

Исследование спинтронного материала $\text{EuO}:\text{Fe}$ методом мессбауэровской спектроскопии

А. С. Борухович^{1)*+}, Н. И. Игнатъева*, К. И. Янушкевич[∇], А. И. Стогний[∇], Ю. А. Федотова[∇]

*Институт химии твердого тела Уральского отд. РАН, 620041 Екатеринбург, Россия

⁺Российский гос. проф.-пед. университет, 620012 Екатеринбург, Россия

[∇]ГО НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, 220072 Минск, Беларусь

Поступила в редакцию 12 января 2009 г.

Методами мессбауэровской спектроскопии при комнатной температуре исследованы состояния железа и европия спинтронного композита $\text{EuO}:\text{Fe}$. В обоих случаях установлено проявление в спектрах двух наборов линий, ответственных за проявление ферромагнетизма и суперпарамагнетизма наночастиц металлического железа в композите и за присутствие в ее матрице, наряду с основным состоянием иона Eu^{+2} , доли европия в состоянии окисления Eu^{+3} , соответственно. Последнее обуславливает возможность частичной спиновой поляризации парамагнитных ионов европия в кластерах Eu-Fe-O и повышенную удельную намагниченность композита.

PACS: 75.25.+z, 85.75.-d

Возможность реального создания полевого спинового транзистора с участием ферромагнитного полупроводникового композита $\text{EuO}:\text{Fe}$, способного инжектировать спин-поляризованный ток в немагнитный полупроводник GaAs при комнатных (и выше) температурах на достаточно высоком уровне его спиновой поляризации (до 70%), в немалой степени обусловлена повышенным значением удельной намагниченности композита по отношению к процентному содержанию в нем металлического железа (до 25 вес.%) и соответствующего ему магнитного момента насыщения [1, 2]. Это, несомненно, положительное для полупроводниковой спинтроники качество данного композита может быть обусловлено как вкладом суперпарамагнитных наночастиц железа в композите, так и возможностью ионов железа частично вступать в химическую связь с ионами матрицы по механизму непрямого $d-f$ -обмена, предложенного авторами [3], с образованием ферромагнитных кластеров Eu-Fe-O . Причем, электронные спины ионов европия, локализованные в узких f -зонах запрещенной зоны монооксида, должны быть поляризованы в таких кластерах в соответствии с намагниченностью примесных центров – ионов железа. Оба эти вклада проявляются в температурной зависимости намагниченности композита как в объемном материале, так и в его пленках наноразмерной толщины по фиксации, в первом случае, температуры блокировки наночастиц Fe в области 25–30 К в условиях охлаждения образца

без поля (ZFC) и в поле (FC), а во-втором – перегиба намагниченности при 480 К, характерного для ферромагнитного разупорядочения (кластеров) [4, 5].

В настоящем сообщении в дополнение к упомянутым магнитным исследованиям приводятся результаты изучения мессбауэровских спектров композита, выполненные на изотопах ^{57}Fe и ^{151}Eu . Мессбауэровские спектры снимались на спектрометрах MC-2201 при комнатной температуре с источниками ^{57}Fe и $^{151}\text{Sm}_2\text{O}_3$. При этом спектры железа снимались как на поликристаллическом порошке композита, так и на пленках того же состава толщиной до 500 нм. Спектры Eu-151 получены только на порошках.

На рис.1 представлены мессбауэровские спектры ^{57}Fe объемных образцов композита, выполненных в виде порошка (P) и таблетки (T). Они содержат как минимум две шестерки зеемановских линий: одна с $H_{\text{эфф}} = 32.8$ Тл, изомерный сдвиг $\delta = 0$, $\Delta E = 0$, другая с $H_{\text{эфф}} = 19.2$ Тл, $\delta = +0.20$ мм/с, $\Delta E = 0.005$ мм/с, относящихся соответственно к $\alpha\text{-Fe}$ и кластерам Eu-Fe-O . Относительная интенсивность секстетов $I(\alpha\text{-Fe}) \approx 0.72$; $I(\text{Eu-Fe-O}) \approx 0.28$. Из чего можно заключить, что присутствие железа в композите, в основном, соответствует его свободному (металлическому) состоянию. Доля ферромагнитных кластеров в нем значительно меньше, что соответствует невозможности образования твердых растворов замещения Eu на Fe в решетке EuO . Проявление ионного состояния железа в композите следует рассматривать в качестве примесных центров, обра-

¹⁾e-mail: A.S.Bor@rsvpu.ru

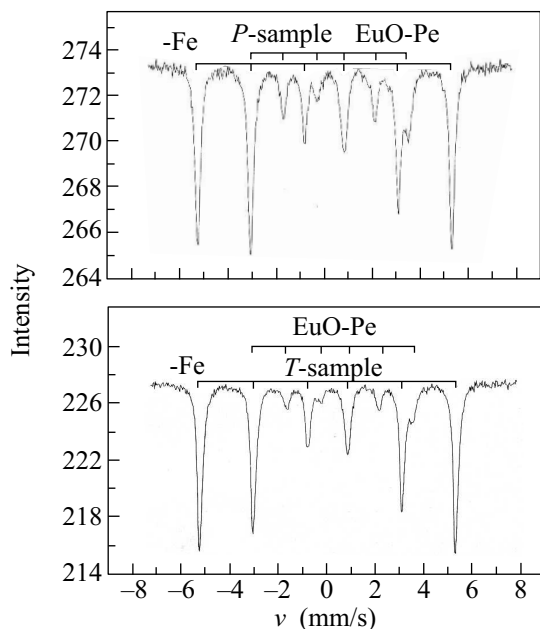


Рис.1. Мессбауэровские спектры ^{57}Fe порошка (*P*) и таблетки (*T*) композита $\text{EuO}:\text{Fe}$ при комнатной температуре

зующих кластеры $\text{Eu}-\text{Fe}-\text{O}$ в результате осуществления химической связи по вышеназванному механизму.

Мессбауэровские спектры ^{57}Fe пленок, полученных по технологии работы [2] из порошка и из таблетки (рис.2), представляют собой синглет с изомерным

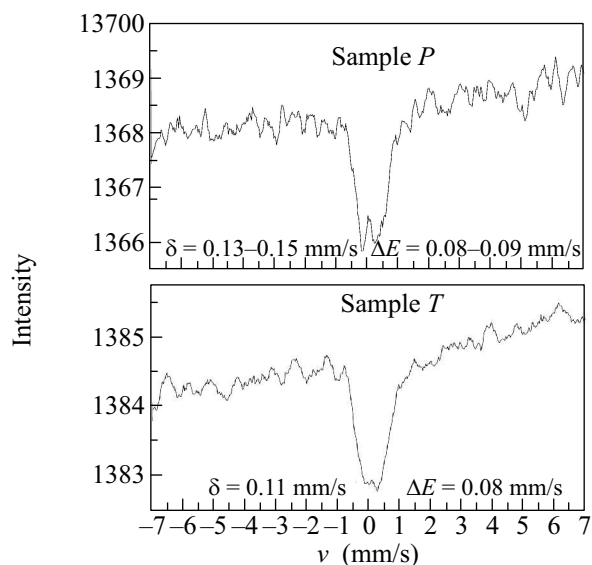


Рис.2. Мессбауэровские спектры ^{57}Fe тонких пленок композита

сдвигом $\delta = +0.20$ мм/с и очень слабым расщеплением, характерным для проявления суперпарамагнетизма наночастиц $\alpha\text{-Fe}$.

Рис.3 иллюстрирует мессбауэровский спектр ^{151}Eu порошка композита. Он также представляет

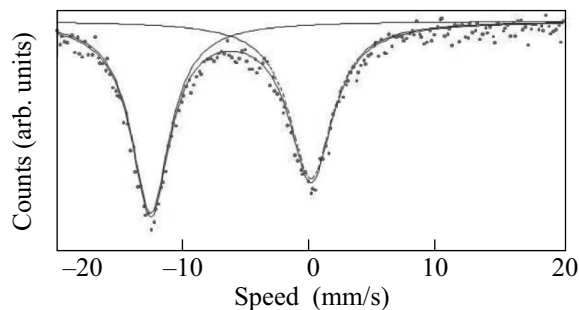


Рис.3. Мессбауэровский спектр ^{151}Eu порошка композита при комнатной температуре

собой наложение двух линий, характеризующихся, соответственно, изомерным сдвигом $\delta = -12.6$ мм/с, ширина на полувысоте 3.7 мм/с, и $\delta = +0.02$ мм/с, ширина на полувысоте 4.1 мм/с. Первая линия отвечает парамагнитному иону Eu^{2+} матрицы, вторая ответственна за проявление валентного состояния Eu^{3+} . Такие изомерные сдвиги мессбауэровских спектров ^{151}Eu в композите отвечают положению названных ионов в решетках EuO и Eu_2O_3 [6]. Полученные спектры и положение в них изомерных сдвигов ионов Eu^{2+} и Eu^{3+} находятся в хорошем согласии с мессбауэровским исследованием микрорешеток магнитного полупроводника EuS , вкрапленных в тонкие пленки оксидов TiO_2 , Al_2O_3 и SiO_2 [7].

Присутствие ионов Eu^{3+} в композите, с одной стороны, можно рассматривать в качестве примесной фазы полтораоксида, обусловленной условиями синтеза монооксида европия или композита $\text{EuO}:\text{Fe}$ (высокотемпературное восстановление Eu_2O_3 или смеси $\text{Eu}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ углеродом [8]). По результатам химического и рентгеноспектрального анализов ее присутствие в композите может составлять ~ 1 вес.%. С другой стороны, интенсивность линии состояния ионов Eu^{3+} (~ 0.55) в спектре, сравнивая с таковой для ионного состояния Eu^{2+} (~ 0.45), может указывать на проявление в композите индукционного эффекта – влияния атомов железа на электронную плотность на ядрах ^{151}Eu . Это соответствует присутствию непрямого (через *p*-состояния кислорода) *d-f*-обмена между железом и европием с образованием вышеназванных кластеров. Даже частичный перенос электронной плотности от Eu^{2+} к железу будет приводить к поляризации спинов этих ионов. В данных условиях это равносильно проявлению их ионного состояния в кластере как Eu^{3+} , а состояния иона железа

как Fe^+ . В результате ферромагнитный момент такого кластера при $T > 70$ К (температуры ферромагнитного разупорядочения фазы EuO), обусловленный спиновой поляризацией парамагнитных ионов европия из ближайшего окружения примесного иона Fe^+ и локализованный на нем, оказывается бóльшим (более чем на 10 единиц в $\text{A}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$), чем свойственен чистому железу при этих температурах. А это, как отмечено выше, приводит не только к повышению удельной намагниченности композита при комнатной температуре, но и делает его рекордсменом среди всех прочих известных материалов, тем более полупроводниковых, рекомендуемых для спинтроники. В случае использования данного композита в качестве инжектора спинов это его свойство должно способствовать повышенной степени спинового токопереноса в спинтронных устройствах, что и продемонстрировано в [1].

Авторы признательны проф. Серегину П.П. (РГПУ им. А.И. Герцена, г. С.-Петербург) за помощь в проведении измерений мессбауэровских спектров композита на изотопе ^{151}Eu .

1. А. С. Борухович, Н. И. Игнатьева, А. И. Галяс и др., Спиновый транзистор. Заявка на патент. Приоритет # 2008139019 от 23.09.08.
2. А. С. Борухович, Н. И. Игнатьева, А. И. Галяс и др., Письма в ЖЭТФ **84**, 592 (2006).
3. Т. С. Альтшулер, Ю. В. Горюнов, М. С. Бреслер, ЖЭТФ **130**, 729 (2006).
4. А. С. Борухович, Н. И. Игнатьева, А. И. Галяс и др., *Материалы 1-й Межд. конф. по наноматериалам, "Беларусь-Россия-Украина"*, Нано-2008, г. Минск, с. 741.
5. A. S. Borukhovich, N. I. Ignat'eva, A. I. Galyas et al., *J. Nanoelectronics and Optoelectronics* **3**, 82 (2008).
6. С. А. Немов, А. В. Марченко, П. П. Серегин, Е. А. Томильцев, *Физика и химия стекла* **33**, 897 (2007).
7. K. Tanaka, N. Tatehata, K. Fujita, and K. Hirao, *J. Appl. Phys.* **89**, 2213 (2001).
8. А. С. Борухович, Н. И. Игнатьева, В. Г. Бамбуров, Доклады РАН **402** (2), 181 (2005).