formed at room temperature by changing the concentrations of the components.

Emphasis was placed on the analysis of changes in the magnetic characteristics of film systems, such as coercive force B_c , residual magnetization H_R , saturation magnetization H_s and Kerr angle, which in this case are indicators of the transition from one phase to another. For this purpose, a method based on the magneto-optical Kerr effect was chosen. It is shown that for single-layer Fe films in the thickness range 20–100 nm the coercivity is ≈ 12 mT. The largest change in magnetic parameters was observed for systems Fe/Cr and Fe/Pt in the thickness range 5–20 nm for chromium and 3–15 nm for platinum. In both cases, the films were not subjected to the annealing process, because it is obvious that solid solutions have already formed in the condensation process. The substrate temperature of 450 K during the deposition of the Cr layer on the Fe layer significantly increases the diffusion processes between the layers, reduces the coercivity of the system and does not affect the Kerr angle. An interesting result is for multilayers Fe(3)/Pt(3) with the number of repeating elements from 2 to 8. For

such systems, there is an increase in the basic magnetic parameters compared to two-layer films with the same effective thickness.

The next step was to study the structural phase state and magnetoresistive properties of asymmetric structures Co-Cr/Cu/Co/S and Fe/Pt/Cr/Fe/S (S - substrate).

Electron - microscopic studies of unannealed Co-Cr/Cu/Co films with $C_{Cr} < 30$ at.%, $D_F = 20 - 30$ nm, $d_N = 3 - 15$ nm have a fine-grained structure (grain size less than 10 nm). For them, broad diffraction rings are electronically recorded, which obviously belong to the FCC-Cu, α -Co-HCP and α -Co (Cr) phases. Therefore, during the formation of the coating layer, a solid solution of chromium in cobalt Co (Cr) is formed and this phase has a HCP lattice. After annealing at a temperature of 700 K, the same phases are present in Co-Cr / Cu / Co / S films as in as-deposited samples: α -Co and fcc Cu and α -Co (Cr). The width of the diffraction maxima after annealing decreases significantly, but the lines belonging to the α -Co phases, etc. α -Co (Cr) due to close interplanar distances are not separated electronically. The diffusion of Cr atoms during annealing is much more intense. For annealed films, Cr atoms penetrate through the Cu layer, followed by the mutual diffusion of Co and Cr atoms in the Co base layer.

It is theoretically shown that for asymmetric structures the inversion (change of sign) of the GMR effect is possible provided that the spin asymmetry in electron scattering is opposite in adjacent ferromagnetic layers.

For as-deposited and annealed at temperatures of 400 and 550 K films Co-Cr/Cu/Co/S with $C_{Cr} < 30$ at.%, $D_F = 20 - 30$ nm, $d_N = 3 - 15$ nm is atypical for both anisotropic and giant magnetoresistance the nature of the behavior of the field dependences of the magnetoresistance. Such features of the field dependences of the magnetoresistance may be due to different values of the spin asymmetry coefficients of the ferromagnetic layers α ($\alpha < 1$ for the Co-Cr alloy and $\alpha > 1$ for Co).

For the structures Fe/Pt/Cr/Fe/S and Co/Cu/Cr/Fe/S with $d_F = 20 - 30$ nm, $d_N = 3 - 5$ nm, the anisotropic nature of the magnetoresistance was observed. The

reason for the anisotropic nature of the magnetoresistance of structures with relatively thin nonmagnetic layers is the mixing of system components and the formation of solid solutions in the condensation process.

Asymmetric systems also include structures in which, as one of the magnetic layers, an alloy can act. In our case it was an alloy based on permalloy FeNi and Cu. The study of the phase composition of films by electron diffraction showed that in all as-deposited and annealed at 700 K FeNi films with a thickness $d = 20 - 100$ nm, as well as in massive samples of the corresponding composition, fixed FCC - NiFe phase with lattice parameter $a = 0.360 - 0.361$ nm. The phase composition of as-deposited films FeNi(Cu) with a thickness $d = 20 - 100$ nm and at $c_{\text{FeNi}} = 50 - 90\%$ corresponds to the FCC phase s.s. FeNi (Cu) with the lattice parameter $a = 0.360 - 0.361$ nm. After annealing the films at a temperature of 700 K, due to the increase in the size of the crystallites to 50 nm, the width of the diffraction rings decreases. In this case, changes in the phase composition and lattice parameter are not electronically recorded. For film alloys $d = 20 - 70$ nm and $c_{\text{Cu}} = 5 - 50$ at. % in the temperature range of 120 - 400 K fixed anisotropic nature of the magnetoresistance with the amplitude of the longitudinal and transverse effect of 0.02 - 0.5% depending on the thickness and concentration of the components. Note that the amplitude of the magnetoresistive effect for film alloys with a Cu concentration of less than 50 at. % is less than 0.02%.

The last stage was the study of structural - phase changes during heat treatment of Fe_3O_4 , NiFe_2O_4 and CoFe_2O_4 nanoparticles. Heat treatment is necessary due to the fact that the original nanoparticles are very small (3 - 10 nm) and are in a superparamagnetic state. That is why we need to achieve the effect of increasing the particle size, while maintaining their phase composition. It was shown that in the temperature range 300 - 600 K the phase state of the particles with a slight increase in their size is preserved. A further increase in the annealing temperature to 800 K leads to a significant decrease in the intensity of some lines, which indicates the beginning of the phase transition. After 800 K, the decomposition of oxides begins and a large number of auxiliary phases are formed.

At a temperature of 1100 K, the oxides finally decompose and the Fe and Ni phases stabilize. In fact, nanoparticles remain in the initial phase state only up to 800 K, after which their decay begins. The increase in particle size occurs due to their coagulation with sedimentary particles. However, this increase did not lead to the desired effect, and their total magnetic moment was insufficient to obtain a response in the study of magnetoresistive properties.

From the data analysis it becomes clear that the most effective method of obtaining homogeneous layers is the Langmuir-Blodgett technique. However, the technique is the most difficult to use, low-productivity and impossible to produce on an industrial scale. At the same time, the technique of simple dripping of a solution of nanoparticles on the substrate surface is the simplest and most effective, which allows to obtain ordered mono - and disordered multilayer LF, with the correct selection of their concentration in solution. The disadvantage is the incomplete filling of the surface. Separately, we highlight the method of spin - coating. Due to its relative simplicity, depending on the parameters used (NP concentration and rotation speed), it is possible to obtain structures of completely different types, with different distribution on the substrate. However, we were not able to obtain a homogeneous layer of nanoparticles, because, even at low concentrations of NP in solution, the formation of clusters of different sizes (clusters) was observed.

Keywords: asymmetric systems, solid solution, nanoparticles, TKO, GMO, MOKE.

List of applicant's publications

Scientific works in which the main results are published

1. Formation of Ordered Magnetic Nanoparticles Arrays Using Various Obtaining Techniques / **Bezdidko O. V.**, Cheshko I. V., Kostiuk D. M., Protsenko S. I. // J. Nano- Electron. Phys. V.11, № 3, P. 03037-1-03037-5 (2019). – **Q3** (*Personal Contribution – performing the experiment, writing the article text*).

2. Electrical Conductivity and Magnetoresistive Properties of Film Alloys Based on Permalloy $\text{Fe}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}$ and Copper / **Bezdidko O.V.**, Shkurdoda Yu.O., Shpetnyi I.O., // J. Nano- Electron. Phys. 12 № 3, P. 03034-1-03034-4 (2020). – **Q3** (*Personal Contribution – assistance in processing experimental data and preparing the text of the article*).

3. Magneto-Optical Properties of Two – Layer Film Systems Based on Fe And Cr / Bezdidko O. V., Shkurdoda Yu.O, Fedchenko O., Cheshko I. V., Protsenko S. I. // Int. J. of Mod. Ph. B 34 №27, P. 2050251-1-2050251-8 (2020). – **Q4** (*Особистий внесок – processing of experimental data and preparing the text of the article*).

4. Structure and magnetoresistive properties of three-layer films (Co - Cr) / Cu / Co / Bezdidko O.V., Nepijko S.O., Shkurdoda Yu. O., Shabelnyk Yu. M. // J. Nano- Electron. Phys. 13 № 3, P. 03042-1-03042-4 (2021). – **Q3** (*assistance in processing experimental data and preparing the text of the article*).

5. Magneto-optical properties of two – layer film systems based on Fe and Pt Bezdidko O.V., Shkurdoda Yu. O., Vashchenko S. M. // Physics and Chemistry of Solid State 22 №2, P.242-247(2021). **Q4** – (*Personal Contribution – performing the experiment, writing the article text*).

Scientific works of approbation character

6. **Bezdidko O. V.**, Kostiuk D. M., Cheshko I. V., Protsenko S. I. Formation of Co / Cu / NiFe_2O_4 (Nanoparticles) Spin-Valve Type Functional Elements, International Conference Nanomaterials: Applications and Properties 2019, September 9-14, 2018, Odesa, Ukraine. (*Personal Contribution – performing the experiment, writing the article text*).

7. **Bezdidko O. V.**, Shumakova M.O., Cheshko I. V., Protsenko S. I. Investigation of the Structure and Thermal Stability of NiFe_2O_4 Nanoparticles Monolayers, Electronics and Informational Technologies, August 30 – September 2, 2018, Ukraine. (*Personal Contribution – processing of experimental data and preparing the text of the article*).

8. Shkurdoda Yu.O, **Bezdidko O. V.**, Shabelnyk Yu. M., Chornous A.M., Dekhtyaruk L.V., Kharchenko A. P. Giant Magnetoresistive Effect in a Magnetically Ordered Fe₂₀Ni₈₀/Cu/Co Sandwich, International Conference Nanomaterials: Applications and Properties 2020, November 9-13, 2020, Sumy, Ukraine. (*Personal contribution – assistance in processing experimental data and preparing the text of the article*).

9. **Bezdidko O. V.**, Cheshko I. V., Protsenko S. I. Investigation of the Structure and Thermal Stability of NiFe₂O₄ Nanoparticles Monolayers, International Conference Nanomaterials: Applications and Properties 2019, September 15-20, 2019, Odesa, Ukraine. (*Personal Contribution – processing of experimental data and preparing the text of the short thesis*).

10. **Bezdidko O. V.**, Cheshko I. V., Protsenko S. I. Magneto-Optical Properties of Film Systems Based on Fe and Cr, Ion Implantation and Other Applications of Ions and Electrons, June 18-21, 2018, Kazimierz Dolny, Poland. (*Personal Contribution – processing of experimental data and preparing the text of the short thesis*).

11. **Bezdidko O. V.**, Protsenko S. I. Magnetoresistive Properties of Iron Oxide Nanoparticles Arrays in Conducting Matrix, LIV Zakopane School of Physics International Symposium, May 21-25, 2019, Zakopane, Poland. (*Personal Contribution – processing of experimental data and preparing the text of the short thesis*).

12. **Bezdidko O. V.**, Cheshko I. V., Protsenko S. I. Formation of Ordered Magnetic Nanoparticles Arrays Using Various Obtaining Techniques, XVII International Freik Conference on physics and technology of thin films and nanosystems, May 20 - 25, 2019, Ivano-Frankivsk, Ukraine. (*Personal Contribution – processing of experimental data and preparing the text of the short thesis*).

13. **Бездідько О.В.**, Кучменко Д.М. Особливості польових залежностей магнітоопору тришарових плівок Co/Cu/Co_xCr_{1-x}/Π, Матеріали міжнародної конференції ФЕЕ-2020, Суми, Україна, 2020.

(Personal Contribution – processing of experimental data and preparing the text of the short thesis).

14. **Bezdidko O.V.**, Kulak A.S., Shabelnyk Yu. M., Shkurdoda Yu. O., Protsenko S.I. Structural, Electrophysical and Magnetoresistive Properties of Superparamagnetic Particles Placed in a Silver Matrix, Condensed Matter & Low temperature Physics 2020, June 8 – 14, 2020, Kharkiv, Ukraine. *(Personal Contribution – processing of experimental data and preparing the text of the short thesis).*

15. **Bezdidko O.**, Shkurdoda Yu.O., Shabelnyk Yu. M., Protsenko S.I., Tkach O.P., Kosenko O.S. Magneto-optical properties of bilayer film systems based on Fe and Pt, 8-th International Conference on Nanotechnologies and Nanomaterials, August 26 – 29, 2020, Lviv, Ukraine. *(Personal Contribution – processing of experimental data and preparing the text of the short thesis).*

Scientific works that additionally show the result

16. Formation of ordered multilayered arrays of magnetic nanoparticles CoFe_2O_4 , Cheshko I.V., Bezdidko O.V., Logvynov A.M., Protsenko S.I. // J. Nano- Electron. Phys. 9 № 6, 2017. *(Personal Contribution – help in processing of experimental data).*