

ПЛІВКОВІ СТРУКТУРИ В НАНОМАГНІТОМЕТРІЇ

© Пеленський Роман¹¹Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С.Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Розроблена теорія 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 i various branches of science, engineering and medicine has been developed.

Вступ. В даний час на початковому етапі розробки знаходиться 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 в наномагнітних перетворювачах, бо в ній не закладені квантові явища, основоположні в роботі наномагнітних елементів.

Поставлене завдання розробки математичних моделей електромагнітних процесів в перетворювачах з метою їх використання при проведенні проектних робіт в царині створення наномагнітної вимірювальної техніки.

Мета роботи полягає в 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 Квантовомеханічні елементи в природі наномагнетизму

Магнетизм як квантомеханічне явище у другій половині дев'ятнадцятого століття не зміг розвинути.

В теорії електромагнітного поля вектор електромагнітної індукції \vec{B} фігурує в рівнянні

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

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

З розвитком квантової механіки [3] стало доступним вивчення руху некомпенсованого

магнітного моменту, який появляється в тонкоплівкових структурах за рахунок розірваних атомних зв'язків [4]. Розірваний атомний зв'язок зумовлює виникненню квантовомагнітного моменту, рівного $1,25\mu_B$ (де μ_B – магнетон Бора). Таким чином, квант магнітного моменту – це приблизно $1,16 \cdot 10^{-23}$ Дж/Тл.

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

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

де \vec{H} і \vec{E} – вектори напруженостей магнітного й електричного полів, \vec{B} і \vec{D} – вектори магнітної та електричної індукції, $\vec{\delta}$ – вектор густини електричного струму, ρ_e – питома об'ємна густина розподіленого в середовищі електричного заряду.

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

Крім зарядової на поверхні присутня спінова неоднорідність [4,5]. Спінове збурення полягає в тому, що на поверхні спіни електронів розміщені

паралельно $\left(+\frac{1}{2}\right)$ та $\left(+\frac{1}{2}\right)$, тоді як в суцільному середовищі вони протилежно скеровані $\left(+\frac{1}{2}\right)$ та $\left(-\frac{1}{2}\right)$ і взаємно компенсуються. Тобто, в об'ємі структури некомпенсований магнітний момент відсутній.

В 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 $\rho_M\left[\frac{B\bar{b}}{m^3}\right]$:

$$\operatorname{div} \mu_a \bar{M} = -\rho_M \quad (3)$$

де μ_a – абсолютна магнітна проникність.

Рух магнітного момента в при поверхневій області – це магнітний струм, його густина $\bar{\delta}_M\left[\frac{B}{m^2}\right]$.

Рух некомпенсованого магнітного момента в збуреному спіновому середовищі – магнітний струм може мати хвильовий характер – це спінові хвилі [6]. У цьому випадку в математичній моделі присутні 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 1927р. [7, 8] магнітний монополю здійснив симетрування системи рівнянь електродинаміки:

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

2. Будова і характеристики плівкових середовищ.

Класичним прикладом несиметричного середовища є наномагнітні плівки графону. З 2004 року з часу виготовлення графенових плівок [9] дослідники в усьому світі зайнялись вивченням вуглецевих плівок, опубліковано тисячі статей, отримано тисячі патентів. Особливо важливими характеристиками графону [10, 11] є його міцність, найвища серед усіх відомих на Землі матеріалів. Міцність в 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. Величезними темпами здійснюється зниження 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 в електроенергію. Для кремнієвих перетворювачів ця ділянка спектру 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 долю атомів азоту при напиленні графенової плівки отримуємо матеріал, у якому також присутня заборонена зона. Елементи всієї періодичної таблиці Менделєєва можуть бути долучені до вуглецю, що дозволить створити нові матеріали з невідомими до цих пір властивостями.

Шляхом гідрогенізації при певній температурі і певному тиску до моноатомних плівок вуглецю можна приєднувати водень. При двосторонньому приєднанні 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 однієї сторони, тому відносять таку плівку до магнітних матеріалів.

Якщо наноплівка графону виконана як моношар вуглецю, на якому знаходиться 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 момента. 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 знаходиться в площині спільних для вуглецю та водню електронів. Таким чином, на вуглецевій поверхні

графона існує подвійний шар магнітних зарядів, який і призводить до кваліфікації графону як магнітної структури.

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

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

Суть явища ГМО [13] базується на змінах опору під дією зовнішнього магнітного поля. Основну роль в явищі ГМО відіграє спін [14]. В залізі опір вздовж силових ліній магнітного поля збільшується, а впоперек магнітних силових ліній він зменшується. В особливо великій степені проявляються ці властивості опору в шаруватих наноадратках, в яких чергуються феромагнітні та неферомагнітні шари. В природі матеріалів з подібними властивостями поки-що не знайдено. Таким чином, використання орієнтації спіна в поєднанні з напрямом зовнішнього магнітного поля слугує для створення нового напрямку в магнітометрії.

4. Наномагнітометричні технології

В 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 напиленими 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 внесенням корекцій в технологічний процес вдавалось знизити до зникломо малого рівня.

В галузі надвисоких технологій, якою є виробництво нанопродукції, роль вимірювальних систем в ході створення кінцевого продукту ще на порядки вища. На поверхні графенової плівки не допустимі 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, внаслідок чого виникають поверхневі квантові ефекти типу появи на поверхні некомпенсованого моменту, збільшення частки поверхневої енергії в загальному обсязі внутрішньої енергії, зв'язаної з хімічним потенціалом.

В шаруватих структурах, складених з різних моно шарів проявляються спінові неоднорідності – в одних шарах спіни паралельні, у інших – антипаралельні. Усі ці явища зустрічаються в наномагнітних плівках і частинках.

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

Перетворення плівок в наномагнітні здійснюється на підставі квантового ефекта 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 задачі 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 знаходитись на дахах будинків протягом десятків років і здійснювати енергозабезпечення господарств. Найважливішою операцією при напилених вуглецевих наноплівках є контроль їхньої товщини. Терміново потрібна розробка вимірювальних систем, 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 моноатомними вуглецевими стінками. Поверхня таких трубок не містить дефектів, тому нема розсіяння електронів. Вони можуть бути суперпровідними матеріалами, а в поєднанні з різними іншими елементами таблиці Менделєєва – напівпровідниками з особливими властивостями.

Наномагнітні структури присутні в біосистемах живого організму. Вони приймають 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.

В 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 стоїть нагальна проблема у створенні засобів вимірювання взаємовпливу рукотворної техніки з біосистемою живого організму, щоб попередити можливість катастрофи, яку вже пережило наше покоління, коли в Європі народилось п'ять мільйонів тяжко хворих дітей через приймання шкідливих пілюль їхніми батьками.

Висновки. Розроблена теорія дозволяє розраховувати характеристики магнітних наноструктур. В даний час 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. Наука, М. 1966. – 624с.*
3. *А. Б. Мигдал. Нильс Бор и квантовая физика УФН т.147.-1985.-с.303-342.*
4. *Пеленський Р. Властивості структур з розривами атомних, міжмолекулярних та внутрішньо молекулярних зв'язків у плівках // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, №569, 2006. – 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. *Ахиезер А. И., Баряхтар В.Г., Пелетминский С. В. Спиновые волны – М.1967.-с.4-64.*
7. *Монополь Дирака – М. Мир.–1970.-208с.*
8. *Атья М. Хитчин Н Геометрия и динамика магнитных монополей-М. МИР.-1996.-148с.*
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. *ПетрикЕ.И, Явления образования наноструктурных углеродных комплексов. Открытие-диплом №163,2001.*
12. *Макарова Т.Л. Магнитные свойства углеродных структур // Физика и техника полупроводников т. 38, вып.6, 2004. – с.641-664.*
13. *Никитин С.А. Гигантское магнетосопротивление // Соросовский обозревательный журнал т. 8, № 2, 2004. – с.92-98.*
14. *Хайкин М.С. Магнитные поверхностные урони. УФН !68 Т96 –с.409.*
15. *Ферт А. Происхождение, развитие и перспективы спинтроники // УФН. т. 178, № 12, 2008. – с.1336-1348.*