

Явление обменного сдвига в перовскитах



Е.Л. Фертман¹, А.В. Федорченко^{1,2}, А.В. Котляр¹, В.А. Десненко¹, Е. Čížmár²,
А. Baran³, D.D. Khalyavin⁴, А.Н. Salak⁵, V.V. Shvartsman⁶, А. Feher²

¹Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.П. Веркина НАН України
пр. Ленина, 47, г. Харьков, 61103, Украина
E-mail: Fertman@ilt.kharkov.ua

²Institute of Physics, Faculty of Science, P. J. Šafárik University in Košice, 9 Park Angelinum, Košice 04154, Slovakia

³Department of Physics, Faculty of Electrical Engineering and Informatics, Technical University of Košice
2 Park Komenského, Košice 042 00, Slovakia

⁴ISIS Facility, STFC, Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, Didcot, Oxfordshire, OX11 0QX, UK

⁵Department of Materials and Ceramic Engineering/CICECO, University of Aveiro, Aveiro 3810-193, Portugal

⁶Institute for Materials Science and Center for Nanointegration Duisburg-Essen (CENIDE), University of Duisburg-Essen
15 Universitätsstrasse, Essen 45141, Germany

Статья поступила в редакцию 10 июля 2015 г., опубликована онлайн 23 октября 2015 г.

Обнаружен обменный сдвиг петель гистерезиса в соединениях $(\text{Nd}_{1-x}\text{Y}_x)_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ ($x = 0; 0,1$), возникающий при охлаждении в магнитном поле ниже температур магнитного упорядочения и свидетельствующий о магнитном фазовом расслоении этих соединений при низких температурах. Оценен вклад ферромагнитной фазы в полную намагниченность соединений. Обнаружено, что замещение неодима иттрием приводит к увеличению содержания ферромагнитной фазы в допированном соединении $(\text{Nd}_{0,9}\text{Y}_{0,1})_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ по сравнению с исходным соединением $\text{Nd}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$. При этом ферромагнитная фаза в допированном соединении характеризуется меньшей коэрцитивной силой H_c и более прямоугольной петлей гистерезиса. Величина поля обменного сдвига H_{EB} немонотонно зависит от магнитного поля охлаждения H_{cool} , и в области достаточно больших полей $H_{cool} > 5$ кЭ примерно вдвое меньше для допированного соединения. Такое различие определяется меньшей величиной обменного взаимодействия и большей величиной намагниченности насыщения ферромагнитной фазы в $(\text{Nd}_{0,9}\text{Y}_{0,1})_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$.

Виявлено обмінний зсув петель гістерезису у сполуках $(\text{Nd}_{1-x}\text{Y}_x)_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ ($x = 0; 0,1$), що виникає при охолодженні у магнітному полі нижче температур магнітного впорядкування та свідчить про магнітне фазове розшарування цих сполук при низьких температурах. Оцінено внесок ферромагнітної фази в повну намагніченість сполук. Виявлено, що заміщення неодиму ітрієм призводить до збільшення змісту ферромагнітної фази у допованій сполуці $(\text{Nd}_{0,9}\text{Y}_{0,1})_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ в порівнянні з базовою сполукою $\text{Nd}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$. При цьому ферромагнітна фаза в допованій сполуці характеризується меншою коерцитивною силою H_c та більш прямокутною петлею гістерезису. Величина поля обмінного зсуву H_{EB} немонотонно залежить від магнітного поля охолодження H_{cool} , та в області досить великих полів $H_{cool} > 5$ кЕ приблизно вдвічі менше для допованої сполуки. Така різниця обумовлена меншою величиною обмінної взаємодії та більшою величиною намагніченості насичення ферромагнітної фази в $(\text{Nd}_{0,9}\text{Y}_{0,1})_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$.

PACS: 64.75.Nx Фазовая сепарация и сегрегация в твердых растворах;

71.70.Gm Обменные взаимодействия;

75.60.Ej Кривые намагниченности, гистерезис, эффект Баркгаузена и связанные с ним;

75.47.Lx Магнитные оксиды.

Ключевые слова: гистерезис, кривые намагниченности, обменный сдвиг, фазовое расслоение.

1. Введение

Обменное взаимодействие на границе между антиферромагнитными (АФМ) и ферромагнитными (ФМ) слоями в композиционных материалах приводит к дополнительной однонаправленной анизотропии намагниченности, следствием которой является эффект обменного смещения (exchange bias, EB) [1–3]. Этот эффект проявляется как сдвиг петель магнитного гистерезиса вдоль оси магнитного поля, когда такой материал охлажден во внешнем магнитном поле ниже температур магнитных упорядочений. Явление EB активно экспериментально изучается в настоящее время с целью практического применения в записывающих устройствах, электронике и спинтронике. При этом основное внимание уделяется искусственно создаваемым системам, таким как наночастицы, покрытые оболочкой, обменно-связанной с телом частицы [1,4], или тонкие пленки, состоящие из обменно-связанных между собой ФМ и АФМ слоев [2,5,6,7]. В материалах, которые являются однофазными при высоких температурах и становятся спонтанно фазоворасслоенными при низких температурах благодаря фазовым превращениям 1-го рода, эффект обменного сдвига был обнаружен сравнительно недавно. Среди таких соединений можно отметить перовскитоподобные манганиты [8–13] и кобальтиты [14–17]. Так, было показано, что спонтанно фазоворасслоенное соединение $\text{Pr}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ представляет собой антиферромагнитную матрицу с вкрапленными ферромагнитными кластерами [8]. Обменное взаимодействие между ФМ областями и окружающей их АФМ матрицей создает однонаправленную анизотропию и приводит к эффекту обменного сдвига.

В качестве общего теоретического подхода к описанию эффекта были разработаны теоретические модели EB для АФМ монокристаллов с идеальными [18–20] или неидеальными [21,22] границами. Позднее также были предложены более сложные теоретические модели, которые применимы для описания EB в поликристаллических АФМ–ФМ спонтанно фазоворасслоенных образцах [23].

Манганиты $(\text{Nd}_{1-x}\text{Y}_x)_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ ($x = 0; 0,1$) со структурой перовскита, обладающие колоссальным магниторезистивным эффектом, так же, как и $\text{Pr}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$, являются соединениями, для которых спонтанное фазовое расслоение во многом определяет их свойства [24,25]. Так, соединение $\text{Nd}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$, являясь однофазным и парамагнитным при высоких температурах, при низких температурах представляет собой смесь АФМ и ФМ фаз. Мартенситный характер зарядового упорядочения в области $T_{co} \sim 212$ К приводит к фазовому расслоению на зарядово-упорядоченную и зарядово-неупорядоченную фазы; на базе этого электронного расслоения формируется магнитное фазовое расслоение. Ниже комнатной температуры соединение

испытывает несколько последовательных магнитных фазовых переходов, из которых два антиферромагнитных при $T_{N1} \sim 130$ К и $T_{N2} \sim 80$ К и ферромагнитный при $T_C \sim 70$ К, что и приводит к основному состоянию, представляющему собой АФМ зарядово-упорядоченную матрицу с ФМ зарядово-неупорядоченными включениями (рис. 1). По данным нейтронографии суммарная доля АФМ фазы составляет примерно 82%, доля ФМ фазы — примерно 18% при температуре 4 К [26]. Такое АФМ–ФМ фазово-расслоенное низкотемпературное состояние подтверждается и исследованиями с помощью сканирующей SQUID-микроскопии [27].

Наши предыдущие исследования обнаружили в соединении $\text{Nd}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ явление EB [13], которое тесно связано со спонтанным фазовым расслоением. Явление обменного сдвига немонотонно зависит от температуры и магнитного поля охлаждения, полностью исчезая с исчезновением ФМ фазы при нагреве. В настоящей работе мы продолжили исследования явления EB в манганитах системы $(\text{Nd}_{1-x}\text{Y}_x)_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ ($x = 0; 0.1$).

2. Эксперимент

Поликристаллические образцы $(\text{Nd}_{1-x}\text{Y}_x)_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ ($x = 0; 0,1$) были получены стандартным методом твердотельного спекания смеси порошков Nd_2O_3 , Y_2O_3 , CaCO_3 и Mn_2O_3 , взятых в требуемой пропорции. После предварительного отжига при 900 °С смесь порошков была спрессована в форму таблетки и запекалась при 1500 °С на протяжении 10 часов. Затем таблетки медленно охлаждались в печи со скоростью 80 °С в час. Проведенный рентгеноструктурный анализ свидетельствует об однофазности полученных образцов.

Нейтронографические исследования показали, что при комнатной температуре кристаллическая структура

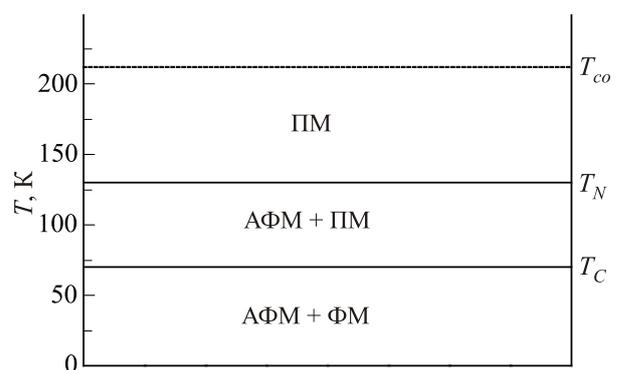


Рис. 1. Магнитная фазовая диаграмма соединения $\text{Nd}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$. Горизонтальные линии соответствуют температурам переходов между различными магнитными состояниями: ПМ — парамагнитная фаза, АФМ + ПМ — область сосуществования антиферромагнитной и парамагнитной фаз и АФМ + ФМ — область сосуществования антиферромагнитной и ферромагнитной фаз соответственно.

ра обоих соединений является орторомбической (пространственная группа $Pnma$) [28], что хорошо согласуется с данными работы [29].

Исследование магнитных характеристик проводилось с помощью системы Quantum Design Magnetic Properties Measurement System (MPMS), а также с использованием некоммерческого SQUID-магнитометра [30]. Петли магнитного гистерезиса были измерены при температуре 10 К для исходного $\text{Nd}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ и допированного $(\text{Nd}_{0,9}\text{Y}_{0,1})_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ соединений, охлажденных в нулевом магнитном поле (zero field cooling, ZFC) и в магнитных полях (field cooling, FC) $H_{\text{cool}} = 0,5, 0,8, 1, 2, 5, 10$ и 20 кЭ. В отличие от наших более ранних исследований [13], где петли магнитного гистерезиса $M(H)$ измеряли между $\pm H_{\text{cool}}$, в настоящей работе они были измерены между ± 20 кЭ. После каждого измерения гистерезисных петель исследуемый образец нагревали до 320 К и выдерживали при этой температуре в течение 0,5 часа.

3. Результаты и обсуждение

Принимая во внимание магнитно фазово-расслоенное состояние соединений $(\text{Nd}_{1-x}\text{Y}_x)_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ ($x = 0; 0,1$) при низких температурах, которые представляют собой антиферромагнитную матрицу с вкрапленными ферромагнитными включениями, следует ожидать обменное взаимодействие на границах раздела сосуществующих АФМ и ФМ фаз, которое проявляется как эффект ЕВ. Было обнаружено, что все петли гистерезиса $M(H)$ обоих исследованных соединений, измеренные после охлаждения в нулевом магнитном поле (ZFC), симметричны относительно начала координат, в то время как петли, измеренные после охлаждения образцов в магнитном поле, смещены в сторону отрицательных значений магнитного поля (рис. 2, рис. 3).

В полях выше $H \sim 7$ кЭ петли гистерезиса обоих соединений «схлопнуты», а полный магнитный момент M практически линейно зависит от магнитного поля, что согласуется с данными работы [31]. Это свидетельствует о том, что в полях выше 7 кЭ намагниченность ФМ фазы достигла насыщения, в то время как намагниченность АФМ фазы продолжает увеличиваться. Поскольку магнитный момент АФМ фазы M_{AFM} линейно зависит от поля, то можно выделить магнитный вклад ФМ фазы M_{FM} в общую намагниченность, вычитая из нее АФМ вклад:

$$M_{FM} = M - M_{AFM} = M - (dM/dH)H, \quad (1)$$

где значение производной dM/dH вычисляется на линейном участке зависимости $M(H)$, т.е. в высоких полях.

На рис. 4(а) представлены петли гистерезиса, характеризующие ферромагнитные фазы в обоих исследуе-

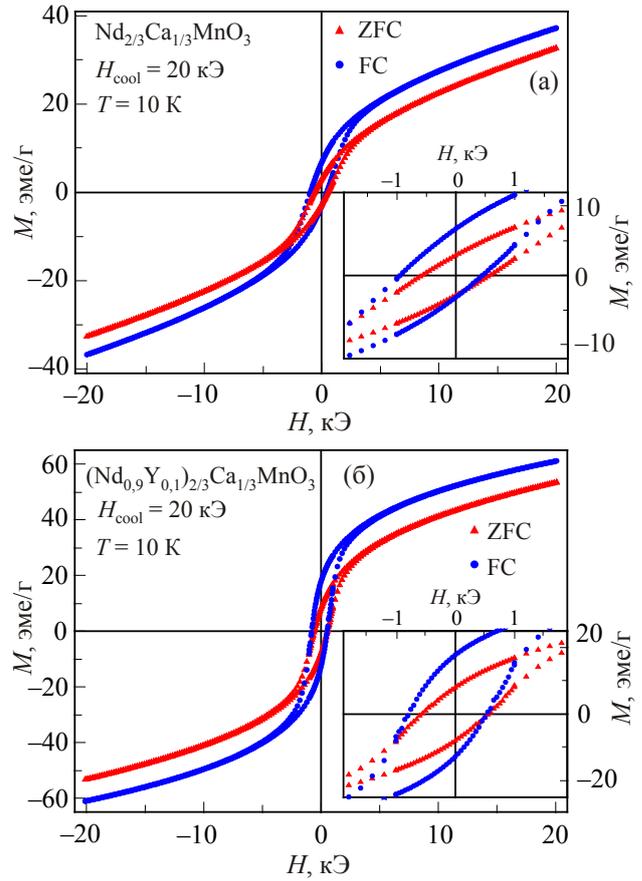


Рис. 2. (Онлайн в цвете) Петли магнитного гистерезиса соединений $\text{Nd}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ (а) и $(\text{Nd}_{0,9}\text{Y}_{0,1})_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ (б), измеренные при температуре 10 К после охлаждения в нулевом магнитном поле (ZFC) и в магнитном поле $H_{\text{cool}} = 20$ кЭ (FC). На вставках изображены увеличенные фрагменты центральных областей петель гистерезиса.

мых соединений (АФМ вклад вычтен). Намагниченность насыщения ферромагнитной фазы M_{S-FM} в допированном соединении $(\text{Nd}_{0,9}\text{Y}_{0,1})_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ примерно в два раза больше по сравнению с исходным соединением $\text{Nd}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$, ~ 42 и 19 эме/г соответственно. Допирование иттрием приводит к резкому увеличению ФМ фазы в системе. При этом ферромагнитная фаза в допированном соединении является более магнитомягкой, о чем свидетельствует меньшая величина коэрцитивной силы H_c (вставка к рис. 4(а), рис. 5(б)) и более прямоугольная форма петли гистерезиса (рис. 4(б)).

Охлаждение в магнитном поле (FC процесс) индуцирует сдвиг петель магнитного гистерезиса. Поле обменного сдвига H_{EB} и коэрцитивная сила H_c были определены как

$$H_{EB} = (H_1 + H_2)/2, \quad (2)$$

$$H_c = (H_2 - H_1)/2, \quad (3)$$

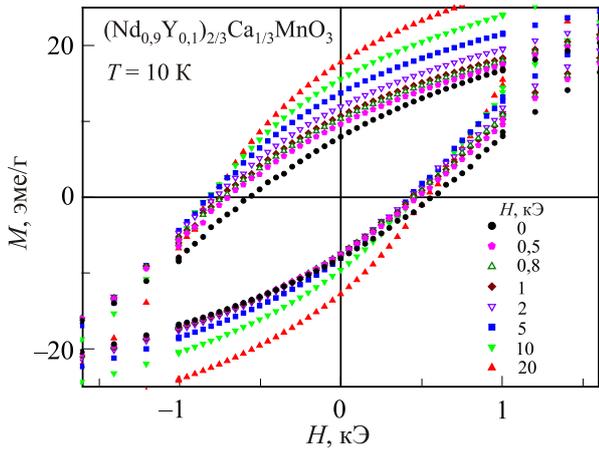


Рис. 3. (Онлайн в цвете) Петли магнитного гистерезиса соединения $(\text{Nd}_{0.9}\text{Y}_{0.1})_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$, измеренные при температуре 10 К после охлаждения в магнитных полях $H_{\text{cool}} = 0,5, 0,8, 1, 2, 5, 10$ и 20 кЭ.

где H_1 и H_2 — значения магнитных полей, при которых намагниченность обращается в нуль (рис. 4(а), вставка). Так, в образце $(\text{Nd}_{0.9}\text{Y}_{0.1})_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$, охлажденном до 10 К во внешнем магнитном поле $H_{\text{cool}} = 5$ кЭ, магнитный момент ФМ фазы изменяет знак при $H_1 \sim -0,853$ кЭ. В случае восходящей ветви петли гистерезиса магнитный момент ФМ фазы изменяет знак при $H_2 \sim 0,448$ кЭ. Подставляя эти данные в выражения (2) и (3), получаем значения поля обменного сдвига $H_{EB} \sim -0,202$ кЭ и коэрцитивную силу $H_c \sim 0,650$ кЭ. Обменный сдвиг свидетельствует о наличии однонаправленных анизотропных обменных взаимодействий, которые разворачивают магнитные моменты ФМ кластеров к их первоначальному направлению, когда магнитное поле выключают.

На рис. 5 представлена эволюция эффекта обменного смещения в зависимости от магнитного поля охлаждения. Поле обменного сдвига H_{EB} , как и коэрцитивная сила H_c , немонотонно зависят от магнитного поля охлаждения H_{cool} . Полученные значения коэрцитивной силы оказались значительно выше для исходного соединения $\text{Nd}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ (примерно на 15%), что говорит о большей магнитной жесткости ФМ фазы в этом соединении. В низких магнитных полях, $H_{\text{cool}} < 2$ кЭ, эффект обменного смещения резко возрастает с увеличением поля охлаждения, что характерно для обоих исследованных соединений (рис. 5). Это связано с тем, что в низких магнитных полях не все ФМ кластеры участвуют в формировании ЕВ, поскольку поле анизотропии некоторых ФМ частиц больше, чем внешнее магнитное поле, стремящееся развернуть эти частицы. С увеличением магнитного поля все большее количество ФМ кластеров принимает участие в формировании эффекта ЕВ, что приводит к его резкому росту. В достаточно больших магнитных полях, $H_{\text{cool}} > 5$ кЭ, зависимость

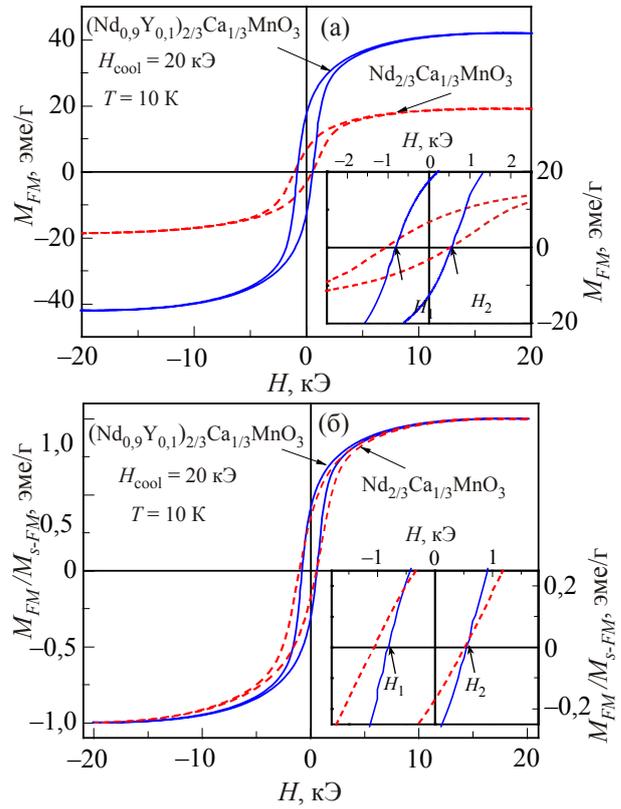


Рис. 4. (Онлайн в цвете) Вклад ферромагнитной фазы в полную намагниченность соединений $(\text{Nd}_{1-x}\text{Y}_x)_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ ($x = 0; 0,1$), охлажденных в магнитных полях $H_{\text{cool}} = 20$ кЭ, при температуре 10 К (а). Ферромагнитные вклады нормированы на намагниченность насыщения M_{s-FM} ферромагнитной фазы (б). На вставках изображен увеличенный фрагмент центральной области петель гистерезиса.

$H_{EB}(H_{\text{cool}})$ выходит на «квази» насыщение, при этом поле обменного сдвига H_{EB} примерно в два раза больше в родительском соединении $\text{Nd}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$, по сравнению с допированным $(\text{Nd}_{0.9}\text{Y}_{0.1})_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$.

Известно, что эффект обменного сдвига пропорционален обменному интегралу J_{ex} и обратно пропорционален намагниченности насыщения ферромагнитной фазы M_{s-FM} [18]:

$$H_{EB} \sim J_{ex} / M_{s-FM} \quad (4)$$

Поэтому наблюдаемое различие в величине эффекта обменного сдвига для изучаемых соединений можно связать с меньшей величиной обменного взаимодействия и большей величиной намагниченности ФМ фазы в допированном $(\text{Nd}_{0.9}\text{Y}_{0.1})_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$. Это хорошо согласуется с тем, что температуры всех магнитных фазовых переходов в допированном иттрием соединении смещены в сторону низких температур на $\sim 20-30$ К, по сравнению с родительским соединением [32], что свидетельствует о меньшей величине обмена J_{ex} в допированном

4. Выводы

Обнаружен обменный сдвиг петель гистерезиса в соединениях $(\text{Nd}_{1-x}\text{Y}_x)_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ ($x = 0; 0,1$), возникающий при охлаждении в магнитном поле ниже температур магнитных упорядочений и свидетельствующий о магнитном АФМ–ФМ фазовом расслоении этих соединений при низких температурах. Исследована зависимость поля обменного сдвига от магнитного поля охлаждения этих соединений, находящихся в фазово-расслоенном АФМ–ФМ состоянии, в магнитных полях до 20 кЭ. Выделен вклад ФМ фаз в полную намагниченность исследуемых соединений. Обнаружено, что намагниченность насыщения ферромагнитной фазы в допированном соединении $(\text{Nd}_{0,9}\text{Y}_{0,1})_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ примерно в два раза больше, по сравнению с исходным $\text{Nd}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$, что позволяет сделать заключение о большем количестве ФМ фазы в первом. При этом ферромагнитная фаза в $(\text{Nd}_{0,9}\text{Y}_{0,1})_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ является более магнитомягкой, о чем свидетельствует меньшая величина коэрцитивной силы H_c и более прямоугольная форма петли гистерезиса. Обнаружено также, что величина поля обменного сдвига H_{EB} , немонотонно зависящего от магнитного поля охлаждения H_{cool} , в области достаточно больших полей $H_{cool} > 5$ кЭ примерно вдвое меньше для допированного соединения. Такое различие определяется меньшей величиной обменного взаимодействия и большей величиной намагниченности насыщения ФМ фазы в $(\text{Nd}_{0,9}\text{Y}_{0,1})_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$.

Настоящая работа была поддержана проектом TUMOCES. Этот проект финансируется Европейской Комиссией в рамках программы HORIZON-2020 фонда Марии Склодовской-Кюри, грант № 645660. Автор А.В. Федорченко благодарит за финансовую поддержку Словацкое академическое информационное агентство (SAIA), которое в рамках Национальной стипендиальной программы (NSP) Словацкой Республики поддержало данное исследование (грант № 12509). Авторы благодарны также поддержке Словацкого агентства в рамках проектов VEGA 1/0145/3 и APVV-0132-11.

Авторы благодарны академику НАН Украины Н.Ф. Харченко за помощь и плодотворное обсуждение результатов исследования.

1. W.H. Meiklejohn and C.P. Bean, *Phys. Rev. B* **102**, 1413 (1956).
2. J. Nogués and I.K. Schuller, *J. Magn. Magn. Mater.* **192**, 203 (1999).
3. S. Giri, M. Patra, and S. Majumdar, *J. Phys.: Condens. Matter.* **23**, 073201 (2011).
4. V. Skumryev, S. Stoyanov, Y. Zhang, G. Hadjipanayis, D. Givord, and J. Nogués, *Nature (London)* **423**, 850 (2003).
5. K. O'Grady, L.E. Fernandez-Outon, and G. Vallejo-Fernandez, *J. Magn. Magn. Mater.* **322**, 883 (2010).
6. J.F. Ding, Y.F. Tian, W.J. Hu, W.N. Lin, and T. Wu, *Appl. Phys. Lett.* **102**, 032401 (2013).

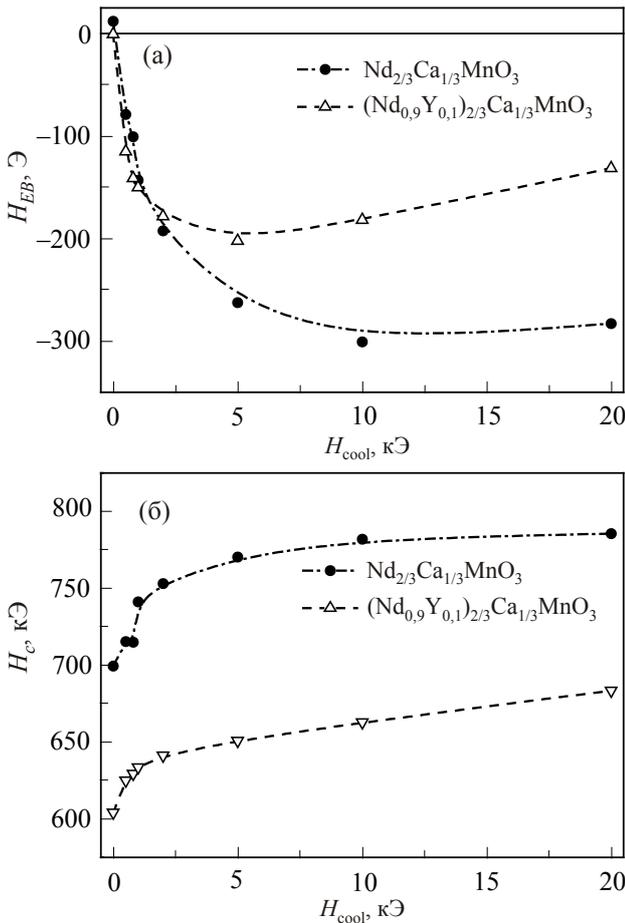


Рис. 5. Зависимость поля обменного сдвига H_{EB} (а) и коэрцитивной силы H_c (б) от магнитного поля охлаждения H_{cool} для соединений $(\text{Nd}_{1-x}\text{Y}_x)_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ ($x = 0; 0,1$) при температуре 10 К.

соединении. Как было показано выше, намагниченность насыщения ФМ фазы M_{S-FM} в нем также значительно больше. Поэтому величина H_{EB} должна быть меньше в допированном соединении, что согласуется с экспериментом (рис. 5(a)).

Также нельзя исключить влияние различной площади интерфейса АФМ–ФМ на эффект обменного смещения вследствие различной величины и формы ФМ включений в двух исследуемых соединениях. Так, увеличение размеров включений при одинаковом содержании ферромагнитной фазы должно было бы привести к уменьшению площади интерфейса и соответственно уменьшению эффекта ЕВ. Однако в изучаемых соединениях присутствует разное содержание ферромагнитной фазы, а оценка формы и дисперсности ферромагнитных кластеров выходит за рамки настоящей работы. Тем не менее, исходя из меньшей величины H_{EB} в допированном соединении, можно заключить, что суммарное влияние геометрических факторов меньше, чем влияние J_{ex} и M_{S-FM} .

7. J.F. Ding, O.I. Lebedev, S. Turner, Y.F. Tian, W.J. Hu, J.W. Seo, C. Panagopoulos, W. Prellier, G. Van Tendeloo, and T. Wu, *Phys. Rev. B* **87**, 054428 (2013).
8. D. Niebieskikwiat and M.B. Salamon, *Phys. Rev. B* **72**, 174422 (2005).
9. T. Qian, G. Li, T. Zhang, T.F. Zhou, X.Q. Xiang, X.W. Kang, and X.G. Li, *Appl. Phys. Lett.* **90**, 012503 (2007).
10. Shilpi Karmakar, S. Taran, Esa Bose, B.K. Chaudhuri, C.P. Sun, C.L. Huang, and H.D. Yang, *Phys. Rev. B* **77**, 144409 (2008).
11. T. Zhang and M. Dressel, *Phys. Rev. B* **80**, 014435 (2009).
12. A. Feher, V. Desnenko, E. Fertman, S. Dolya, M. Kajňaková, and A. Beznosov, *Fiz. Nizk. Temp.* **38**, 828 (2012) [*Low Temp. Phys.* **38**, 657 (2012)].
13. E. Fertman, S. Dolya, V. Desnenko, L.A. Pozhar, M. Kajňaková, and A. Feher, *J. Appl. Phys.* **115**, 203906 (2014).
14. Yan-kun Tang, Young Sun, and Zhao-hua Cheng, *J. Appl. Phys.* **100**, 023914 (2006).
15. Yan-kun Tang, Young Sun, and Zhao-hua Cheng, *Phys. Rev. B* **73**, 174419 (2006).
16. M. Patra, S. Majumdar, and S. Giri, *J. Appl. Phys.* **107**, 033912 (2010).
17. R. Pradheesh, S. Nair Harikrishnan, V. Sankaranarayanan, and K. Sethupathi, *Appl. Phys. Lett.* **101**, 142401 (2012).
18. W.H. Meiklejohn, *J. Appl. Phys.* **33**, 1328 (1962).
19. D. Mauri, E. Kay, D. Scholl, and J.K. Howard, *J. Appl. Phys.* **62**, 3047 (1987).
20. A.G. Grechnev, A.S. Kovalev, and M.L. Pankratova, *Fiz. Nizk. Temp.* **38**, 1184 (2012) [*Low Temp. Phys.* **38**, 937 (2012)].
21. A. Kovalev and M. Pankratova, *Superlatt. Microstruct.* **73**, 275 (2014).
22. A.P. Malozemoff, *J. Appl. Phys.* **63**, 3874 (1988).
23. M.D. Stiles and R.D. McMichael, *Phys. Rev. B* **59**, 3722 (1999).
24. А.Б. Безносков, Е.Л. Фертман, В.А. Десненко, *ФНТ* **34**, 790 (2008) [*Low Temp. Phys.* **34**, 624 (2008)].
25. E. Fertman, S. Dolya, V. Desnenko, A. Beznosov, M. Kajňaková, and A. Feher, *J. Magn. Magn. Mater.* **324**, 3213 (2012).
26. A. Beznosov, E. Fertman, V. Desnenko, M. Kajňaková, and A. Feher, *J. Magn. Magn. Mater.* **323**, 2380 (2011).
27. X.-J. Fan, H. Koinuma, and T. Hasegawa, *Phys. Rev. B* **65**, 144401 (2002).
28. E. Fertman, D. Sheptyakov, A. Beznosov, V. Desnenko, and D. Khalyavin, *J. Magn. Magn. Mater.* **293**, 787 (2005).
29. K. Liu, X.W. Wu, K.H. Ahn, T. Sulchek, C.L. Chien, and John Q. Xiao, *Phys. Rev. B* **54**, 3007 (1996-1).
30. А.В. Федорченко, В.Ю. Ляхно, В.И. Шнырков, *ВАИТ*, № 1, 150 (2010).
31. R.-M. Thomas, V. Skumryev, J.M.D. Coey, and S. Wirth, *J. Appl. Phys.* **85**, 5384 (1999).
32. E. Fertman, A. Beznosov, D. Sheptyakov, V. Desnenko, M. Kajnakova, A. Feher, and D. Khalyavin, *J. Magn. Magn. Mater.* **321**, 316 (2009).

Exchange bias phenomenon in (Nd_{1-x}Y_x)_{2/3}Ca_{1/3}MnO₃ (x = 0; 0.1) perovskites

E.L. Fertman, A.V. Fedorchenko, O.V. Kotlyar,
V.O. Desnenko, E. Čižmár, A. Baran, D.D. Khalyavin,
A.N. Salak, V.V. Shvartsman, and A. Feher

Exchange bias phenomenon evident of antiferromagnetic–ferromagnetic phase segregated state has been observed in (Nd_{1-x}Y_x)_{2/3}Ca_{1/3}MnO₃ (x = 0; 0.1) compounds at low temperatures. A contribution to the total magnetization of the compounds due to the ferromagnetic phase has been evaluated. It has been found that yttrium doping leads to the growth of the ferromagnetic phase fraction. The ferromagnetic phase in the doped compound has a lower coercivity H_c and more rectangular form of the hysteresis loop. The values of the exchange bias field H_{EB} and coercivity are found to be strongly dependent on the cooling magnetic field H_{cool} . In sufficiently high magnetic fields, $H_{cool} > 5$ kOe, the H_{EB} value is approximately twice in the doped compound than in the parent compound. This difference is attributed to the lower exchange interaction and the higher saturation magnetization of the ferromagnetic phase in (Nd_{0.9}Y_{0.1})_{2/3}Ca_{1/3}MnO₃.

PACS: 64.75.Nx Phase separation and segregation in solid solutions;
71.70.Gm Exchange interactions;
75.60.Ej Magnetization curves, hysteresis, Barkhausen and related effects;
75.47.Lx Magnetic oxides.

Keywords: hysteresis, magnetization curves, exchange bias, phase segregated state.