

Р.А. Пеленський

## Магнітні властивості наноструктур

*Інститут енергетики та систем керування  
Національного університету "Львівська політехніка" вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна*

В статті розглянено питання моделювання процесів у наносередовищах з урахуванням властивостей спінового континууму плівки. За рахунок магнітного впорядкування у приповерхневому шарі плівки утворюється подвійний шар магнітних зарядів, який розглянено в наближенні доменної стінки наноструктури.

**Ключові слова:** наносередовища, подвійні шари магнітних зарядів.

*Стаття поступила до редакції 07.04.2008; прийнята до друку 15.09.2009.*

### Вступ

Математичне моделювання процесів у наноструктурах є надзвичайно актуальною проблемою, - нанопристрої спочатку повинні бути розраховані і шляхом математичного експерименту дослідженні їх характеристики, а вже після завершення цього етапу – виготовлені і шляхом фізичного експерименту досліджено їх реальні вихідні характеристики.

Дослідженнями процесів у надтонких плівках займаються тривалий час, набуто певного досвіду і в моделюванні процесів струмопротікання у цих плівках. Але загальним недоліком розроблених моделей є недостатнє висвітлення поведінки спінового континууму в наносередовищах.

Метою даних досліджень є спроба врахування магнітних явищ, що відбуваються в приповерхневих шарах наноплівки та їх вплив електричний та магнітний опір плівок.

### I. Наноманітні явища в надтонких плівках

Магнітні властивості феромагнетика в основному визначаються спіновими магнітними моментами електронів, які завдяки обмінним силам примушують їх орієнтуватися паралельно один одному. Ці сили мають квантову природу.

Властивості великогабаритних феромагнітних виробів визначаються станом впорядкованості їх магнітних доменів, розміри яких мають порядок  $10^{-5} - 10^{-4}$  м.

Нанотонким плівкам притаманні особливі

ефекти, які можна охарактеризувати як явища наноманітзму. У надтонкій плівці, виготовленій з неферомагнітного матеріалу, приповерхневий шар може поводитись як феромагнетик, що має поверхневий магнітний заряд і магнітне поле, яке оповиває наноструктуру.

Беззатратні обертальні властивості мікрочастинок в об'єктах живої і неживої Природи приводять до наділення їх власними магнітними моментами. У протонів і нейтронів ці власні магнітні моменти на три порядки менші, ніж в електронів, магнітні моменти атомів і молекул в основному визначаються магнітними моментами електронів. На молекулярному рівні існує складна система магнітних полів, відповідальних за перебіг хімічних реакцій, каталізу, кінетики процесів, за обмін речовин. Людський мозок є генератором магнітних полів. Магнітні нанoeлементи такі як кристали  $Fe_3O_4$  зумовлюють феноменальну просторову орієнтацію у бджіл і голубів. Обертальний магнітний момент (спіновий момент) електронів водню становить  $9,35 \cdot 10^{-24} \text{ А} \cdot \text{м}^2$ .

Окремі шари наноструктур оповиті магнітними полями, утвореними у подвійних шарах магнітних зарядів. Для розрахунку і дослідження цих полів теорії електромагнетизму, створеної Дж. К. Максвелом, недостатньо. Класична електродинаміка повинна бути доповнена суто квантовими явищами: явищами захоплення магнітних зарядів на поверхневі магнітні рівні, а також контактними і поверхневими явищами для електричних носіїв заряду. Тобто, для носіїв манітзму і електрики крім їхніх зарядів потрібна ще й інформація про їх енергетичний стан. Якщо деякі із зарядів, що утворюють подвійний шар зарядів, відходять від своєї діонної пари, наприклад, у випадку, коли забирається інформація з магнітного

чи електричного носія інформації, яким являється подвійний шар зарядів, енергія локальної області структури зменшується і випромінюється мікрочастинка – фотон. Фотон розповсюджується як плоска електромагнітна хвиля. Фотон – ще одна дійова складова, присутня у математичних моделях процесів, що протікають у наноструктурах. Її важливість надзвичайно висока. На нашу думку, саме такі оптичні зв'язки працюють у корі нашого головного мозку. Саме так зв'язані  $10^{10}$  нейронів між собою і з іншими ланками людського організму.

В процесах, що протікають у наноструктурах з розмірами  $1 \div 100$  нанометрів, виняткову роль відіграє поверхня. З розривами атомних зв'язків пов'язане утворення поверхневих магнітних рівнів, на які захоплюються кванти магнетизму. У плівці розміщується діонна пара, захопленою поверхнею магнітного монополя. Таким чином, поверхня плівки стає магнітним листком захоплених поверхневих зарядів, а приповерхнева область – областю розподіленого магнітного заряду.

Аналогічним чином утворюється приповерхневий подвійний шар електричних зарядів. Через розриви атомних зв'язків утворюються поверхневі електронні стани (рівні Тамма, рівні Шоклі), які розташовані на електричній діаграмі нижче від енергетичних рівнів у плівці. Тому частина вільних електронів переходить на ці рівні, утворюючи поверхневий електричний заряд – електричний листок, і індуючи в плівці заряд протилежного знаку. Утворюється подвійний шар електричних зарядів, електричне поле якого також оповиває наноплівку. Цей подвійний електричний шар зарядів також виконує функцію носія інформації.

Згідно досліджень, проведених С. Тікадзумі [1,2] енергія кулоновської взаємодії між одиничними електричними зарядами ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл) становить  $2,1 \cdot 10^{-8}$  Дж. Тобто, виходячи з виразу для енергії взаємодії між зарядами

$$We = \frac{e^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} \quad (1)$$

для матеріалу з відносною діелектричною проникністю  $\epsilon = 64$  отримуємо віддаль між електричними листками подвійного електричного шару зарядів порядку  $10^{-6}$  м. Магнітно-дипольна взаємодія. Згідно цих же досліджень [1,2] в  $10^5$  разів менша. Тобто, для магнітної плівки з відносною магнітною проникністю  $\mu = 10^4$  на основі аналогічного виразу для магнітних зарядів

$$W_m = \frac{\Phi_0^2}{4\pi\mu\mu_0 r^2} \quad (2)$$

отримуємо віддаль між магнітними листками приповерхневого магнітного шару зарядів порядку  $10^{-8}$  м.

## II. Розподіл магнітних моментів у наноструктурах.

Через розриви атомних зв'язків на поверхні збурюється спіновий континуум, з'являється некомпенсований магнітний момент, магнітні монополі певної полярності захоплюються на поверхневі магнітні рівні. В товщі плівки наночастинки, які створюють власні магнітні поля, на порядки вищі від магнітних полів мікрочастинок сталей, пермалоїв, об'єднуються у пари з протилежно скерованими магнітними моментами. У цієї діонної пари результуючий магнітний момент зникло малий. Середина плівки не намагнічена. На поверхні плівки магнітні наночастинки розміщені таким чином, що їхні магнітні моменти паралельні. Цей ефект відкритий Хундом у 1927 році. Пояснюється він тим, що така структура забезпечує мінімум енергії локальної області. Приповерхневі шари наноплівок створюють сильні магнітні поля.

Середовище наноплівок – це особлива форма матерії. У приповерхневих шарах якої розподілені сильні електричні і магнітні поля, які обмежують процеси протікання струму і магнітного потоку в поздовжньому напрямку плівки.

З вищенаведеного випливає, що у виокремленій наноплівці напрями спінів (магнітних моментів) розміщені наступним чином:

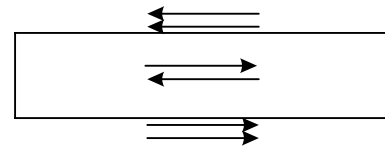


Рис. 1. Розташування спінів у наноплівці.

Тобто, на поверхнях плівки – вони паралельні, в центрі – антипаралельні.

У феромагнітному середовищі у стані намагніченості зразка спіни розташовані наступним чином:

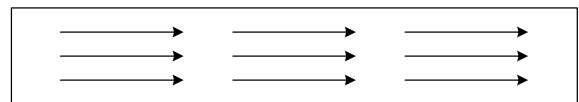


Рис. 2. Розташування спінів у намагніченому феромагнетіку.

У антиферомагнітному середовищі ця картинка набуває вигляду:

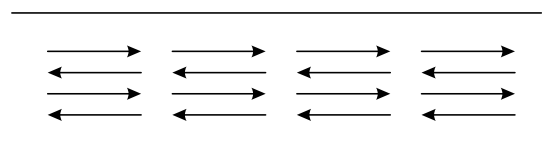


Рис. 3. Спіни антиферомагнетика.

Подвійний шар магнітних зарядів приповерхневої області наноструктури – це її

доменна стінка. Під дією напруженості зовнішнього магнітного поля відбуваються зміни положення доменної стінки. На стінку діє сила

$$F = H \Delta M \quad (3)$$

де  $\Delta M$  – різниця намагнічуваностей. Динаміка руху стінки може бути описана рівнянням:

$$m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = H \Delta M \quad (4)$$

Коллективний рух спінів – це спінові хвилі. У наноплівках можливі стоячі спінові хвилі. Порушення спінового порядку, зумовлене відхиленням спіна від положення рівноваги – причина появи спінових хвиль. Основне рівняння руху спіна у ферромагнітному середовищі – рівняння Ландау-Ліфшица [3]:

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = -\gamma [\bar{M} \bar{H} e] \quad (5)$$

Збурення спінового порядку приводить до появи нескомпенсованого магнітного моменту. Згідно правила Хунда [3] нескомпенсовані моменти на поверхні наноплівки додаються. Нескомпенсований момент локальної області поверхні спричинює захоплення магнітного монополя на поверхневий магнітний рівень, тобто, магнітні монополі мають право на існування в приповерхневих шарах наноплівки. У плівковому середовищі виявляється магнітний монополі зворотної полярності. Для врахування обох типів джерел магнітного поля – магнітних монополів і кільцевих струмів придатна симетрична система рівнянь електродинаміки [4].

Захоплення вільних електронів на поверхневі електронні стани з індукуванням у плівковому середовищі розподіленого об'ємного заряду зворотнього знаку приводить до утворення подвійних електричних шарів зарядів. Їхнє електричне поле також оповиває наноструктуру.

Магнітні і електричні поля наноструктур взаємопов'язані:

$$\bar{E} = -\nabla \varphi - \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} + [\bar{V}_m \bar{B}] \quad (6)$$

$$\bar{B} = [\nabla \bar{A}] - \frac{I}{c^2} [\bar{V}_e \bar{E}] - \mu_a \nabla \varphi_M \quad (7)$$

де  $\bar{E}$  – вектор напруженості електричного поля,  $\bar{B}$  – вектор магнітної індукції,  $\bar{V}_m$  та  $\bar{V}_e$  – вектори швидкостей руху магнітних та електричних зарядів,  $\varphi_M$  та  $\varphi$  – потенціали скалярного магнітного і електричного полів,  $c$  – швидкість світла,  $\mu_a$  –

абсолютна магнітна проникність плівки.

Розрахунок динаміки електромагнітних процесів у наноплівкових середовищах здійснюється на основі симетричної системи рівнянь електромагнітного поля:

$$[\nabla \bar{H}] = \bar{\delta}_e + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}, \quad (8)$$

$$[\Delta \bar{E}] = -\bar{\delta}_M - \frac{\partial \bar{B}}{\partial t}, \quad (9)$$

$$(\Delta \bar{B}) = \rho_M, \quad (10)$$

$$(\Delta \bar{D}) = \rho_e. \quad (11)$$

де  $\bar{H}$  – вектор напруженості магнітного поля,  $\bar{D}$  – вектор зміщення,  $\bar{\delta}_e$  та  $\bar{\delta}_M$  – густини електричного та магнітного струмів відповідно,  $\rho_M$  та  $\rho_e$  – густини розподілених у наносередовищі магнітних та електричних зарядів.

Розміри діючих магнітних та електричних пар співрозмірні з товщиною плівки. Внаслідок того, що напруженості внутрішніх магнітних та електричних шарів подвійних шарів зарядів на порядки вищі від напруженостей у поздовжньому напрямку плівки, магнітний потік у цьому напрямку має знамено малі значення, а магнітний опір плівки – велетенський.

Маленькі зміни магнітного поля приводять до значної зміни електричного опору системи. Ефект велетенського магнітного опору знайшов практичне застосування [5] при випуску жорстких комп'ютерних дисків. Їхня ємність збільшилася, розміри зменшилися.

## Висновки

1. На основі поєднання квантових поверхневих ефектів з теорією електромагнітного поля вдається створити математичні моделі процесів створення та перебудови подвійних шарів магнітних зарядів у приповерхневих шарах наноструктур.

2. Доменні стінки наноплівки можна представити як подвійні шари зарядів і досліджувати статичні явища і динамічні процеси в них.

Внаслідок співрозмірності доменних стінок з товщинами наноплівки виникають нові ефекти, властиві тільки наноплівкам.

- [1] С. Тикадзуми. *Фізика ферромагнетизма. Магнітні властивості речовини*. Мир, М. 302 с. (1983).
- [2] С. Тикадзуми *Фізика ферромагнетизма. Магнітні характеристики практичні застосування*. Мир, М. 419 с. (1987).
- [3] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Теоретична фізика. Т.3. Квантова механіка*. Наука, М. 767 с. (1989).
- [4] Р.А. Пеленський. Симетрична система рівнянь електродинаміки. // *Вісн. НУ "Львівська політехніка"* (587), сс.75-80 (2007).
- [5] E.Y. Tsymbal, D.G. Pettifor. *Perspectives of Gigant Magnetoresistance. Solid State Physics*, ed. by Ehrenreich H. and Spaepen F. v. 56 (2001) .-pp.113-237.

R.A. Pelenskiy

## **Magnetic Properties of Nanostructure**

*Institute of energy and control the system  
the National university "Lvov polytechnika" Lviv, 79013, Ukraine*

In the article are shown question of design of processes in nanomaterials taking into account properties of spin continuum of films. Due to the magnetic equipping with modern amenities the double layer of magnetic charges appears in the surface layer of films, what shown in approaching of blast-furnace wall of nanostructure.