

**Д.В. Митанов (4 курс, каф. КЭ), И.В. Плешаков, к. ф.-м. н., с. н. с. ФТИ РАН**

## **ОБЗОР МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ И РАДИОСПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МАГНИТОУПОРЯДОЧЕННЫХ НАНОСТРУКТУР**

**ABSTRACT:** A brief survey of some important data on magnetometric and radiospectroscopic investigations of such a novel class of materials as nanostructured magnetically ordered composites presented. New possibilities of dispersed nanostructure fabrication based on porous media filling are described. The peculiarities of magnetic nanosized systems are discussed.

В течение последних полутора десятилетий особое внимание исследователей привлекают системы, которые получили название магнитоупорядоченных дисперсных наноструктур. Они представляют собой материалы, являющиеся ансамблем магнитных частиц с размерами порядка единиц или десятков нанометров. Верхняя граница размера частиц задана условием их монодоменности, а нижняя – так называемым абсолютным квантовым пределом магнетизма [1]. Интерес к подобным веществам вызван тем, что в них появляется целый ряд новых физических свойств, не присущих объемным материалам. К ним следует отнести, прежде всего, суперпарамагнетизм [2], увеличение спонтанной намагниченности частиц [3], эффекты квантового туннелирования магнитного момента [4, 5] и др. Определенные надежды также связываются с использованием магнитоупорядоченных наноструктур в технике, прежде всего в устройствах магнитной записи информации.

Для исследования указанного класса веществ привлекается практически весь арсенал средств физики твердого тела, начиная с рентгеноструктурного анализа, имеющего своей целью установление того, как сформирована решетка кристаллитов. К особо важным, однако, следует отнести методики, непосредственно связанные с магнитными свойствами материалов – магнитометрию и ядерный магнитный резонанс (ЯМР). Первая дает сведения о поведении макроскопических магнитных параметров материала (в большинстве случаев, хотя и не обязательно, интересуются температурными зависимостями намагниченности образца), ЯМР же дополняет набор экспериментальных данных информацией о сверхтонких полях на ядрах магнитных элементов, временах ядерной релаксации и других микроскопических характеристиках системы [6]. В настоящей работе рассмотрены известные из литературы примеры применения этих двух методик к изучению магнитоупорядоченных кобальтсодержащих наноструктур, проведены сравнения спектров ЯМР наночастиц со спектром объемного металлического кобальта, полученным экспериментально, а также описаны некоторые методы синтеза наноструктурных материалов, в том числе опробованные авторами.

Разнообразие технологий получения веществ описанной выше структуры весьма велико. Следует отметить, что практически всегда используются тот или иной способ внедрения магнетика в нейтральную основу, т.е. создается композитный материал, одна фаза которого диспергирована до состояния наноразмерных частиц. Упомянем, например, совместное распыление магнитоупорядоченного металла и оксида кремния с получением гранулярной пленки [2], внедрение материала в поры цеолита [7], синтез магнитных кластеров в мицеллах органической матрицы [8]. В работах, где применяется ЯМР, практически всегда в качестве магнитного материала используют металлический кобальт, что связано с сильным сигналом от ядер  $^{59}\text{Co}$  (для композитов с очень малым количеством магнитоупорядоченной составляющей проблема интенсивности сигнала становится важной). В настоящей работе металлический кобальт вводился в матрицу пористого стекла с размерами каналов около 40 нм путем электролиза из водного раствора хлорида кобальта.

Магнитометрия всех рассматриваемых здесь ультрадисперсных материалов [2, 7, 8] с использованием стандартных магнитометров обнаружила широкую температурную область существования суперпарамагнетизма, т.е. такого поведения системы частиц во внешнем поле, когда их магнитные моменты за один измерительный цикл совершают множество тепловых флуктуаций. Последнее означает, что они ведут себя подобно “газу” парамагнитных частиц, но с заменой магнитного момента атома или иона на магнитный момент относительно большой частицы. Магнитная восприимчивость такой системы значительно больше, чем у обычного парамагнетика. Следует, однако, иметь в виду [1], что поведение ультрадисперсных систем определяется характерным временем измерительной методики. Поскольку оно для нестационарного ЯМР определяется временем поперечной релаксации, то есть довольно мало, в радиоспектроскопических экспериментах необходимо использовать низкие температуры, чтобы избежать подавления сигнала ЯМР хаотическим движением электронных моментов. Отметим, что в полученном электролизом кобальтовом композите датчиком Холла был измерен магнитный отклик, значительно превышающий парамагнитный.

В подавляющем большинстве работ, в которых ЯМР применен к изучению магнитоупорядоченных нанокompозитов, использовались гелиевые температуры [7...9] (известны лишь очень немногочисленные статьи, в которых сообщалось о наблюдении сигнала ЯМР от кобальтовых нанопроволок при комнатной температуре [10]). Во всех радиоспектроскопических исследованиях у этих материалов обнаружен целый ряд необычных свойств, отсутствующих у объемных образцов, и обусловленных как малыми размерами частиц, так и наличием границы раздела между матрицей и микрочастицей. Сдвиги некоторых пиков в спектрах ЯМР в область более высоких частот лишь обнаружены, но не получили окончательного объяснения. Предположительно они связаны с взаимодействием ферромагнитного ядра частицы с неизбежно присутствующим на ее границе антиферромагнитным оксидным слоем. Спектры ЯМР наноструктур, известные из литературы, сравнивались с полученными нами спектрами объемных металлических пленок Co толщиной 100 нм, напыленных на стеклянную подложку. Смещение частот ЯМР наноструктуры по отношению к спектру объемного материала прослеживалось весьма хорошо, что свидетельствует о высокой чувствительности метода к деталям строения магнитоупорядоченных материалов.

*Работа поддержана грантом фонда федеральных целевых программ “Интеграция” № А0142/01.*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. С.В. Вонсовский, «Магнетизм», М, «Наука», 1971, 1032 с.
2. Gang Xiao, S.H Liou, A. Levy, et al. Phys. Rev. B, 1986, v. 34, n. 11, p. 7573.
3. J.P. Bucher, D.C. Douglass, L.A. Bloomfield. Phys. Rev. Lett., 1991, v. 66, n. 23, p. 3052.
4. J. Tejada, L.I. Balcells, S. Linderoth, et al. J. Appl. Phys., 1993, v. 73, n. 10, p. 6952.
5. D.P. Awschalom, J.F. Smyth, G. Grinstein, et al. J. Appl. Phys., 1993, v. 73, n. 10, p. 6715.
6. Е.А. Туров, М.П. Петров. Ядерный магнитный резонанс в ферро- и антиферромагнетиках. М, “Наука”, 1969, 260 с.; М.И. Куркин, Е.А. Туров. Ядерный магнитный резонанс в магнитоупорядоченных веществах и его применения. М, “Наука”, 1990, 244 с.
7. Y.D. Zhang, W.A. Hines, J.I. Budnick, et al. J. Appl. Phys., 1994, v. 76, n. 10, p. 6576.
8. J.P. Chen, C.M. Sorensen, K.J. Klabunde, et al. J. Appl. Phys., 1994, v. 76, n. 10, p. 6316.
9. T.Thomson, P.C.Riedi, S.Sankar et al. J. Appl. Phys., 1997, v. 81, n. 8, p. 5549.
10. V. Scarani, B. Dondin, J.P. Ansermet. JMMM, 1999, v. 205, p. 241; V. Scarani, H. De Riedmatten, J.P. Ansermet. Appl. Phys. Lett. 2000, v. 76, n. 7, p. 903.