

05

## Эффект Баркгаузена и порог перколяции в нанокompозитах металл–диэлектрик с аморфной структурой

© Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, Н.Е. Скрыбина, Л.В. Спивак,  
А.А. Шадрин

Воронежский технический университет  
Пермский государственный университет  
E-mail: levspivak@permonline.ru

Поступило в Редакцию 29 ноября 2002 г.

Сообщается об обнаружении новой перколяционной ситуации в нанокompозитах металл–диэлектрик, содержащих ферромагнитные компоненты. Она заключается в появлении при достижении некоторой концентрации металлических атомов синфазного поведения векторов спонтанной намагниченности отдельных наночастиц. Как результат, в структуре, состоящей из огромного числа ферромагнитных наночастиц, наблюдается перемагничивание макроскопического объема нанокompозита одним гигантским скачком Баркгаузена.

**Введение.** В настоящее время большое внимание уделяется исследованию свойств конденсированных сред, размеры структурных составляющих которых соизмеримы с межатомными расстояниями. К таким средам относятся нанокристаллические фрактальные агрегаты, нанокompозиты и т.д. Свойства таких образований во многом определяются не только свойствами сплавов и элементов, из которых они состоят, но в большей степени поверхностью раздела и размерами гранул, формирующими структуру [1,2].

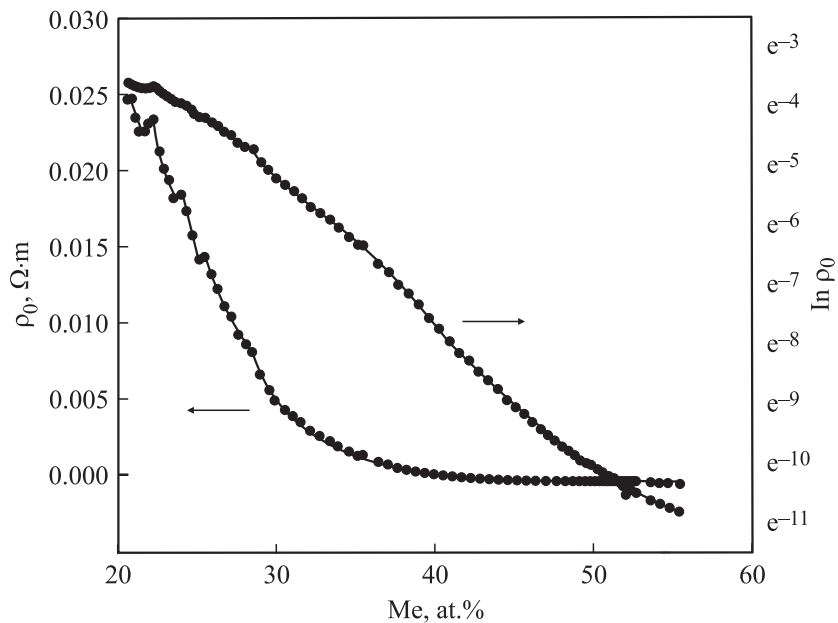
Большинство аномалий физических свойств (магнитных, оптических, магнитооптических и других) наблюдается в гранулированных композитах с концентрацией металлической фазы вблизи порога перколяции ( $X_c$ ), когда металлические наночастицы формируют проводящую кластерную структуру в диэлектрической матрице [3–7]. Точность определения порога перколяции и определяет в конечном итоге возможность получения комплекса уникальных физических свойств гранулированных нанокompозитов металл–диэлектрик и становится важнейшим элементом прогресса в данном научном направлении.

Экспериментальные и теоретические работы, посвященные магнитным свойствам композитов ферромагнитный металл–диэлектрик, показывают, что составы, находящиеся до порога перколяции, при комнатной температуре обладают суперпарамагнитными свойствами. Наноразмерная металлическая гранула рассматривается как ферромагнитная частица, имеющая собственный магнитный момент, равный сумме магнитных моментов атомов, входящих в ее состав. Если энергия магнитостатического взаимодействия между гранулами меньше  $kT$ , то корреляция между векторами намагниченности частиц отсутствует и композит обладает парамагнитными свойствами. При формировании бесконечной сетки соприкасающихся гранул создаются условия для обменного взаимодействия между атомами соседних гранул и материал приобретает ферромагнитные свойства [6].

Методы определения порога перколяции для этого типа материалов достаточно традиционны и заключаются, как правило, в построении зависимости электрического сопротивления от состава композита, имеющей характерный перегиб в этой точке. Применение для анализа магнитной структуры нанокристаллических композитов этого типа эффекта Баркгаузена с целью определения порога перколяции, эффективно используемого при изучении аморфных металлических сплавов [7–9], нам неизвестно.

**Методика исследования.** Для получения композиционных наноструктур металлический сплав–диэлектрик был применен метод ионно-лучевого распыления [10]. При напылении аморфных нанокompозитов использовалась составная мишень состава  $Co_{41}Fe_{39}B_{20}$  с закрепленными на ее поверхности пластинами из алюмооксида толщиной  $\sim 2$  мкм и шириной  $\sim 9$  мкм, расположенными перпендикулярно продольной оси сплавной мишени. Неравномерное расстояние между диэлектрическими пластинами позволяло плавно изменять соотношение объемов распыляемых магнитных и диэлектрических фаз композитов вдоль оси составной мишени и получать непрерывный спектр составов в одном технологическом цикле напыления.

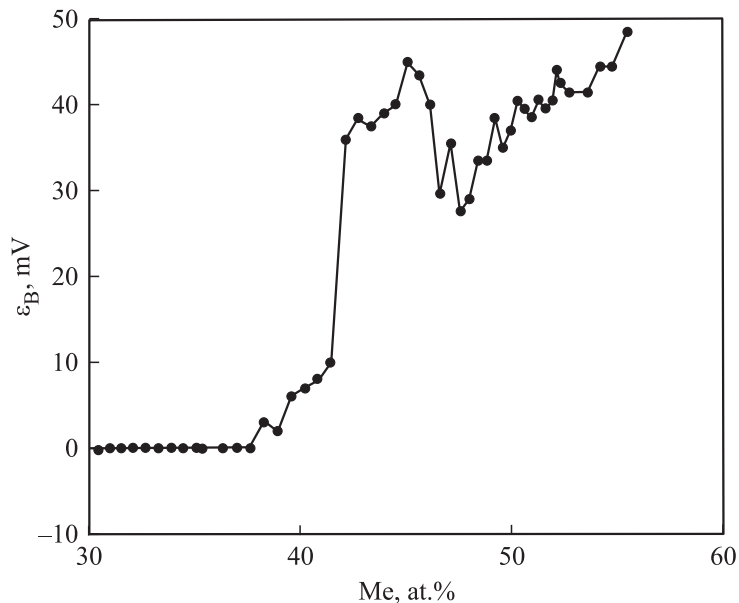
Для измерения удельного электрического сопротивления на постоянном токе использовался потенциометрический метод. Измерение эффекта Баркгаузена осуществляли с помощью специальной установки, в которой накладной магнит создавал магнитное поле в объеме образца. Датчик Баркгаузена представлял собой измерительную катушку, улавливающую магнитный поток от скачков Баркгаузена и преобразующую



**Рис. 1.** Влияние содержания, at.%, металлических атомов в композите на его удельное электросопротивление.

его в электродвижущую силу эффекта Баркгаузена,  $\varepsilon_B$ . Частота переключения магнитного поля составляла 50 Hz. Направление приложенного магнитного поля совпадало с направлением оси композита. Перемагничивание в объеме образца было однородным. Регистрация отдельных скачков Баркгаузена и другие измерения производили с помощью осциллографа PCS64i. Обработку экспериментальных данных осуществляли по специально созданной программе. Структура полученных аморфных композитов была исследована с помощью электронно-микроскопического анализа.

**Экспериментальные результаты и их обсуждение.** На рис. 1 показано влияние концентрации металлических атомов на удельное электросопротивление  $\rho_0$ . Данные по электросопротивлению представлены в линейных и логарифмических координатах. Хорошо видно, что, несмотря на то что электросопротивление меняется на несколько по-



**Рис. 2.** Интегральные значения электродвижущей силы эффекта Баркгаузена  $\varepsilon_B$  в зависимости от атомной концентрации металлических атомов в композите.

рядков, при переходе порога перколяции, расположенного в интервале концентраций от 40 до 45 at.% металлической фазы, точное определение такого порога неоднозначно.

Структура отдельных скачков Баркгаузена при перемагничивании композитов с различной концентрацией металлических атомов свидетельствует о наличии в материале магнитной структуры с одной или близкими ориентациями вектора спонтанной намагниченности гранул. С увеличением концентрации металлических атомов структура скачков несколько усложняется, и мы наблюдаем ряд небольших по величине сателлитов, появляющихся по обе стороны гигантского скачка перемагничивания. Объем композита, участвующий в процессе перемагничивания, имеет в нашем случае порядок  $0.2 \text{ mm}^3$ . Размер гранул по данным электронно-микроскопического анализа не превышает  $10 \text{ nm}$ . Следовательно, в процессе перемагничивания одновременно участвует  $10^{17} \div 10^{18}$  гранул. Возникает необычная с точки зрения

привычных представлений ситуация. Синхронное поведение вектора спонтанной намагниченности отдельных наночастиц свидетельствует о появлении мало известной перколяционной ситуации, связанной не с изменением типа электрической проводимости, как это обычно принято считать, а с возникновением некоторого механизма, обеспечивающего коллективный и самосогласованный отклик огромного числа практически неподвижных частиц на воздействие внешнего магнитного поля. При этом вектор спонтанной намагниченности каждой частицы вращается синхфазно с изменением направления намагничивающего поля и весь конгломерат ферромагнитных наночастиц ведет себя как один макроскопически значимый магнитный домен.

Необходимым следствием из полученных результатов является предположение о том, что природа скачков Баркгаузена в нашем случае не связана со скачкообразным смещением границ магнитных доменов, а имеет более сложную природу (например, механизм Нееля). Переход композита в это новое состояние вещества совершается в весьма узком и достаточно точно определяемом концентрационном интервале при  $X_c \approx 43$  at.% металлической фазы (рис. 2). Однако предлагаемый метод определения порога перколяции оказывается чувствительным и к начальным стадиям образования перколяционного кластера, начиная с  $X_c \approx 38$  at.%, когда образуются отдельные магнитные образования, увеличивающиеся в размерах по мере роста концентрации металлической фазы.

Таким образом, обнаружен новый тип перколяционной ситуации, связанный с коллективным процессом вращения вектора спонтанной намагниченности отдельных намагниченных наноразмерных частиц при формировании ими перколяционного кластера в гранулированных нанокompозитах металл–диэлектрик. Показана возможность для композитов с ферромагнитными наночастицами использовать эффект Баркгаузена как еще один способ определения порога перколяции.

## Список литературы

- [1] Калинин Ю.Е., Куцев С.Б., Неретин П.В. и др. // Журнал прикладной химии. 2000. Т. 73. В. 3. С. 439–443.
- [2] Золотухин И.В., Суходолов Б.Г., Андреевко А.С. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1997. Т. 66. В. 8. С. 556–558.
- [3] Vykov I.V., Ganhina E.A., Granovsky A.B. et al. // Physics of Solid State. 2000. V. 42. P. 487.

- [4] *Kalinin Yu.E., Sitnikov A.V., Stognei O.V.* et al. // *Material Science and Engineering*. 2001. V. 304–306. P. 941–945.
- [5] *Ganhina E., Granovsky A., Kumaritova M.* et al. // *Phys. Solid State*. 2000. V. 42. P. 1911.
- [6] *Стогней О.В., Калинин Ю.Е., Ситников А.В.* и др. // *ФММ*. 2001. Т. 91. № 1. С. 24–31.
- [7] *Скрябина Н.Е., Спивак Л.В., Кинев А.С.* и др. // *Письма в ЖТФ*. 2000. Т. 26. В. 21. С. 26–30.
- [8] *Спивак Л.В., Кинев А.С.* // *Вестник Пермского университета. Серия „Физика“*. 2000. В. 6. С. 9–12.
- [9] *Скрябина Н.Е., Спивак Л.В., Кинев А.С., Пименова Н.В.* // *Материаловедение*. 2001. № 6. С. 29–32.
- [10] *Калинин Ю.Е., Пономаренко А.Т., Ситников А.В.* и др. // *Физика и химия обработки материалов*. 2001. № 5. С. 14–20.