

Р. В. Верба

Магнетизм мікро- і наночастинок

МАГНЕТИЗМ МІКРО- І НАНОЧАСТИНОК Магнітні мікрочастинки (МЧ) та наночастинки (НЧ) – об'єкти з магнітовпорядков. матеріалів (ферромагнетики, рідше – антиферромагнетики). Їхні розміри відповідно 0,1–100 мкм та 1–100 нм. З МЧ і НЧ окремо виділяють: магнітні наноточки – штучні об'єкти регуляр. форми (циліндри, диски, призми тощо), виготовлені на певній підкладці; магнітні наностовпчики – наноточки з великим відношенням висоти до планар. розмірів; магнітні нанодроти – довгі об'єкти зазвичай круглого перерізу з нанорозмір. діаметром і значно більшою (на кілька порядків) довжиною. Властивості магніт. МЧ і НЧ переважно визначаються влас. параметрами магніт. матеріалу частинки й ефектами форми. На відміну від МЧ і НЧ, властивості масив. феро- та ферромагніт. зразків також часто суттєво залежать від їхньої мікроструктури, яка визначає центри закріплення домен. стінок. Ін. суттєвою особливістю МЧ і НЧ є зростаюча роль на їхні властивості поверхневих атомів. Поверхневі атоми знаходяться в ін. умовах порівняно з атомами в об'ємі, що призводить до відмінності їхніх магніт. властивостей. Зокрема, це зумовлює появу поверхневої перпендикуляр. магніт. анізотропії в таких матеріалах, як: Fe, Ni, Co та їхніх сплавах, чи до виникнення поверхневої взаємодії Дзялошинського–Морія в інтерфейсі ферромагніт. метал–немагніт. метал з великою спін-орбітал. взаємодією (інтерфейси Fe–Pt, Fe–W, NiFe–Pt тощо).

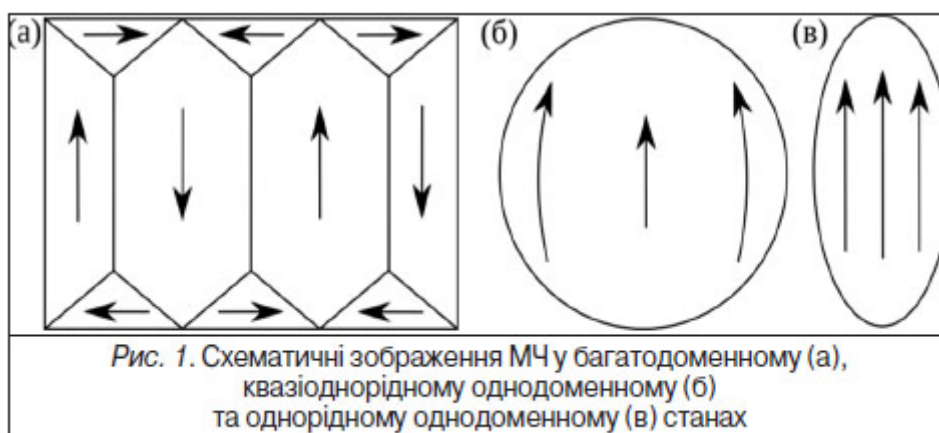


Рис. 1. Схематичні зображення МЧ у багатодоменному (а), квазіоднорідному однодоменному (б) та однорідному однодоменному (в) станах

Статичні властивості. Осн. стан (розподіл намагніченості $M(r)$) магніт. МЧ (НЧ) визначається конкуренцією: (i) зеєманів. енергії магніт. моменту в зовн. полі B_e : $W_H = -\int M(r) \chi B_e dr$, яка мінімізується при співнаправленості намагніченості та магніт. поля, (ii) енергії неоднорід.

обміну $W_H = -(\mu_0/2) \int_{i=e, x, y, z} (C M_i)^2 dr$, де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна проникність вакууму, λ_{ex} – обмінна довжина ферромагнетика; W_{ex} мінімізується при однорід. намагніченості МЧ, (iii) енергії магніт. анізотропії, конкрет. вираз для якої залежить від типу анізотропії (одновісна, двовісна, кубічна тощо), яка сприяє направленості намагніченості вздовж певної кристаліч. осі чи площини, та (iv) магнітостатич. енергії (енергії розмагнічування) $W_{dip} = (\mu_0/2) \int M(r) \nabla G(r - r') \cdot M(r') dr dr'$, де G – магнітостатична функція Гріна; W_{dip} певною мірою залежить від форми МЧ та мінімізується при нульовому заг. магніт. моменті частинки. На статичні властивості МЧ і НЧ впливає взаємодія Дзялошинського–Морія та ін. магнітні взаємодії. Конкуренція цих взаємодій призводить до великого різноманіття осн. станів магніт. МЧ і НЧ. За відсутності зовн. поля відносно великі МЧ знаходяться у багатодомен. стані (Рис. 1а), що обумовлено домінуючою роллю магнітостатич. взаємодії та анізотропії. При зменшенні розміру МЧ формування доменів перестає бути вигідним і осн. станом МЧ стає однодоменний. Характерні розміри, за яких відбувається цей перехід, залежать від матеріалу та форми МЧ і становлять бл. 100нм – 10мкм. Водночас однодомен. стан може бути як простим квазіоднорідним (Рис. 1б), так і більш складним. Напр., МЧ у формі круглого циліндра виготовлені з магнітом'якого матеріалу (з практично відсутньою анізотропією) можуть мати за осн. стан квазіоднорідний з намагніченістю в площині чи перпендикулярно їй, або вихр. стан (Рис. 2). Лише під час зменшення розмірів НЧ до кількох обмін. довжин λ_{ex} її осн. станом є однорідний (Рис. 1в) незалежно від форми НЧ (типові значення λ_{ex} : Fe – 3,4 нм, пермалой Ni₈₀Fe₂₀ – 5,1 нм, залізо-іттрієвий гранат – 16,5 нм).



Під час застосування зовн. магніт. поля більшого за поле насичення МЧ і НЧ переходять в однорідно намагнічений стан із напрямом намагніченості зовн. полем. Процес перемагнічування відбувається з гістерезисом – криві намагніченості $M(B)$ під час збільшення поля до насичення та в зворот. напрямі не співпадають (виняток – застосування поля у важкому напрямі намагніченості). Петля гістерезису при цьому є значно ширшою за петлю гістерезису масив. зразків (Рис. 3), що пов'язано з різними механізмами перемагнічування – шляхом руху та злиття доменів у масив. зразках і

перемагнічування через однорід. поворот (механізм Стоунера–Вольфарта) чи неоднорідну моду в МЧ і НЧ. Окремим вартом уваги випадком є перемагнічування МЧ і НЧ з вихр. осн. станом. Під час застосування поля в площині МЧ петля гістерезису має характерну бітрикутну форму, яка визначається процесами зміщення, нуклеації та анігіляції вихору. Вплив температури та суперпарамагнетизм. За відсутності зовн. магніт. поля осн. стан магніт. МЧ і НЧ є, як мінімум, двічі виродженим, що пов'язано з тим, що енергії магніт. взаємодій, окрім зеєманів. доданку, є парними функціями намагніченості. Напр., для найпростішого випадку сферич. НЧ з одновіс. анізотроп. феромагнетику осн. станом є стан з намагніченістю паралел. до осі анізотропії, який є двократно виродженим – стани з протилеж. напрямками намагніченості мають однак. енергію. Ці стани розділені енергет. бар'єром, у цьому ж найпростішому випадку він рівний $\Delta W = KV$, де K – стала анізотропії, V – об'єм НЧ. Коли величина бар'єру стає сумірною з енергією тепл. флуктуацій kBT ($kB = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, T – абсолютна т-ра), то виникають випадк. перемагнічування НЧ під дією тепл. флуктуацій. Цей стан НЧ називають суперпарамагнітним. Характер. час знаходження НЧ у певному стані (час релаксації Неєля) рівний $t = (1/f)\exp[\Delta W / kBT]$, де f – характеристична частота спроб, сумірна з частотою феромагніт. резонансу (порядку 1–10 ГГц). За відсутності зовн. магніт. поля серед. магніт. момент сукупності суперпарамагніт. НЧ, які не взаємодіють, дорівнює нулю. Крива намагнічування сукупності суперпарамагніт. НЧ не має гістерезису і є лінійною в області малих полів (Рис. 3). Тому поведінка суперпарамагніт. НЧ у зовн. полі є схожою до поведінки парамагнетику з великою магніт. сприйнятливістю. Характерні розміри НЧ, за яких вони переходять в суперпарамагніт. стан за кімнат. температури, складають 1–10 нм.

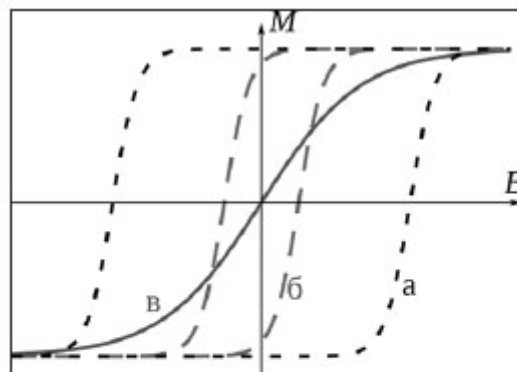


Рис. 3. Схематичні зображення петель гістерезису масивного зразка (б), МЧ в однодоменному стані (а) та СП МЧ (в)

Надвисокочастотні властивості. Під час застосування зовн. надвисокочастот. магніт. поля не паралельного до статич. намагніченості МЧ (НЧ) відбувається збудження коливань намагніченості у МЧ (НЧ) на певних резонанс. частотах. Спектр збуджень МЧ і НЧ складається із сукупності спін-хвильових мод, власні частоти та структура яких залежить від статич. стану МЧ, її форми, постій. зовн. поля та матеріал. параметрів. Осн. (найнижчою)

та найбільш інтенсив. модою МЧ у квазіоднорід. стані є, зазвичай, квазіоднорідна спін-хвильова мода, яка відповідає синфаз. коливанням намагніченості в усій МЧ. У плоских МЧ із планар. намагніченістю осн. модою може ставати зворотна магнітостатична мода. У випадку топологічно нетривіал. стану МЧ (напр., вихр. стан чи скирміон), окрім спін-хвильових мод, з'являються також гіротропні моди, які відповідають обертанню ядра вихору навколо положення рівноваги. Частоти гіротроп. мод, зазвичай, є суттєво нижчими за частоти спін-хвильових мод і лежать в субгігагерц. діапазоні. Колективні властивості ансамблів і масивів МЧ та НЧ. У випадку, коли магнітні МЧ (НЧ) знаходяться на невеликій відстані одна від одної, на їхні властивості починає впливати взаємодія між МЧ (НЧ). Осн. взаємодією є далекодіюча магнітодипол. взаємодія – магнітна МЧ (НЧ) створює навколо себе магнітне поле, яке діє на сусідні МЧ. У найпростішому випадку однорідно намагніченої МЧ (НЧ) це поле у наближенні точк. диполів рівне $B = -\mu_0(m - 3\epsilon_r(m\cdot e_r)) / (4\pi r^3)$, де e_r – одинич. вектор у напрямку між МЧ, а r – відстань між ними. При щільному розташуванні МЧ (НЧ) у певній матриці (з відстанями між краями МЧ порядку декількох міжатом. відстаней) можуть також проявлятися пряма та непряма обмінні взаємодії між МЧ (НЧ). Коли магнітні НЧ вільно рухаються у рідині (магнітна рідина), то дипол. взаємодія між МЧ призводить до утворення ланцюжків МЧ. У масивах магніт. наноточок, зокрема й впорядкованих періодич. масивах, дипол. взаємодія призводить до: (i) залежності енергії масиву від взаєм. впорядкування магніт. моментів наноточок і виділення, таким чином, колектив. осн. стану масиву, та (ii) до можливості поширення колектив. спін. хвиль у масивах. Крім того, в ансамблях НЧ побл. супермагніт. стану дипол. взаємодія змінює закони згасання серед. магніт. моменту після вимикання поля підмагнічування. Осн. методами виготовлення магніт. наноточок та їх масивів є електронно-променева й ультрафіолет. літографія, а також осадження в самоорганіз. матриці пор електрохімічно травленого оксиду алюмінію. Магнітні МЧ і НЧ в об'єм. фазі отримують методами конденсації з рідкої чи газоподіб. фаз, диспергуванням тощо. Також використовують методи самоорганізації. Осн. сфери застосування: у медицині та біотехнологіях – для доставлення речовин, зокрема ліків, у відповідну ділянку за допомогою керування рухом у неоднорід. магніт. полі; для гіпертермії та мех. руйнування клітин злоякіс. пухлин під дією високочастот. магніт. поля; для посилення розділ. здатності магніто-резонанс. томографії; в мікроелектроніці та обчислюв. техніці – як елементи оператив. пам'яті (MRAM); як гранульов. середовища для запису інформації на жорсткі диски; у техніці та електроніці надвисоких частот – як штучні матеріали з керов. параметрами на основі ґраток і масивів магніт. наноточок; НЧ у полімер. матрицях; у магнітооптиці – для створення магнітооптич. хвилеводів; у ближньопольових методах дослідж. поверхні для підсилення локал. поля; у сенсоріці – для створення сенсорів постій. і надвисокочастот. магніт. поля. В Україні чимало науковців вивчають властивості магніт. НЧ для застосування у медицині та біотехнології (Інститут магнетизму НАНУ, Інститут металофізики НАНУ, Нац. інститут раку, Нац. мед. університет у Києві, Нац. тех. університет України «Київ. політех. інститут», Харків. мед. університет та ін.). Проводять

теор. та експерим. дослідж. статич. і високочастот. властивостей магніт. наноелементів та їхніх масивів (Інститут магнетизму НАНУ, Інститут теор. фізики НАНУ в Києві, Інститут радіофізики та електроніки НАНУ у Харкові, Київ. університет, Нац. тех. університет України «Київ. політех. інститут», Донец. університет). Також вивчають властивості супермагніт. НЧ та їхніх сукупностей, які взаємодіють, зокрема вплив взаємодії на процеси розмагнічування, Інститут фізики НАНУ у Києві, Сум. університет.

Рекомендована література

1. Advanced Magnetic Nanostructures. New York, 2006;
2. K. Y. Guslienko. Magnetic vortex state stability, reversal and dynamics in restricted geometries // J. Nanosci. Nanotechnol. 2008. Vol. 8;
3. S. O. Demokritov. Spin Wave Confinement. Singapore, 2009;
4. Kh. Zakeri et al. Asymmetric Spin-Wave Dispersion on Fe(110): Direct Evidence of the Dzyaloshinskii-Moriya Interaction // Phys. Rev. Lett. 2010. Vol. 104;
5. D.-H. Kim et al. Biofunctionalized magnetic-vortex microdiscs for targeted cancer cell destruction // Nat. Mater. 2010. Vol. 9;
6. Magnonics. From Fundamentals to Applications. Berlin, 2013;
7. Magnetism of Surfaces, Interfaces and Nanoscale Materials: Handbook of Surface Science. Vol. 5. Elsevier, 2016.

Бібліографічний опис:

Магнетизм мікро- і наночастинок / Р. В. Верба // Енциклопедія Сучасної України [Електронний ресурс] / Редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк [та ін.] ; НАН України, НТШ. – К. : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2017. – Режим доступу: <https://esu.com.ua/article-60235>

2001-2025 © Ця енциклопедична стаття захищена авторським правом згідно з чинним законодавством України ([докладніше](#)).