

Формування структури, магнітних властивостей нанорозмірних плівок FePt(Pd) водневою термообробкою для магнітного запису інформації підвищеної щільності
The formation of structure, magnetic properties of nanoscale FePt(Pd) films by hydrogen heat treatment for information magnetic recording of a high density

1. 0119U000120, «КПІ ім. Ігоря Сікорського» - 2202-ф.
2. Науковий керівник (вчений ступінь, звання) д.т.н., проф. Макогон Юрій Миколайович, Prof. Makogon Iurii Mykolayovich

3. Суть розробки, основні результати.
(укр.)

Створені наукові засади прискореного формування нанорозмірних, термічно стабільних плівок на основі FePd, FePt з магнітно-твердою фазою L1₀ для застосування в якості середовища магнітного запису підвищеної щільності. Було оцінено і враховано вплив хімічного і механічного факторів водневого впливу на фазовий склад і структуру, а також фізичного фактору впливу на електронну структуру нанорозмірних плівок на основі FePt і FePd, легованих Au, Ag, Cu, та на їх магнітні властивості. Це дало можливість запропонувати новий науковий підхід щодо застосування водневої термообробки в нанорозмірних плівках на основі FePt(Pd) для обмеження небажаного впливу нанорозмірного фактору, що уповільнює упорядкування зі зменшенням товщини. Відпал у водні прискорює процеси дифузійного формування термостабільних, нанорозмірних, магнітно-твердих плівок FePt та FePd.

Розроблено практичні рекомендації щодо застосування відпалу у водні для керування кінетикою і ступенем упорядкування при дифузійних процесах формування магнітно-твердої фази L1₀ з необхідною орієнтацією кристалічної ґратки з віссю легкого намагнічування с перпендикулярно, або паралельно площині плівки, великою енергією магнітокристалічної анізотропії та потрібними магнітними властивостями H_c, M_s, M_r. Застосування цих плівок в якості середовища магнітного запису дозволить підвищити щільність магнітного запису та стабільність зберігання інформації термоактивованим методом

(англ.)

The scientific foundations for the accelerated formation of nanoscale, thermally stable films based on FePd, FePt with a magnetic-hard L1₀ phase for use as a medium of high-density magnetisc recording have been created. The influence of the chemical and mechanical factor of hydrogen action on the phase composition and structure, as well as the physical factor of the effect on the electronic structure of nanoscale films based on FePt and FePd doped with Au, Ag, Cu, and their magnetic properties was estimated and taken into account. This made it possible to propose a new scientific approach to the use of hydrogen heat treatment in nanoscale films based on FePt and FePd to limit the undesirable effect of the nanoscale factor, that slows down the ordering processes with decreasing of thickness and accelerate the diffusion processes formation of thermostable, nanosized, magnetically hard films based on FePt, FePd.

Practical recommendations have been developed for the use of annealing in hydrogen to control the kinetics and degree of ordering in diffusion processes of the magnetic hard L1₀ phase formation with the required orientation of the crystal lattice, with an easy c-axis magnetization perpendicular or parallel to the film plane, with high energy of magnetocrystalline anisotropy and the required magnetic properties H_c, M_s, M_r. The use of these films as a magnetic recording medium will increase the density of magnetic recording and the stability of information storage by the thermally activated method.

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

1. Шаміс М.Н., Макогон Ю.М., Вербицька Т.І., Макушко П.В., Сидоренко С.І. “Спосіб формування магнітного матеріалу на основі FePd”, патент на корисну модель №147083 (zareєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 07.04.2021).

5. Порівняння зі світовими аналогами.

Результати відповідають світовому рівню. Одержані результати і встановлені закономірності не мають аналогів в Україні. Вирішення матеріалознавчих задач при формуванні фазового складу, структури плівок FePd, FePt як середовища магнітного запису і зберігання інформації підвищеної щільності та отримані закономірності є науковою основою для розробки технології термічно активованого магнітного запису і зберігання інформації підвищеної щільності і стабільності. Запропоновані підходи та методи мають універсальний характер і можуть бути застосовані при виготовленні функціональних елементів нанoeлектроніки, нанoeлектрики.

6. Економічна привабливість для просування на ринок

Розроблено рекомендації щодо вибору технологічних параметрів прискореного процесу формування стабілізації магнітно-твердих плівок FePd, FePt, Легування цих плівок Au, Ag, Cu дає можливість пошарового розподілу фаового складу без чітких границь, що забезпечує створення магнітоградієнтних станів. Застосування яких дозволить підвищити щільність магнітного запису і надійність зберігання інформації. Запропоновані матеріалознавчі підходи та методи мають універсальний характер і можуть бути застосовані при розробці нанотехнологій виготовлення функціональних елементів нанoeлектроніки, нанoeлектрики, а також для покращення техніко-економічних показників виробництва мікроприладів різного функціонального призначення.

7. Потенційні користувачі (галузі, міністерства, відомства, підприємства, організації).

Одержані результати представляють практичний інтерес для державного підприємства «Квазар – Мікро», НДІ «ОРІОН» (розробка приладів з надвисокою щільністю запису і збереження інформації на магнітних носіях), для ВАТ “Електротехнічний завод”, „Компоненти та системи», «Мікрон» м.Київ (розробка перспективної нанотехнології отримання стабільних нанорозмірних металевих плівок з необхідними властивостями як функціональних елементів мікроприладів і подальше застосування в пристроях з великою щільністю магнітного запису і збереження інформації).

8. Стан готовності розробки

Запропоновано новий науковий підхід щодо застосування водневої термообробки для прискореного формування нанорозмірних, термічно стабільних плівок на основі FePd, FePt з магнітно-твердою фазою L1₀ як середовища магнітного запису і зберігання інформації підвищеної щільності. Надано практичні рекомендації щодо застосування відпалу у водні для керування кінетикою і ступенем упорядкування при дифузійних процесах формування магнітно-твердої фази L1₀ з необхідною орієнтацією кристалічної ґратки з віссю легкого намагнічування с перпендикулярно, або паралельно площині плівки, великою енергією магнітокристалічної анізотропії та потрібними магнітними властивостями *H_c*, *M_s*, *M_r*.

9. Існуючі результати впровадження.

Результати НДР впроваджено в навчальний процес. Створено, зареєстровано в системі Google Workspace for Education на платформі дистанційного навчання «Сікорський» та застосовується в початковому процесі 4 дистанційні курси: Структура та властивості матеріалів 2; Спеціальні фізичні методи дослідження низькорозмірних структур; Плівкові гетероструктури для комп'ютерної техніки; Фізика металів-4. Тверді розчини та динаміка кристалічної ґратки. Створено 10 лабораторних робіт для курсу

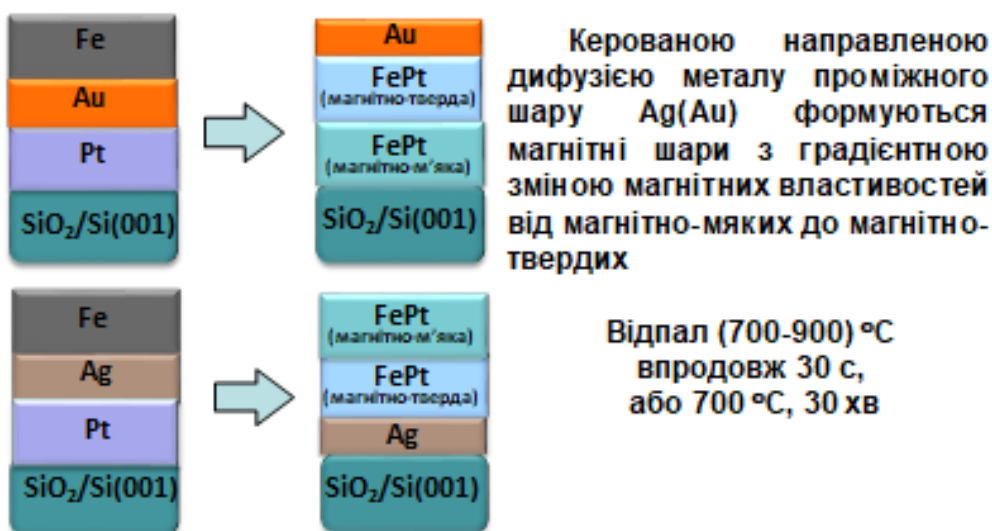
«Спеціальні фізичні методи дослідження низькорозмірних структур» та 6 практичних робіт для курсу «Фізика металів-4. Тверді розчини та динаміка кристалічної ґратки».

10. Назва підрозділу, телефон, e-mail.

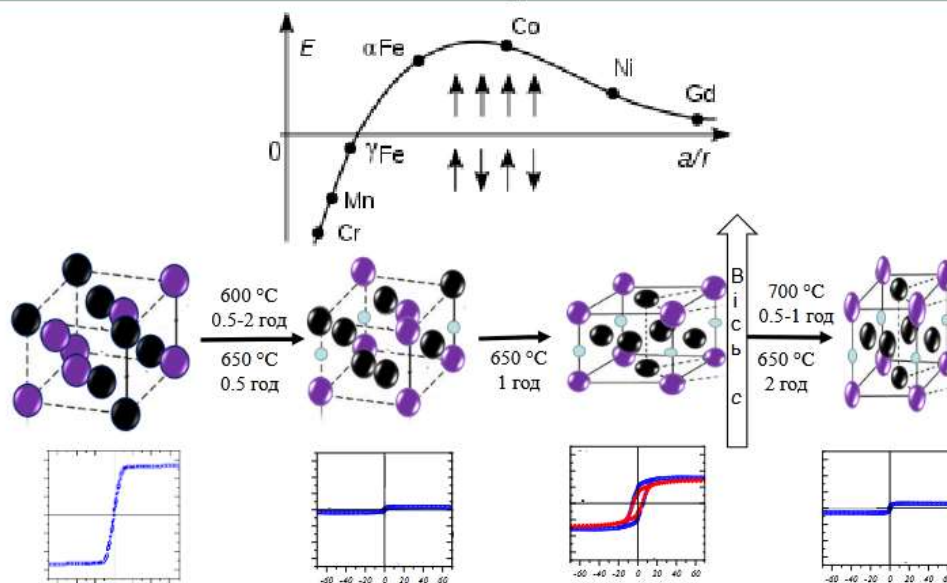
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Науково-навчальний Інститут матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона, моб. тел: 068-806-07-63 E-mail: y.makogon@kpi.ua, yurii.makogon1@gmail.com

11. Фото

Керування дифузійним переміщенням шарів Fe, Pt та Ag (або Au) в шаруватих плівках Fe/Me/Pt, де Me= Ag, Au зміною проміжного шару металу



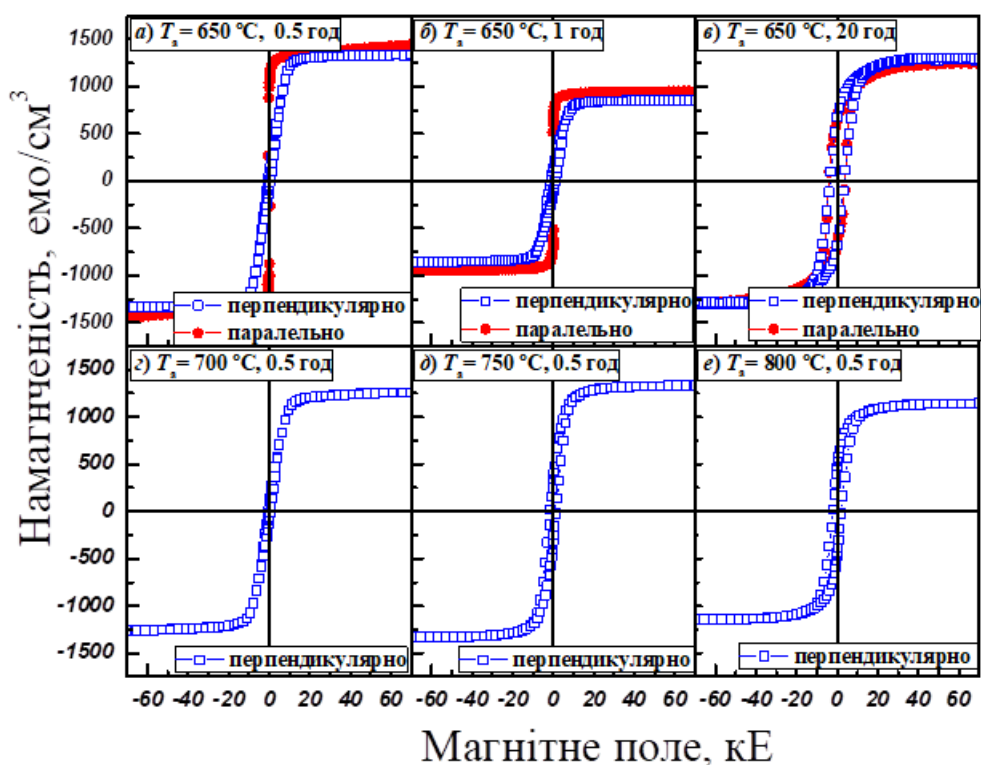
Зміна структури і магнітних властивостей плівок FePd при відпалі у водні



Крива Бете-Слейтера — залежність енергії обмінної взаємодії від відношення міжатомної відстані до радіусу 3d-оболонки перехідних металів, що ілюструє, які з них є феромагнетиками, а які антиферомагнетиками.

Показано, як шляхом зміни температури і часу відпалу у водні можна змінювати магнітні стани при формуванні впорядкованої фази $L1_0$ -FePd у плівках FePd-Me: магнітно-м'який → парамагнітний або суперпарамагнітний → магнітно-твердий → суперпарамагнітний. Зміна магнітних станів та магнітних властивостей плівок $Fe_{50}Pd_{50}$ при відпалі у водні (порівняно з відпалом у вакуумі) можна пояснити зміною наступних факторів – температури відпалу та концентрації втілених атомів водню в плівку. Відпал осадженої плівки $Fe_{50}Pd_{50}$ викликає активізацію дифузійних процесів упорядкування та супроводжується втіленням атомів водню в плівку. У неупорядкованій фазі $A1$ -FePd збільшення концентрації H призводить до збільшення об'єму елементарної комірки та ослаблення атомних зв'язків, що супроводжується прискоренням процесу упорядкування. Одночасно зі збільшенням температури, часу відпалу змінюється електронна структура плівки.

Зміна магнітних властивостей при відпалі у вакуумі



12. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання

Опубліковано у закордонних видавництвах 1 монографію та 1 розділ монографії; опубліковано 10 статей (у тому числі 4 – зі студентами) в журналах, що входять до наукометричних баз даних Scopus, з них 5 – у міжнародних виданнях, 3- у фахових виданнях, 2 у матеріалах конференцій), 1 підручник. Захищено 1 кандидатську дисертацію і підготовлено до захисту 1 дисертацію доктора філософії; зроблено 9 доповідей на 8 міжнародних конференціях (з них 8– англомовних, 6 - со студентами), одержано 1 патент корисну модель України. Захищено 6 магістерських робіт та 3 дипломних бакалаврських робіт.

Монографії

1. Makogon Yu.M., Shkarban R.A Sidorenko S.I., «Nanoscale thermoelectric films based on $CoSb_3$ skutterudite». LAP LAMBERT Academic Publishing. – 2019. – 160 с.

2. Makushko P., Shamis, M., Verbytska T. , Sidorenko S., Makogon Iu. Effect of Au Layers on A1→L1o Phase Transition and Magnetic Properties of FePt Thin Films. Розділ монографії: NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics. Springer, 2020. P. 95-117.

Підручник

Вербицька Т.І., Макогон Ю.М. Плівкові гетероструктури для комп'ютерної техніки [Текст]: Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів галузі знань 13 – Механічна інженерія спеціальності 132 – Матеріалознавство денної та заочної форм навчання / Т.І. Вербицька, Ю.М. Макогон. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2020. – 166 с.

<https://classroom.google.com/u/0/c/MTgzMjM1MDM3MDc4>.

Статі у закордонних виданнях (в базі даних Scopus) :

1. Makushko P.V., Verbytska M.Yu., Shamis M.N., Burmak A.P. Berezniak Ya. A., Graivoronska K.A., Verbytska T.I., Makogon Yu.N. Formation of Phases in the FePt/Au/FePt Films and their Magnetic Properties. Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2019. Vol. 58. Issue 3-4. P. 197-203. Scopus, Q2.
2. P.V. Makushko, M.Yu. Verbytska, M.N. Shamis, T.I. Verbytska, G. Beddies, N.Y. Safonova, M. Albrecht & Iu. M. Makogon Effect of initial stress/strain state on the L1o phase formation of FePt in FePt/Au/FePt trilayers. Applied Nanoscience. Vol. 10, issue 8. pages 2775–2780 (2020). Scopus, Q2.
3. Makushko P.V., Shamis M.N., Schmidt N.Y., Kotenko I.E., Katona G.L., Verbytska T.I., Beke D.L., Albrecht M., Makogon Iu.M. Formation of ordered L1o-FePt phase in FePt-Ag thin films. Applied Nanoscience. Vol. 10, issue 12, Pages 4809–4816 (2020). Scopus, Q2.
4. M.N. Shamis, T.I. Verbitska, S. I. Sidorenko, G Beddies, N. Y. Safonova, M. Albrecht and Yu. N. Makogon «L1o phase formation in FePd thin films induced by H₂ during annealing». Applied Nanoscience (2021), p. (1-7). <https://doi.org/10.1007/s13204-021-01809-4>. Scopus, Q2.
5. Shamis M.N., Makushko P.V., Verbytska T.I., Sidorenko S.I., Makogon Y.N. (2020) Influence of Hydrogen Annealing on Ordering in FePd Films with Ag Underlayer. In: Pogrebnjak A., Bondar O. (eds) Microstructure and Properties of Micro- and Nanoscale Materials, Films, and Coatings (NAP 2019) Springer Proceedings in Physics, vol. 240. Springer, Singapore. P. 367-377. Print ISBN 978-981-15-1741-9.

Статті у фахових виданнях, що входять до наукометричних БД Scopus:

1. Макушко П.В., Вербицька М.Ю., Шаміс М.Н., Бурмак А.П., Березняк Я.А., Грайворонська К.А., Вербицька Т.І., Макогон Ю.Н. Фазоутворення і магнітні властивості у плівках FePt/Au/FePt . ISSN 0032-4795, Порошкова металургія № 3/4. 2019, С. 95-103. Scopus, Q4
2. Круглов О., Могилко В.В., Владимирський І.А., Макогон Ю.М., Васильєв М.О., Сидоренко С.І., Волошко С.М. Вплив атмосфери відпалу на магнітні властивості нанорозмірних плівок стопу FePt. Металофізика та новітні технології. 2019. Vol. 41, No. 2. P. 157–171. Scopus, Q3.
3. М.Н. Шаміс, П.В. Макушко, І.Д. Беседін, Я.О. Березняк, К.О. Грайворонська, Т.І. Вербицька, Ю.М. Макогон «Формування фазового складу і магнітні властивості в надтонких плівках FePd-Au при відпалах у вакуумі та водні». Металофізика та новітні технології. 2021, т. 43, №. 4, с. 505-517. Scopus, Q3

Статті у матеріалах конференцій, що індексуються наукометричними базами даних Scopus

1. Shamis M.N., Verbytska M.Yu., Bezsmertna O.S., Burmak A.P., Sidorenko S.I., Verbytska T.I., Makogon Yu.M. Formation of hard magnetic L1o Phase in [Pt/Fe]₄ Films on SiO₂/Si(001) and Al₂O₃ Substrates. Conference Proceeding of IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2019). Київ, Україна. 2019. P. 278-281.
2. Shamis M.N., Makushko P.V., Verbytska T.I., Makogon Iu.N. Influence of hydrogen annealing on ordering in FePd films with Ag underlayer / Prosidings of the 2019 IEEE 9h International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties (NAP- 2019) Part 1 ISBN 978-1-7281-2830-6, Odesa, Ukraine, September 15–20, 2019, Sumy, Sumy State University, 2019, P. 01TFC30.

Захищена 1 кандидатська дисертація та підготовлена 1 дисертація доктора філософії.

Кандидатська дисертація Вербицької М.Ю. «Фазовий склад, структура і магнітні властивості нанорозмірних плівкових композицій FePt з додатковими шарами Au» (науковий керівник д.т.н. проф. Макогон Ю.М.), Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2019. Захист відбувся 03.12.2019 р.

Англомовні тези доповідей у матеріалах міжнародних конференцій, що індексуються наукометричними базами даних Scopus

1. Makushko P.V., Fihurna O.V., Shamis M.N., Safonova N.Y., Kotenko I.E., Verbytska T.I., Albrecht M., Makogon Iu.M. Formation of ordered L1o-FePt phase in FePt-Ag thin films// Міжнародна конференція Nanotechnology and nanomaterials (НАНО-2019), м. Львів, 27 -30 серпня 2019 р., Україна, С. 42-43.
2. Makushko P.V., Shamis M.N., Verbytska T.I., Makogon Yu.N. The L1o FePd ordered phase formation in ultrathin FePd films at annealing in H₂ atmosphere Збірник тез доповідей 8th International Conference —Nanotechnologies and Nanomaterials| NANO-2020, 26.08.20 — 29.08.20, Lviv, Ukraine. 2020 р., Львів, Україна. P. 113.
3. Gabor Katona, Pavlo Makushko, Natalia Schmidt, Tetiana Verbytska, Gunter Beddies, Dezso Beke, Manfred Albrecht, Iurii Makogon Formation of the L1o FePt phase in Pt/Ag(Au)/Fe and Fe/Ag(Au)/Pt trilayers // 11th International Conference on Diffusion in Materials (DIMAT), 05.07.20 - 10.07.20, Debrecen, Hungary.
4. Makushko P.V., Shamis M.N., Kotenko I.E., Schmidt N.Y. Verbytska T.I., Makogon Iu.M. «Formation of the ordered L1o FePt phase in FePt films with an additional Au layer on and without substrates» на 9-ту міжнародну конференцію «Нанотехнології та наноматеріали» (НАНО-2021), 25-28 серпня 2021 р., Львів, Україна. С. 48.
5. Verbytska T.I., Shamis, M.N., Makushko P.V., Kotenko I.E., Sidorenko S.I., Melnyk A., Trachevskii V.V., Makogon Yu.N. Formation of L1o phase in FePd(5 nm) films during vacuum and hydrogen annealing. // VII Міжнародна матеріалознавча конференція HighMatTech-2021, 5-7 жовтня 2021 р. Київ, Україна. С.81.

Англомовні тези доповідей у матеріалах міжнародних конференцій

6. M.N. Shamis, P.V. Makushko, T.I. Verbytska, S.I. Sidorenko, G. Beddies, N.Y. Safonova, M. Albrecht, and Yu. N. Makogon Effect of annealing atmosphere on phase formation processes in FePd/Au thin films // Міжнародна наукова конференція E-MRS- 2019 Fall Meeting 17th-20th September, Warsaw University of Technology, 2019, Poland.
7. M.N. Shamis, P.V. Makushko, T.I. Verbytska, S.I. Sidorenko, G. Beddies, N.Y. Safonova, M. Albrecht, and Yu. N. Makogon Influence of Cu underlayer on phase

formation, structure and magnetic properties of FePd/Cu thin films // Spring Meeting of the European Materials Research Society (E-MRS- 2019) 27th-31th May, 2019, Nitca, France.

Тези доповідей у матеріалах міжнародних конференцій України

8. Шаміс М.Н., Макушко П.В., Вербицька Т.І., Макогон Ю.М. Формування упорядкованої фази $L1_0$ FePt у багатошарових плівках [FePt/Au/FePt] $_n$ на підкладці SiO₂/Si(001) // XII Міжнародної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ НА ОСНОВІ НОВІТНІХ ФІЗИКО- МАТЕРІАЛОЗНАВЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА КОМП'ЮТЕРНОГО КОНСТРУЮВАННЯ МАТЕРІАЛІВ, 18 - 19 квітня 2019 р., Київ, Україна, С.
13. **ВПОРЯДКОВАНА ФАЗА $L1_0$ -FePt, $L1_0$ -FePd, НАНОРОЗМІРНІ ПЛІВКИ, ВІДПАЛ У ВОДНІ, ФАЗОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ, МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ**