

# ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ І МАГНІТНИХ ВЕЛИЧИН

УДК 537.311.322

## ПЛІВКОВІ СТРУКТУРИ В НАНОМАГНІТОМЕТРІЇ

© Пеленський Роман<sup>1</sup>, 2013

<sup>1</sup>Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

*Розроблено теорію наномагнітних перетворювачів, перспективних для широкого застосування у різних галузях науки, техніки і медицини.*

*Разработана теория наномагнитных преобразователей, перспективных в различных отраслях науки, техники и медицины.*

*A theory of nanomagnetic sensors that find wide application in various branches of science, engineering and medicine has been developed.*

**Вступ.** У наш час на початковому етапі розроблення перебуває теорія електромагнітних процесів у наномагнітних перетворювачах, які вже знайшли широке застосування і мають подальші великі перспективи в різних галузях техніки та медицини.

Сучасна теоретична електродинаміка не описує процесів у наномагнітних перетворювачах, бо в ній не закладено квантові явища, основоположні в роботі наномагнітних елементів.

Поставлено завдання розроблення математичних моделей електромагнітних процесів у перетворювачах з метою їх використання для проведення проектних робіт у царині створення наномагнітної вимірювальної техніки.

**Мета роботи** полягає у розробленні теорії утворення на поверхні наноструктур некомпенсованого магнітного моменту, його впорядкованого руху як магнітного струму і формування у плівковому середовищі розподіленого магнітного заряду.

### Виклад основного матеріалу

#### 1. Квантово-механічні елементи в природі наномагнетизму

Магнетизм як квантово-механічне явище у другій половині XIX ст. не зміг розвинути.

У теорії електромагнітного поля вектор електромагнітної індукції  $\vec{B}$  входить у рівняння

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0. \quad (1)$$

Бор і ван Льовен [1] стверджували про нездатність тогочасної класичної фізики до опису магнітних явищ. Наномагнетизм – суто квантове явище в часи Максвелла не міг бути відомим [2].

З розвитком квантової механіки [3] стало доступним вивчення руху некомпенсованого магнітного моменту, який з'являється у тонкоплівкових структурах за рахунок розірваних атомних зв'язків [4]. Розірваний атомний зв'язок зумовлює виникнення квантово-магнітного моменту, що дорівнює  $1,25\mu_B$  (де  $\mu_B$  – магнетон Бора). Отже, квант магнітного моменту – це приблизно  $1,16 \cdot 10^{-23}$  Дж/Тл.

У наноплівках кількість поверхневих атомів співмірна з кількістю об'ємних атомів. У поверхневих атомах утворюються розірвані атомні зв'язки. В локальній приповерхневій області з'являються властивості, про які не здогадувались, вивчаючи суцільне середовище. Електродинаміка суцільного середовища описувалась несиметричною системою максвеллових рівнянь макроскопічного поля (2):

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= \vec{\delta}_e + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0, \\ \operatorname{div} \vec{E} &= r_e. \end{aligned} \quad (2)$$

де  $\vec{H}$  і  $\vec{E}$  – вектори напруженостей магнітного й електричного полів;  $\vec{B}$  і  $\vec{D}$  – вектори магнітної та

електричної індукції;  $\delta$  – вектор густини електричного струму;  $r_e$  – питома об'ємна густина розподіленого в середовищі електричного заряду.

В суцільному середовищі існують атомні зв'язки з усіма атомами-сусідами. В розривному середовищі в поверхневих атомах верхні електрони долають роботу виходу електрона і розміщені на електричному листку, що міститься над поверхнею наночастини чи наноплівки.

Крім зарядової, на поверхні наявна спінова неоднорідність [4,5]. Спінове збурення полягає в тому, що на поверхні спіни електронів розміщені паралельно  $\left(+\frac{1}{2}$  та  $+\frac{1}{2}\right)$ , тоді як у суцільному середовищі вони протилежно скеровані  $\left(+\frac{1}{2}$  та  $-\frac{1}{2}\right)$  і взаємно компенсуються. Тобто в об'ємі структури некомпенсований магнітний момент відсутній.

У приповерхневих шарах несучільних середовищ некомпенсований магнітний момент і збурене спінове поле [6] існують. Нескомпенсований магнітний момент

$\bar{M} \left[ \frac{A}{M} \right]$  зумовлює появу в поверхневій області магнітного заряду з об'ємною густиною  $r_M \left[ \frac{B\delta}{M^3} \right]$ :

$$\operatorname{div} m_a \bar{M} = -r_M, \quad (3)$$

де  $m_a$  – абсолютна магнітна проникність.

Рух магнітного моменту в приповерхневій області – це магнітний струм, його густина  $\bar{\delta}_M \left[ \frac{B}{M^2} \right]$ .

Рух некомпенсованого магнітного моменту в збуреному спіновому середовищі – магнітний струм може мати хвильовий характер – це спінові хвилі [6]. У цьому випадку в математичну модель входять другі похідні.

Симетричне суцільне середовище описується несиметричною системою рівнянь (2), тоді як для опису електромагнітних процесів у несиметричному плівковому наномагнітному середовищі придатна симетрична система рівнянь електромагнітного поля. Введений Діраком у 1927 р. [7, 8] магнітний монополі здійснив симетрування системи рівнянь електродинаміки:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \bar{H} &= \bar{\delta}_e + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}, \\ \operatorname{rot} \bar{E} &= -\bar{\delta}_M - \frac{\partial \bar{B}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \bar{B} &= r_M, \\ \operatorname{div} \bar{E} &= r_e. \end{aligned} \quad (4)$$

**2. Будова і характеристики плівкових середовищ.** Класичним прикладом несиметричного середовища є наномагнітні плівки графена. З 2004 р. з часу виготовлення графенових плівок [9] дослідники в усьому світі зайнялись вивченням вуглецевих плівок, опубліковано тисячі статей, отримано тисячі патентів. Особливо важливими характеристиками графену [10, 11] є його міцність, найвища серед усіх відомих на Землі матеріалів. Міцність у поєднанні з повною прозорістю робить графен найперспективнішим матеріалом для сонячної енергетики [5]. Він не боїться дощу і граду, вуглецеві сонячні батареї на дахах будинків у найближчому майбутньому забезпечать енергетичну незалежність господарств. Швидкими темпами знижуються ціни вуглецевих плівок.

Об'єднання вуглецю і водню приводить до створення нових видів матеріалів. Створені графан і графон мають зовсім нові властивості. Якщо в моноатомарному плівковому вигляді графен – електропровідний матеріал, то графан – діелектрик, а графон – магнітний напівпровідник.

Вуглецеві фотоелектричні пристрої перетворюють інфрачервоне випромінювання Сонця на електроенергію. Для кремнієвих перетворювачів ця ділянка спектра сонячного випромінювання була недоступною, а це сорок відсотків енергії сонячного випромінювання. Тобто ефективність перетворення сонячної енергії зростає.

Можна створювати різноманітні конструкції для практичного використання вуглецевих плівок, отримуючи при цьому нові властивості. У здвоєних графенових плівках існує заборонена зона. Додаючи незначну частку атомів азоту при напыленні графенової плівки, отримуємо матеріал, у якому також є заборонена зона. Елементи всієї періодичної таблиці Менделєєва можна долучити до вуглецю, що дасть змогу створити нові матеріали з невідомими досі властивостями.

Гідрогенізацією за певної температури і певного тиску до моноатомних плівок вуглецю можна приєднувати водень. У разі двостороннього приєднання водню утворюється графан. Плівка, що містить водень лише з однієї сторони вуглецевого шару – це графон [12]. Тобто графон – несиметрична структура, вона містить подвійний шар магнітних зарядів лише з одного боку, тому зараховують таку плівку до магнітних матеріалів.

Якщо наноплівка графону виконана як моношар вуглецю, на якому розміщений моношар водню, то

атом вуглецю має ковалентні зв'язки з двома атомами вуглецю і атомами водню, четвертий зв'язок (поверхневий) розірваний. Внаслідок цього виникає квант магнітного моменту. На поверхні з'являється магнітний заряд (формула (3)), котрий індукуює свою діонну пару. На водневій поверхні електрон водню вступає у ковалентний зв'язок, а позитивно заряджені ядра водню утворюють позитивний електричний листок. Від'ємна обкладка подвійного електричного шару зарядів міститься в площині спільних для вуглецю та водню електронів. Отже, на вуглецевій поверхні графону існує подвійний шар магнітних зарядів, який і приводить до кваліфікації графону як магнітної структури.

У живому організмі магнітні наночастинки та наноплівки також існують. Наприклад, наночастинка  $Fe_3O_4$ , котра є в головах бджіл і голубів, відповідає за їх блискучу просторову орієнтацію.

**3. Наномагнітні перетворювачі на основі явища гігантського магнітного опору (ГМО).** У вимірювальній техніці останнім часом почали широко застосовувати явище гігантського магнітного опору [7] для створення перетворювачів магнітного поля найрізноманітнішого призначення: для підрахунків інформації, записаної на жорстких магнітних дисках, для оцінювання магнітної пам'яті в біосенсорах, в технічних засобах оцінки рівня коливань. На основі шаруватих наноадраток створено наносенсиори магнітних полів.

Суть явища ГМО [13] ґрунтується на змінах опору під дією зовнішнього магнітного поля. Основну роль у явищі ГМО відіграє спіні [14]. В залізі опір вздовж силових ліній магнітного поля збільшується, а вперек магнітних силових ліній він зменшується. Особливо великою мірою проявляються ці властивості опору в шаруватих наногратках, в яких чергуються феромагнітні та неферомагнітні шари. В природі матеріалів з подібними властивостями поки що не знайдено. Отже, використання орієнтації спіна в поєднанні з напрямом зовнішнього магнітного поля слугує для створення нового напрямку в магнітометрії.

**4. Наномагнітометричні технології.** У царині високих технологій вже на етапі організації випуску інтегральних схем був передбачений тотальний контроль за ходом всього технологічного процесу. Засоби для цього були якнайрізноманітніші. Наприклад, дуже

широко застосовувались тестові структури. На основі вимірювання лише одного параметра можна було зробити висновок, чи не утворюються на поверхні пластин дефекти і дислокації, бо наявність останніх під напиленнями плівками алюмінію спричинила б вигорання струмовиводів транзистора. В результаті вихід придатної продукції міг становити лише 0,1%. На передових виробництвах цей показник був на рівні 70%. Шуми субмікронних транзисторів завдяки контролю і внесенню корекцій в технологічний процес вдавалось знизити до зникломо малого рівня.

У галузі надвисоких технологій, якою є виробництво нанопродукції, роль вимірювальних систем у ході створення кінцевого продукту ще на порядки вища. На поверхні графенової плівки недопустимі ніякі дефекти, на яких розсіюються електрони, бо тоді суперпровідність плівки неможлива.

Нанооб'єкти володіють особливими фізичними і хімічними властивостями, викликаними квантовими ефектами. Особливі властивості виникають через розриви поверхневих міжатомних і міжмолекулярних зв'язків, наслідком чого є поверхневі квантові ефекти типу появи на поверхні некомпенсованого моменту, збільшення частки поверхневої енергії в загальному обсязі внутрішньої енергії, зв'язаної з хімічним потенціалом.

У шаруватих структурах, складених з різних моношарів, проявляються спінові неоднорідності – в одних шарах спіни паралельні, у інших – антипаралельні. Усі ці явища трапляються в наномагнітних плівках і частинках.

Магнітні наночастинки можна створювати перемеленням нанопороди за допомогою спеціальних млинів і сепарації магнітних частинок потужним магнітним полем. Створення носіїв інформації у вигляді цих наночастинок в разі збільшить густину магнітного запису інформації.

Перетворення плівок на наномагнітні здійснюється на підставі квантового ефекту Хунда, завдяки якому на поверхні плівки утворюється некомпенсований магнітний момент, зумовлений паралельно скерованими спінами. На поверхневі магнітні рівні [14] захоплюються кванти магнетизму, Наномагнітні технології спінтроники [15] використовують ці явища.

**5. Перспективи розвитку вимірювальної техніки для потреб наногалузі.** Особливо важливі завдання виникли перед вимірювальною технікою в зв'язку з

розвитком нанотехнологій. Якнайшвидше необхідно освоїти технології виготовлення мільярдів квадратних метрів графенових листів для вуглецевої геліоенергетики. Ці пластини – це верхній шар сонячних батарей. Вони надміцні, зручні в монтуванні, не бояться граду, дощу, можуть перебувати на дахах будинків протягом десятків років і здійснювати енергозабезпечення господарств. Найважливішою операцією при напilenні вуглецевих наноплівочок є контроль їхньої товщини. Терміново потрібно розробити вимірювальні системи, які б здійснювали цю функцію.

Графенові нанотрубки є наступним дуже перспективним матеріалом для сонячної енергетики і наноелектроніки. Вимірювальна техніка повинна забезпечити можливість виготовлення нанотрубок з монокристалічними вуглецевими стінками. Поверхня таких трубок не містить дефектів, тому нема розсіювання електронів. Вони можуть бути суперпровідними матеріалами, а в поєднанні з різними іншими елементами таблиці Менделєєва – напівпровідниками з особливими властивостями.

Наномагнітні структури є в біосистемах живого організму. Вони беруть участь в системах запам'ятовування і оброблення інформації. Переорієнтація елементарного магнітного диполя [14] супроводжується породженням або поглинанням квантів енергії – фотонів. Проявляється квантування електромагнітного поля. Утворюється фотонне середовище. Вимірюючи кількість фотонів певної частоти, отримуємо вичерпну інформацію про складові електромагнітного поля.

У рукотворній цифровій техніці проходять аналогічні процеси з утворенням фотонних полів [15], правда, значно інтенсивніших. Фотонні поля цифрових пристроїв і біосистем взаємодіють, що може приводити до заподіяння шкоди здоров'ю носіїв цих пристроїв і навіть впливати на здоров'я їхніх майбутніх потомків.

Перед вимірювальною технікою, радіотехнікою, біологією і медициною постала нагальна проблема у створенні засобів вимірювання взаємовпливу рукотворної техніки з біосистемою живого організму, щоб запобігти катастрофі, яку вже пережило наше покоління, коли в Європі народилось п'ять мільйонів важко-

хворих дітей через те, що їхні батьки приймали шкідливі пілюлі.

**Висновки.** Розроблена теорія дає змогу розрахувати характеристики магнітних наноструктур. Поки що практично відсутні прилади і методи вимірювання параметрів наномагнітних частинок і плівок. Поєднання теоретичних моделей наномагнітних явищ з вимірювальною практикою стане поштовхом до створення наномагнітної метрології.

1. Теорема Бора и ван Лёвен. *Физическая энциклопедия*. – М.: БСЭ, 1988. – Т. 1. – С. 225.
2. Тамм И.Е. *Основы теории электричества*. – М.: Наука, 1966. – 624 с.
3. Мигдал А. Б. Нильс Бор и квантовая физика УФН. – Т.147. – 1985. – С. 303–342.
4. Пеленський Р. *Властивості структур з розривами атомних, міжмолекулярних та внутрішньомолекулярних зв'язків у плівках* // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2006. – № 569. – С.98–102.
5. Пеленський Р. *Сонячний елемент: Патент на винахід № 100796 від 20.07.2011. Публікації: Бюл. № 13 10.07.2012, Бюл. № 2 25.01.2013.*
6. Ахизер А. И., Баряхтар В.Г., Пелетминский С. В. *Спиновые волны*. – М., 1967. – С. 4–64.
7. Монополь Дирака. – М.: Мир, 1970. – 208 с.
8. Атья М. Хитчин Н. *Геометрия и динамика магнитных монополей*. – М.: Мир, 1996. – 148 с.
9. Geim A. *Graphene Status and Prospects* // *Science*. – 2009. – 324. – P. 1530.
10. Семенов А.П., Белянин А.Ф., Семенова И.А., Пащенко П.В., Барнаков Ю.А. *Тонкие пленки углерода* // *ЖТФ*. – 2000. – Т.74. – Вып. 5.
11. Петрик Е.И. *Явления образования наноструктурных углеродных комплексов: открытие-диплом* – 2001. – № 163.
12. Макарова Т.Л. *Магнитные свойства углеродных структур* // *Физика и техника полупроводников*. – 2004. – Т. 38. – Вып. 6. – С. 641–664.
13. Никитин С.А. *Гигантское магнетосопротивление* // *Соросовский обзорный журнал*. – 2004. – Т. 8. – № 2. – С. 92–98.
14. Хайкин М.С. *Магнитные поверхностные уровни* // *УФН* !68 Т96. – С. 409.
15. Ферт А. *Происхождение, развитие и перспективы спинтроники* // *УФН*. – 2008. Т. 178. – № 12. – С. 1336–1348.