

05;12

## Влияние формы антиферромагнитной наночастицы на ее намагниченность

© Ю.И. Маньков,<sup>1</sup> Р.Г. Хлебопрос<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, 660036 Красноярск, Россия

<sup>2</sup> Международный центр экстремальных состояний организма при Красноярском научном центре СО РАН, 660036 Красноярск, Россия

<sup>3</sup> Сибирский федеральный университет, 660041 Красноярск, Россия  
e-mail: mankov@iph.krasn.ru

(Поступило в Редакцию 2 августа 2011 г.)

В модели ядро—оболочка изучена зависимость намагниченности антиферромагнитной наночастицы от ее формы. Показано, что намагниченности нанодиска, нанопроволоки и сферической частицы могут отличаться в несколько раз.

Исследование свойств антиферромагнитных наночастиц представляет интерес как для изучения фундаментальных вопросов поверхностных явлений, так и для использования таких материалов в практических целях: системы сверхплотной записи информации [1,2], медицина [3,4]. Такие наночастицы могут образовываться благодаря биологическим процессам [5,6], иметь минеральное происхождение [7], а также могут формироваться искусственно [1,7]. При малом размере антиферромагнитного образца происходит декомпенсация подрешеток вблизи его поверхности [8]. В настоящее время общепризнанным (см., например, [9]) стало представление об антиферромагнитной наночастице как антиферромагнитном ядре, заключенном в тонкую оболочку (модель ядро—оболочка), вещество которой в зависимости от материала имеет самопроизвольный магнитный момент [10,11] или проявляет слабый ферромагнетизм, обусловленный поверхностными разупорядоченными состояниями с некомпенсированными спинами [12].

Хорошо изучено влияние на намагниченность антиферромагнитных наночастиц, помещенных во внешнее магнитное поле, поверхностной анизотропии [13] и обменного подмагничивания оболочки со стороны антиферромагнитного ядра [9]. Вместе с тем на наш взгляд необходим учет еще одного механизма формирования намагниченности таких объектов. Антиферромагнитные наночастицы в зависимости от состава и способа получения существенно отличаются по своей форме. Среди наночастиц помимо образований близких к сферическим отмечают так называемые нанодиски [14] и нанопроволоки [15]. В последних двух случаях один из размеров частицы в несколько раз или даже на порядок отличается от двух других. Подобное разнообразие антиферромагнитных наночастиц делает важным рассмотрение влияния формы наночастицы на ее намагниченность. Такое исследование может оказаться полезным в связи с изучением механизмов перемангничивания массивов магнитных наноэлементов во внешних магнитных полях [16–18].

Исходя из модели ядро—оболочка, рассмотрим антиферромагнитную наночастицу, которую образуют эллипсоидальное антиферромагнитное ядро в размерах полуосей  $a, b, c$  и оболочка толщиной  $r$ , обладающая самопроизвольной намагниченностью  $\mathbf{M}$ . Будем также полагать, что наночастица находится в постоянном внешнем магнитном поле  $\mathbf{H}$ , направленном вдоль одной из главных осей эллипсоида, которое обеспечивает однородную ориентацию вектора  $\mathbf{M}$  и определяет направление намагничивания образца, но не влияет на состояние антиферромагнитного ядра. Тогда намагниченность насыщения частицы  $\mathbf{m}$  параллельна  $\mathbf{H}$ , а ее величина  $m = MV_s/V$ , где  $M \equiv |\mathbf{M}|$ ,  $m \equiv |\mathbf{m}|$ ;  $V = (4\pi/3)(a+r)(b+r)(c+r)$  — объем частицы,  $V_s = V - (4\pi/3)abc$  — объем оболочки; вычитаемое в правой части этого выражения определяет объем антиферромагнитного ядра частицы. Подставляя  $V$  и  $V_s$  в выражение для  $m$ , имеем

$$m = Mr \frac{ab + ac + bc + r(a + b + c) + r^2}{(a+r)(b+r)(c+r)}. \quad (1)$$

Из этой формулы видно, что величина намагниченности частицы в основном определяется отношением толщины оболочки  $r$  к характерному размеру ядра, но в то же время зависит и от соотношений размеров полуосей  $a, b, c$ , т.е. от формы частицы. Выражение (1) не учитывает парамагнитный вклад в магнитный момент образца.

Равенство (1) получено при произвольном соотношении величин  $a, b, c, r$ , однако влияние формы частицы на ее намагниченность наиболее существенно проявляется при малой толщине магнитной оболочки:  $r \ll a, b, c$ . В этом пределе из формулы (1) имеем

$$m \approx Mr \left[ \frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} - r \left( \frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{1}{c^2} + \frac{1}{ab} + \frac{1}{ac} + \frac{1}{bc} \right) \right]. \quad (2)$$

Отметим, что при малых  $r$  в области „поллюсов“ эллипсоида, положение которых определяется направлением внешнего магнитного поля, в образце возникает размагничивающее поле  $H_r \approx 4\pi M$ , препятствующее его намагничиванию. Однако для наночастиц размагничивающее поле компенсируется обменным полем, в результате чего для намагничивания такого образца требуется внешнее магнитное поле  $H < H_r$ ;  $H = |\mathbf{H}|$ .

Рассмотрим несколько частных случаев. Для сферической частицы ( $a = b = c = R$ ), используя формулу (2), получаем

$$m \approx M \frac{3r}{R} \left(1 - \frac{2r}{R}\right). \quad (3)$$

Если эллипсоидальная частица вытянута вдоль одной из главных осей (нанопроволока), а две другие ее главные оси равны между собой ( $a = L_1$ ,  $b = c = R_1$ ;  $L_1 \gg R_1$ ), то для ее намагниченности из выражения (2) имеем

$$m \approx M \frac{2r}{R_1} \left(1 - \frac{3r}{R_1}\right). \quad (4)$$

Наконец, если частица имеет форму сплюснутого эллипсоида вращения (нанодиск:  $a = L_2$ ,  $b = c = R_2$ ;  $L_2 \ll R_2$ ), то ее намагниченность, как это следует из формулы (2), можно представить в виде

$$m \approx M \frac{r}{L_2} \left(1 - \frac{r}{L_2}\right). \quad (5)$$

Отметим, что в выражения (4) и (5) входят размеры наименьших из главных полуосей эллипсоида, т.е. намагниченность нанопроволоки пропорциональна отношению толщины оболочки  $r$  к радиусу  $R_1$  антиферромагнитного ядра, а намагниченность нанодиска определяется отношением  $r$  к полутолщине  $L_2$  антиферромагнитного ядра. Если принимать во внимание только размагничивающее и обменное поля, то легкая ось намагничивания нанопроволоки будет ориентирована вдоль ее длины, а для нанодиска таковыми являются оси, параллельные его плоскости. Согласно оценкам, намагниченность оболочки антиферромагнитной частицы  $M \propto 10^{-4} - 10^{-3}$  Т. Следовательно, размагничивающее поле оболочки  $H_r \propto 10^{-3} - 10^{-2}$  Т, что по порядку величины может совпадать с полем поверхностной анизотропии и полем обменного подмагничивания. Небольшая величина характерных полей позволяет при  $H < H_r$  не учитывать влияние внешнего магнитного поля на антиферромагнитное ядро.

Из формул (3)–(5) следует, что при  $R \approx R_1 \approx L_2$  намагниченность сферических антиферромагнитных частиц и нанопроволок оказывается соответственно в 3 и в 2 раза больше, чем у нанодисков. Таким образом, зависимость намагниченности антиферромагнитных наночастиц от их формы делает важным ее учет при различных исследованиях подобных объектов, а также может оказаться полезным для практических применений.

## Список литературы

- [1] Parkin S.S.P., Roche K.P., Samant M.G., Rice P.M., Beyers R.B., Scheuerlein R.E., O'Sullivan E.J., Brown S.L., Bucchigano J., Abraham D.W., Lu Y., Rooks M., Trouilloud P.L., Wanner R.A., Gallagher W.J. // J. Appl. Phys. 1999. Vol. 85. N 8. Part 2B. P. 5828–5833.
- [2] Russek S.E., Oti J.O., Kim Y.K. // J. Magn. Magn. Mater. 1999. Vol. 198–199. P. 6–8.
- [3] Tartaj P., Morales M.D., Veintemillas-Verdaguer S., Gonzalez-Carreno T., Serna C.J. // J. Phys. D. 2003. Vol. 36. N 13. P. R182–R197.
- [4] Добрецов К.Г., Афонькин В.Ю., Кириченко А.К., Ладыгина В.П., Столяр С.В., Баюков О.А., Сипкин А.В. // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2009. Вып. 6. С. 693–695.
- [5] Meldrum F.C., Wade V.J., Nimmo D.L., Heywood B.R., Mann S. // Nature. 1991. Vol. 349. N 6311. P. 684–687.
- [6] Столяр С.В., Баюков О.А., Гуревич Ю.Л., Денисова Е.А., Исааков Р.С., Ладыгина В.П., Пузырь А.П., Пустошилов П.П., Бутехтина М.А. // Неорган. матер. 2006. Т. 42. Вып. 7. С. 1–6.
- [7] Jambor J.L., Dutrizac J.E. // Chem. Rev. 1998. Vol. 98. N 7. P. 2549–2585.
- [8] Neel L. // Comptes Rendus. 1961. Vol. 252. N 26. P. 4075–4080; 1961. Vol. 253. N 1. P. 9–12; 1961. Vol. 253. N 10. P. 1286–1291; 1962. Vol. 254. N 4. P. 598–602.
- [9] Manna P.K., Yusuf S.M., Shukla R., Tyagi A.K. // Phys. Rev. B 2011. Vol. 83. N 18. P. 184–412.
- [10] Morales M.A., Skomski R., Fritz S., Shelburne G., Shield J.E., Yin M., O'Brien S., Leslie-Pelecky D.L. // Phys. Rev. B 2007. Vol. 75. N 13. P. 134–423.
- [11] Markovich V., Puzniak R., Mogilyansky D., Wu X.D., Suzuki K., Fita I., Wisniewski A., Chen S.J., Gorodetsky G.J. // Phys. Chem. 2011. Vol. 115. N 5. P. 1582–1591.
- [12] Sayed F.N., Jayakumar O.D., Sudakar C., Naik R., Tyagi A.K. // J. Nanoscience Nanotech. 2011. Vol. 11. N 4. P. 3363–3369.
- [13] Wesselinowa J.M. // J. Magn. Magn. Mater. 2010. Vol. 322. N 2. P. 234–237.
- [14] Klausen S.N., Lingard P.A., Lefmann K., Bodker F., Morup S. // Phys. Stat. Solidi A: Appl. Research. 2002. Vol. 189. N 3. P. 1039–1042.
- [15] Benitez M.J., Petravic O., Salabas E.L., Radu F., Tuysuz H., Schuth F., Zabel H. // Phys. Rev. Lett. 2008. Vol. 101. N 9. P. 097206.
- [16] Zhu X., Grütter P., Hao Y., Castano F.G., Haratani S., Ross C.A., Vögeli B., Smith H.I. // J. Appl. Phys. 2003. Vol. 93. N 2. P. 1132–1136.
- [17] Раухер Ю.Л., Степанов В.И. // ЖЭТФ. 2008. Т. 134. Вып. 3 (9). С. 514–524.
- [18] Миронов В.Л., Фраерман А.А., Грибков Б.А., Ермолаева О.Л., Гусев С.А., Вдовичев С.Н. // ФТТ. 2010. Т. 52. Вып. 11. С. 2153–2158.