

УДК 621.382

## СТАН ТЕОРІЇ Й ТЕХНІКИ НАНОМАГНЕТИЗМУ

Р. Пеленський

*Національний університет "Львівська політехніка"  
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна*

Проаналізовано стан розвитку теорії для математичного моделювання процесів у наномагнітних елементах технічних пристроїв та в біоелементах. Розглянуто сучасні технології та технічні можливості виготовлення наномагнітних елементів і пристроїв.

*Ключові слова:* наномагнітні елементи та структури.

Магнітні явища в елементах і структурах виявляються вже на нанорівні. Наномагнітні елементи можна створювати шляхом розмелення матеріалів за допомогою спеціальних млинів або шляхом вирощування їх колоїдно-хімічними методами.

Магнітні наноелементи досить поширені в природі. Їхня наявність у головах бджіл і голубів надає комахам і птахам феноменальної просторової орієнтації. Наноелементи можна виділити зі спіралей ДНК, графітових нанотрубок, їх можна створити штучно для потреб інформатики як надмініатюрний запам'ятовувальний пристрій.

**Наномagnetизм.** На одному нанометрі довжини може бути розміщено чотири атоми Fe. Між атомами виникнуть сили міжмолекулярної атомної взаємодії. Залежно від віддалі між атомами міцність отриманої структури буде дуже різною (рис. 1).

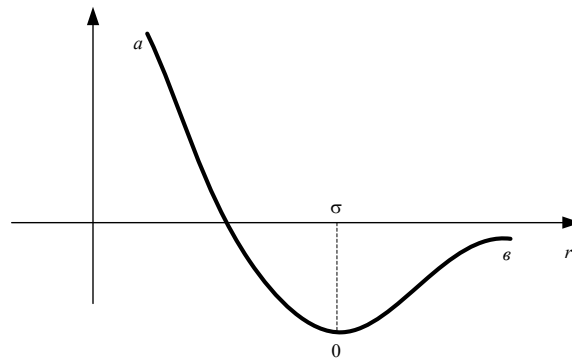


Рис. 1. Графік відштовхування та притягання між атомами в функції міжатомних віддалей.

На віддалях, менших від характеристичної віддалі  $\sigma$ , між атомами діють сили

відштовхування, на віддальх понад  $\sigma$  – сили притягання.

У сучасних теоріях [1–3] переважно фіксують зниження рівня приповерхневих сил зі зменшенням товщини наноплівки.

Технологія досягла рівня створення надміцних наноструктур – у 10-100 разів міцніших, ніж сталі, алмазоподібні структури навіть у 1 000 разів перевищують міцність сталей.

З колоїдних розчинів можна отримувати феронаночастинки  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  розміром 46 нм [5]. Полімер мінеральні наночастинки мають геометричні розміри 70–150 нм, 20–30 нм – синтезовані методом хімічної конденсації з водних розчинів солей феруму (II) та в лужному середовищі (III).

З газової фази можна отримувати кульки розміром близько 2 нм, плазмохімічні методи також придатні для вирощування феронаномігнітних елементів. У каталізі використовують наночастинки 1,5–1,8 нм, Ші Тон Лі створив нановолокно діаметром 1,3 нм.

Наномігнітні елементи в мозку створюють терагерцове випромінювання. Довжина випромінюваної хвилі

$$\lambda \leq \frac{1240}{A} \text{ нм}, \quad (1)$$

де  $A$  – робота виходу електрона,

$$h\nu = A + \frac{m_e v^2}{2}. \quad (2)$$

Визначення квантових властивостей випромінювання потребує інформації про заряд, масу та спіні елементарної частинки, тобто про електромагнітне і гравітаційне поля й поле обертання. Поле – це реальний матеріальний об'єкт, який може існувати самостійно. У макросвіті без руху зарядженого джерела, тобто замкнутого витка зі струмом існування стаціонарного магнітного поля не уявляють можливим. У мікросвіті магнітний момент мікрочастинки може існувати і без протікання струму. Самі мікрочастинки – це польові утворення. Внаслідок обертання мікрочастинки існує некомпенсований магнітний момент, унаслідок розривів атомних зв'язків на поверхні наноструктури також виникає некомпенсований магнітний момент.

Вихор магнітного моменту  $\mathbf{M}$  одиниці об'єму – це густина магнітного струму

$$\boldsymbol{\sigma}_m = c \text{rot} \mathbf{M}, \quad (3)$$

розходження магнітного моменту – це розподілений у середовищі з об'ємною густиною  $\rho_m$  магнітний заряд

$$\rho_m = \text{div} \mathbf{M}. \quad (4)$$

Розмірності величин збігаються з введеними Тікадзумі [4] в теорію феромагнетизму.

Для величин, уведених формулами (3) та (4), справджується рівняння неперервності

$$\text{div} \boldsymbol{\delta}_m + \frac{\partial \rho_m}{\partial t} = 0. \quad (5)$$

Намагніченість речовини – це відношення магнітного моменту до її об'єму. Напруженість магнітного поля  $H$  і магнітний момент – взаємопов'язані величини:

$$\mathbf{M} + \tau \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = K_m \mathbf{H}, \quad (6)$$

де  $K_m$  – коефіцієнт зв'язку.

Напруженість пов'язана зі скалярним магнітним потенціалом  $\varphi_M$

$$\mathbf{H} = -\frac{1}{c} [\mathbf{v}_M \times \nabla \varphi_M]. \quad (7)$$

З іншого боку,

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma [\mathbf{M} \times \mathbf{H}]. \quad (8)$$

Тобто існує нелінійна залежність

$$\mathbf{M} - \gamma \tau \frac{\partial}{\partial t} [\mathbf{M} \times \mathbf{H}] = K_m \mathbf{H}. \quad (9)$$

Отже, у наносередовищі, у якому діють закони мікросвіту з генерацією мікрочастинок, випромінюваннями хвиль можуть перебувати у стані спокою магнітні та електричні заряди. Не тільки у стані руху, а й у стані спокою ці заряди можуть бути джерелом магнітного поля, створюючи поля з напруженостями

$$\mathbf{E} = \frac{e\mathbf{r}}{4\pi\epsilon_a r^3}, \quad (10)$$

$$\mathbf{H} = \frac{q_M \mathbf{r}}{4\pi\mu_a r^3}, \quad (11)$$

де  $q_M$  – одиничний магнітний заряд.

Для мікрочастинок наносередовища справджуються рівняння Максвелла - Лоренца, що описують мікроскопічні електричні та магнітні поля і враховують сили, що діють з боку полів:

$$\text{rot } \mathbf{h} = \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t} + \rho_e \mathbf{v}_e, \quad (12)$$

$$\text{rot } \mathbf{e} = -\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t} - \rho_M \mathbf{v}_M, \quad (13)$$

$$\text{div } \mathbf{e} = \rho_e, \quad (14)$$

$$\text{div } \mathbf{h} = \rho_M, \quad (15)$$

де  $\mathbf{h}$  та  $\mathbf{e}$  – вектори напруженостей магнітного та електричного мікроскопічних електромагнітних полів,  $\mathbf{v}_e$  та  $\mathbf{v}_M$  – вектори швидкостей електричного та магнітного зарядів  $\rho_e$  та  $\rho_M$ .

Для аналізу електромагнітних процесів у наноструктурах найпридатнішими є польові моделі. Проте сьогодні строгої польової моделі електромагнітних процесів у матеріальних об'єктах не існує. Н. Бор і Ван Левен навіть довели теорему про неможливість класичного пояснення магнетизму. Особливі труднощі виникають у разі переходу в область нанорозмірних структур. Сьогодні усталився підхід, за якого рівняння класичної електродинаміки у випадку опису певного роду суто квантових процесів доповнюються новими явищами. Можливості класичної електродинаміки в цьому разі значно розширюються. Для класичної електродинаміки є місце у квантовому світі.

У математичних моделях нанопроцесів можна використовувати як квантовий, так і квазікласичний підходи, які мають принципові відмінності.

За квазікласичним підходом взаємодія між зарядами, які породжують поля,

відбувається у рамках феноменологічних уявлень, тобто через напруженості полів.

У квантовій електродинаміці взаємодія між зарядами відбувається завдяки квантам енергії – фотонам. Це квантово польова взаємодія. Обмін енергіями між частинками ядра (протонами, нейтронами) відбувається завдяки іншим переносникам взаємодій –  $\pi$ -мезонам. У гігамакросвіті відбуваються подібні до квантових процеси: внутрішні області Сонця викидають потоки нейтронів, які розміщуються на дискретних рівнях навколо Сонця, подібно як електрони розміщуються в системі дискретних енергетичних рівнів валентної зони.

Проведено надзвичайно цінні експерименти, що визначають квантову структуру електромагнітного поля мезосередовищ. Явище квантування магнітного потоку дослідили Дівер і Фейрбенк. На рис. 2 зображена структура квантових рівнів приповерхневого магнітного поля.

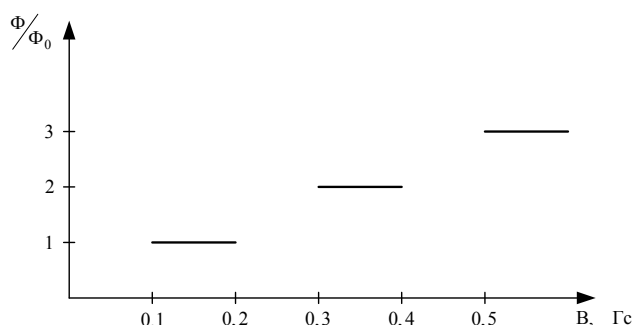


Рис. 2 Квантування магнітного поля на поверхні кристала (квант магнітного потоку  $\Phi_0 = 2 \cdot 10^{-15} \text{ Вб} \cdot \text{м}^2$ ).

Переносником взаємодій між окремими носіями заряду є мікрочастинки фотони. Мікрочастинка речовини має енергію та імпульс, фотон має спін, значення якого дорівнює одиниці. З погляду класичної фізики фотон не є матеріальною частинкою, він не має електричного заряду і магнітного моменту, маса спокою фотона дорівнює нулю. Під час руху його маса тіла становить  $10^{-21}$  маси електрона. Час його життя нескінченний.

Фотони можна уявити двояко: як світловий квант – елементарна мікрочастинка, або як випромінювання у вигляді плоскої електромагнітної хвилі.

Фотонне випромінювання поширюється зі світловою швидкістю  $c$ . Воно приносить нам інформацію про процеси, що відбуваються у сузір'ях, віддалених від Землі на мільярди світлових років. І у Всесвіті, і в людському організмі існують фотонні поля. Фотонне випромінювання забезпечує зв'язки і взаємодії між нейронами мозку. Частотний діапазон фотонного випромінювання дуже широкий. Це світлові хвилі, рентгенівське та  $\gamma$ -випромінювання. Поняття фотон уведене Планком 1899 р., а 1905 р. А. Ейнштейн довів, що фотони поширюються як частинки з імпульсом  $\frac{h\nu}{c}$ , де  $h$  – стала Планка ( $6,625 \cdot 10^{-34}$  Дж·с);  $\nu$  – частота;  $e$  – заряд електрона ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл). Чим вища частота, тим яскравіше виявляються корпускулярні властивості фотонного поля.

Для опису процесів у наномагнітних структурах, крім апарату теорії електромагнітних взаємодій, потрібно використати поля слабких взаємодій. С. Вайнбергу, П. Глешоу і А. Саламу вдалось об'єднати електромагнітні й слабкі

взаємодії. Об'єднувальним фактором у них були бозони  $W^+$ ,  $W^-$  та  $Z^0$  і фотон. Проте створити польову теорію електрослабких взаємодій ні П. Гленшоу, А. Саламу і С. Вайнбергу – лауреатам Нобелівської премії з фізики, ні їхнім послідовникам поки що не вдалось.

Практика створення нанотехніки [6] випереджає розвиток теоретичної нанонауки. Усередині вуглецевих нанотрубок виявлено наночастинки  $Fe_3C$ , які знищують ракові клітини, створюючи діри в мембранах ракових клітин. Магнітні наночастинки скеровують стовбурові клітини до пошкоджених ділянок мембран.

Магнітні стовбурові клітини використовують для лікування хвороб серця. Особливо перспективними є наночастинки  $FePt$  та  $CuO$ .

Важливу роль потрібно відвести біологічним наноструктурам. Зі спіралей ДНК можна отримувати штучні наноструктури.

Нанокільки з кремнію, покриті моношаром золота, пом'якшують метастази в онкохворих, захищаючи їх від болю і застосування нарколів.

У нанорозмірному стані електрони нанооб'єкта можна розділити на глибинні та поверхневі. Особливі властивості нанопристрій набуває саме завдяки поверхневим електронам. Якщо електрони подолали енергетичний бар'єр, що відповідає роботі виходу електрона, то їх можна зачислити до категорії вільних поверхневих атомів. У цьому випадку вони утворюють електронну хмаринку навколо нанооб'єкта.

Частина поверхневих електронів зазнає захоплення на поверхневі рівні, утворюючи електронний листок. У товщі нанооб'єкта під його впливом індукється шар розподілених зарядів зворотної полярності. Тобто в поверхневому шарі нанооб'єкта утворюється подвійний шар електричних зарядів, характеристична товщина якого сумірна з наноструктурами.

На енергетичній діаграмі кремнієвої нанокільки, покритої моношаром золота, крім енергетичних рівнів електронні хмаринки і захоплені на поверхневі рівні, важливими є рівні моношару золота і глибинних областей кремнію. Вплив глибинних областей кремнію на характеристики нанооб'єкта докладно дослідив акад. А. Г. Наумовцев [7, 8].

Нові фізичні властивості, притаманні нанооб'єктам, отримують завдяки розривам атомних зв'язків на поверхні структури і зміні орієнтації спінів.

1. *Мулера В.М.* Поверхностные силы в тонких пленках. М.: Наука, 1974. 249 с.
2. *Дерягин Б.В.* Электромагнитная природа молекулярных сил // Природа. 1962. № 2. С. 17–26.
3. *Дурагіна З.А.* Фізика та хімія поверхні. Львів. Вид-во НУ “Львів. політехніка”, 2009. 204 с.
4. *Тикадзуми С.* Фізика ферромагнетизма. Магнитные свойства вещества. М.: Мир, 1983. 642 с.
5. *Шпак А.П.* Колоидно-хімічні основи нанонауки / Под ред. З. Р. Ульберг / Киев.: Академперіодика, 2005. 446 с.
6. *Головин Ю.* Введение в нанотехнику. М.: Машиностроение, 2007. 493 с.
7. *Наумовец А.Г.* Поверхность // Физическая энциклопедия. Т. 3. М.: Большая Российская энциклопедия, 1992. С. 653–655.
8. *Наумовець А.Ф.* Поверхнева дифузія // Вісн. НАН України. 2008. № 11. С. 64–85.

**STATE OF THEORY AND TECHNIQUE OF NANOMAGNETISM**

R. Pelenskyj

*Lviv Polytechnic National University  
Bandera Str., 12, Lviv 79013, Ukraine*

In this paper we analyze a modern state and development of the theory intended for mathematical modelling of processes in nanomagnetic elements of technical devices and in biological nanoelements. Modern techniques and technical possibilities for production of nanomagnetic elements and devices are considered.

*Key words:* nanomagnetic elements, nanomagnetic structures.

**СОСТОЯНИЙ ТЕОРИИ И ТЕХНИКИ НАНОМАГНЕТИЗМА****Р. Пеленский***Национальный университет “Львовская политехника”  
ул. С. Бандеры, 4, 79013 Львов, Украина*

Проанализировано состояние развития теории для математического моделирования процессов в наномангнитных элементах технических устройств и в биоэлементах. Рассмотрены современные технологии и технические возможности изготовления наномангнитных элементов и устройств.

*Ключевые слова:* наномангнитные элементы и структуры.

Стаття надійшла до редколегії 01.06.2010

Прийнята до друку 16.06.2010