сюда следует, что при достаточно больших отклонениях фокуса трубки  $\psi_0 \gg \Delta \psi + \varphi_d$ , при которых отсутствует прямое попадание лучей на экран и пропадает центральный штрих, число максимумов не зависит от угла  $\psi_0$ . Для используемых в [3] значений  $\psi_0$  число максимумов m = -0, 3, 6 и 8 соответственно, что хорошо совпадает с точным расчетом профиля I(x) на рис. 2.

Таким образом, из сопоставления рис. 2 и экспериментальных кривых в [3] видно удовлетворительное согласие как по числу максимумов и минимумов тонкой структуры, так и по форме профилей. В частности, из рис. 2 в полном соответствии с результатами измерений в работе [3] видно, что интенсивность I(x) не обращается в нуль в минимумах, что свидетельствует о большей предпочтительности и правильности используемого нами подхода по сравнению с расчетами, проведенными в работе [3].

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Аркадьев В. А., Коломийцев А. И., Кумахов М. А. и др.//УФН. 1989. 157, № 3. С. 529. [2] Мингазин Т. А., Зеленов В. И., Лейкин В. Н.// Приб. и техн. эксперимента. 1981. № 1. С. 229. [3] Лейкин В. Н., Мингазин Т. А., Зеленов В. И.//Там же. 1984. № 6. С. 33. [4] Дудчик Ю. И., Комаров Ф. Ф., Константинов Я. А.//Письма в ЖТФ. 1991. 17, № 6. С. 45. [5] Комаров Ф. Ф., Кумахов М. А.//Поверхность Физика, химия, механика. 1986. № 3. С. 5. [6] Дудчик Ю. И., Комаров Ф. Ф., Кумахов М. А. и др.//Письма в ЖТФ. 1991. 17, № 13. С. 82. [7] Дудчик Ю. И., Комаров Ф. Ф., Соловьев В. С., Тишков В. С.//Письма в ЖТФ. 1990. 16, № 1. С. 57. [8] Дудчик Ю. И., Комаров Ф. Ф., Кумахов М. А. и др.//Письма в ЖТФ. 1990. 16, № 15. С. 43. [9] Ананьин О. Б., Быковский Ю. А., Зверьков А. К., Фрондзей И. Я. //Квант. электроника. 1987. 14, № 3. С. 617. [10] Виноградова М. Б., Руденко О. В., Сухоруков А. П. Теория волн. М., 1979.

Поступила в редакцию 03.04.92

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1993. Т. 34, № 3

УДК 546.3

ОСОБЕННОСТИ ЛОКАЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ АТОМОВ В СПЛАВАХ СИСТЕМЫ Мп<sub>19.5-2</sub>.Fe<sub>0.5</sub>Sn<sub>2</sub>

А. С. Илюшин, И. А. Никанорова, В. С. Русаков, М. А. Мостафа \*), С.-М. Ш. Машаев (кафедра физики твердого тела)

Методом мёссбауэровской спектроскопии изучены особенности локальных распределений атомов в сплавах системы Мп<sub>19,5-x</sub>Fe<sub>0,5</sub>Sn<sub>x</sub>. Показано, что в сплавах квазибинарной системы возникают два различных типа локальных распределений в зависимости от состава.

Исследование сплавов квазибинарной системы  $\beta Mn_{19,5-x}Fe_{0,5}Sn_x$ . изоструктурных  $\beta$ -модификации марганца, проведенное нами в работах [1, 2], показало, что при низких температурах эти сплавы упорядочиваются антиферромагнитно и их температура Нееля  $T_N$  сложным образом зависит от содержания олова. Из [3] известно, что антиферромагнетизм сплавов «марганец—железо» обусловлен обменными магнитными взаимодействиями типа «Мп—Fe», поэтому в [1, 2] при интерпретации сложной концентрационной зависимости  $T_N(x)$  было использова-

\*) Египет.

но предположение о появлении в сплавах системы Mn<sub>19,5-x</sub>Fe<sub>0,5</sub>Sn<sub>x</sub> наряду с указанными выше типами обменных магнитных взаимодействий еще и взаимодействий типа «Sn—Sn», «Sn—Fe» и «Sn—Mn». Эти взаимодействия возникают в сплавах в результате формирования определенных локальных распределений атомов железа и олова в решетке β-марганца.

Развитая в работах [4—8] методика изучения локальных атомных распределений в сплавах на основе β-марганца с помощью мёссбауэровской спектроскопии была использована нами и в настоящей работе при изучении сплавов квазибинарной системы Mn<sub>19,5-x</sub>Fe<sub>0,5</sub>Sn<sub>x</sub>.

Для исследования были изготовлены сплавы Mn<sub>19,5-x</sub>Fe<sub>0,5</sub>Sn<sub>x</sub> следующих составов (по x): 0; 0,1; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25; 1,50; 1,60 и 1,70. Методика синтеза и термической обработки сплавов подробно описана в работе [2]. Рентгеновский фазовый анализ сплавов подтвердил их однофазность и изоструктурность β-модификации марганца.

Мёссбауэровское исследование выполнено при комнатной температуре на ЯГР-спектрометре электродинамического типа с равноускоренным движением источника. В качестве источника использовался <sup>57</sup>Со (Pd). Калибровка спектрометра по скоростям осуществлялась по эталону Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Обработка мёссбауэровских спектров проводилась по программе «РЕСТР» на персональном компьютере PC-286AT [9].

На рис. 1 приведены мёссбауэровские спектры поглощения от сплавов квазибинарной системы Mn<sub>19,5-x</sub>Fe<sub>0,5</sub>Sn<sub>x</sub> различных составов. Видно, что спектры сходны между собой и обладают однотипной сверхтонкой структурой (СТС), соответствующей двум типам поглощения. Рассмотрим более внимательно спектр сплава состава x=0 (рис. 1, а). Левое крыло спектра имеет почти лоренцевскую форму, а правое крыло характеризуется появлением дополнительного пика поглошения.

Введение в сплав примеси олова (x=0,1) сопровождается трансформацией спектра: небольшим искажением

Рис. 1. Мёссбауэровские спектры поглощения сплавов квазибинарной системы Mn<sub>19,5-x</sub>Fe<sub>0,5</sub>Sn<sub>x</sub>



правой части глубокого пика. По мере повышения концентрации олова в сплаве от x=0,1 до x=1,7 это искажение спектра монотонно усиливается, приводя к появлению третьего пика поглощения (рис. 1,  $\delta$ ). Согласно работам [10—12],  $\beta$ -марганец обладает сложной кубической структурой, относящейся к пространственной группе  $P4_13$ . В элементарной ячейке насчитывается 20 атомов, занимающих два структурно неэквивалентных положения: 8(c) и 12(d). И в том и в другом положениях атомы не имеют сферически симметричного окружения, поэтому можно ожидать появления СТС мёссбауэровского спектра из-за квадрупольного взаимодействия.

Расчеты СТС мёссбауэровских спектров сплавов Мп—Fe и Мп— Fe—Al, изоструктурных  $\beta$ -марганцу, проведенные в работах [4—8], показали, что атомы железа могут занимать как положения 8(c), так и положения 12(d) и каждому из положений соответствует свой квадрупольный дублет.

Как видно из рис. 1, *a*, в случае сплава системы  $Mn_{19,5-x}Fe_{0,5}Sn_x$  при x=0 в мёссбауэровском спектре присутствуют два квадрупольных дублета с различными значениями квадрупольных расщеплений  $\Delta E$ . Один из них с большей интенсивностью и с меньшей величиной  $\Delta E$  отвечает атомам железа в положениях 12(d), а другой, с меньшей интенсивностью и большей величиной  $\Delta E$  — атомам железа в положениях 8(c).

Оба дублета характеризуются и различными значениями изомерных сдвигов  $\delta$ , что свидетельствует о различии в электронных состояниях атомов железа в положениях 8(c) и 12(d).

По соотношению интегральных интенсивностей этих квадрупольных дублетов можно определить концентрацию атомов железа в том и другом положениях. Если бы атомы железа были распределены по положениям 8(c) и 12(d) статистически, то отношение интегральных интенсивностей дублетов было бы всегда равным 0,667 для сплавов всех составов. Однако для сплава состава x=0 это отношение оказалось равным 0,37, что свидетельствует в пользу преимущественного заполнения атомами железа положений 12(d).

В сплавах системы  $Mn_{19,5-x}Fe_{0.5}Sn_x$  с различным содержанием олова:  $0,1 \le x \le 1,7$  СТС мёссбауэровских спектров, как это видно из рис. 1, 6, 6, представляет собой суперпозицию трех квадрупольных дублетов. При этом следует обратить внимание на то, что значения изомерных химических сдвигов двух из них практически совпадают между собой. Это обстоятельство позволяет считать, что оба эти дублета относятся к атомам железа, занимающим положения 8(c) структуры  $\beta$ -марганца. Однако различие в величинах квадрупольных расщеплений указывает на то, что атомы железа в положениях 8(c) имеют различное ближайшее окружение.

Поскольку в сплавах Mn<sub>19,5-x</sub>Fe<sub>0,5</sub> в мёссбауэровских спектрах присутствуют только два дублета с квадрупольными расщеплениями  $\Delta E_{\star}$ равными 0,05 и 0,34 мм/с, и второй дублет связывается с атомами железа в положениях 8(c), постольку и в сплавах Mn<sub>19,5-x</sub>Fe<sub>0,5</sub>Sn<sub>x</sub>, содержащих олово (0,1 $\ll$ x $\ll$ 1,7), спектральный дублет с  $\Delta E$ =0,34 мм/с будет связываться с атомами железа в положениях 8(с) и имеющими в своем ближайшем окружении только атомы марганца. В системе Мп<sub>19,5-х</sub>Fe<sub>0,5</sub>Sn<sub>x</sub> в сплавах всех составов концентрация железа постоянна и составляет всего 2,5 ат. %, что соответствует одному атому железа на две элементарные ячейки сплава. Вероятность обнаружения двух атомов железа в одной и той же элементарной ячейке сплава составляет всего 6,25 10<sup>-8</sup>, а вероятность появления в ближайшем окружении атома железа другого атома железа еще меньше. Поэтому такие атомные конфигурации можно не учитывать и в дальнейших рассмотрениях можно считать, что квадрупольный дублет с  $\Delta E = 0.34$  мм/с

отвечает атомам железа в положениях 8(c), имеющим в ближайшем окружении только атомы марганца.

Исходя из этого в данной работе появление третьего квадрупольного дублета с  $\Delta E = 0,24 \div 0,28$  мм/с и изомерным сдвигом  $\delta \simeq 0,17 \div 0,22$  мм/с было интерпретировано как появление атомов олова в ближайшем окружении атомов железа в положениях 8(c). Согласно данным работы [13], атомы олова в сплавах Mn—Fe—Sn занимают только положения 8(c) структуры  $\beta$ -Mn. В пользу предположения о возникновении именно таких атомных конфигураций свидетельствует и факт увеличения интенсивности соответствующего квадрупольного дублета с ростом концентрации олова в системе Mn<sub>19,5-x</sub>Fe<sub>0,5</sub>Sn<sub>x</sub>.

На рис. 2 приведены кривые концентрационных зависимостей интегральных интенсивностей трех дублетов для сплавов системы  $Mn_{19,5-x}Fe_{0,5}Sn_x$  (полная интенсивность спектра составляет 100%). Двумя штриховыми линиями, параллельными оси абсцисс и отсекаю-



Рис. 2. Кривые концентрационных зависимостей интегральных интенсивностей трех дублетов для сплавов системы Мп<sub>19,5-x</sub>Fe<sub>0,5</sub>Sn<sub>x</sub>

щими на оси ординат значения, равные 40 и 60%, показаны концентрационные зависимости, соответствующие среднестатистическим распределениям атомов железа в положениях 8(c) и 12(d). Из рис. 2 видно, что кривая  $I_{(d)}(x)$ , отвечающая атомам железа в положениях типа 12(d), с ростом концентрации олова в сплаве от x=0 до x=1,7 монотонно, но нелинейно уменьшается от 73 до 42% и пересекает верхнюю штриховую линию вблизи значения  $x\simeq 0,9$ .

Две кривые  $I_{8(c)}(x)$  и  $I'_{8(c)}(x)$ , отвечающие атомам железа в положениях 8(c), имеющим в своем ближайшем окружении атомы марганца или атомы олова соответственно, ведут себя более сложным образом. В то время как значения  $I_{8(c)}(x)$  монотонно спадают от 27% при x=0 до 10% для x=1,7, значения  $I'_{8(c)}(x)$  возрастают при этом от 0 до 42%. Суммарная интегральная интенсивность обоих дублетов  $I_{8(c)} + I'_{8(c)}$  монотонно растет от 27 до 58% при изменении x от 0 до 1,7 и пересекает нижнюю штриховую линию также вблизи  $x\simeq0,9$ .

Полученные данные могут быть интерпретированы следующим образом. В сплаве состава x=0 имеет место локальное атомное упорядочение, при котором атомы железа преимущественно сосредоточиваются в положениях типа 12(d). Такое распределение атомов железа по решетке  $\beta$ -марганца в системе  $Mn_{19,5-x}Fe_{0,5}Sn_x$  сохраняется при повышении концентрации олова почти до x=0,9.

В сплавах с более высоким содержанием олова  $(0,9 < x \le 1,7)$  атомы железа преимущественно заполняют уже положения типа 8(c). Анализ хода концентрационных зависимостей интегральных интенсивностей для парциальных мёссбауэровских спектров  $I_{8(c)}(x)$  и  $I'_{8(c)}(x)$ показал, что атомы железа переходят в положения 8(c) с образованием таких локальных атомных конфигураций, которые в ближайшем окружении имеют атомы олова, т. е. в этих конфигурациях возникают пары «железо—олово». Существенное возрастание концентрации атомов железа в таких локальных областях, обогащенных также и оловом, происходит за счет перераспределения атомов железа как из положений типа 12(d), так и из положений типа 8(c) с ближайшим окружением из атомов марганца.

Таким образом, из данных мёссбауэровских измерений следует, что в сплавах квазибинарной системы могут возникать два разных типа локальных распределений в зависимости от состава. В области концентраций олова 0 < x < 0,9 атомы железа преимущественно занимают положения типа 12(d), а в области концентраций 0.9 < x < 1.7 — положения типа 8(с). При этом увеличение концентрации железа наблюдается только в таких положениях типа 8(c), которые в своем ближайшем окружении имеют атомы олова.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Ilyushin A. S., Mashaev S. S., Nikanorova I. A. et al.//ICAME. Budapest, 1989. V. 1. P. 3.19. [2] Илюшин А. С., Никанорова И. А., Ма-шаев С.-М. Ш., Мостафа М. А.//Металлы. 1990. № 6. С. 165. [3] Никано-рова И. А., Илюшин А. С.//ФММ. 1983. 55. С. 1215. [4] Илюшин А. С.//Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1980. 21, № 1. С. 94. [5] Илюшин А. С., Кациель-сон А. А., Никанорова И. А.//Изв. вузов, Физика 1981. № 3. С. 86. [6] Илю-шин А. С., Никанорова И. А.//Изв. вузов, Физика 1981. № 3. С. 86. [6] Илю-шин А. С., Никанорова И. А.//Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1982. 23, № 5. С. 27. [7] Илюшин А. С., Никанорова И. А., Николаев А. А.//Изв. ву-зов, Физика. 1984. № 6. С. 116. [8] Илюшин А. С., Никанорова И. А.//ФММ. 1984. 57. С. 1242. [9] Русаков В. С.//Тез. докл. Всесоюз. совеш. «Прикладиая мёссбауэровская спектроскопия». Казань, 1990. С. 25. [10] Ргезтоп G. D.//Phil. Маg. 1928. 5, № 32. Р. 1207. [11] Юм-Розери В., Рейнор Г. В. Структура металлов и сплавов. М., 1959. [12] Крипякевич П. И.//Кристаллография. 1960. 5, № 2. С. 273. [13] Nishihara Y., Одаwа S., Waki S.//J. Phys. Soc. Japan. 1977. 42, N 3. Р. 845.

Поступила в редакцию 21.04.92

ВЕСТН. МОСК, УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1993. Т. 34, № 3

УДК 537.312.8+543.253

## СПИН-ФОНОН-ЭЛЕКТРОННЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКАХ

А. В. Ведяев, М. И. Зубцов, М. А. Савченко, А. В. Стефанович (кафедра магнетизма)

Рассматриваются спектры спиновых возбуждений (спиновых флуктуаций) в сверхпроводящей фазе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) типа La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub> и YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-y</sub> и их влияние на термодинамические характеристики данного класса соединений и прежде всего на низкотемпературную теплоемкость, ко-торая, как показано, имеет степенную зависимость от температуры. Рассмотрены также спектры связанных спин-фононных колебаний в области значений волнового вектора  $k \simeq k_F$  ( $\hbar k_F$  — импульс Ферми), ответственных за возникновение связанных электронных пар в сверхпроводящем состоянии. Показано, что критическая температура ВТСП Т<sub>с</sub>, определяемая параметром линейной спин-фононной связи С, пля данного класса соединений ограничена по величине, что требует более детального рассмотрения спин-электронных корреляций в ВТСП.

В работах [1, 2] была рассмотрена спин-волновая динамика высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) типа La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub> и  $YBa_2Cu_3O_{7-\mu}$ , в которых экспериментально наблюдается сосуществование антиферромагнитной и высокотемпературной сверхпроводящей фаз, причем максимальное значение критической температуры T<sub>c</sub> соответствует максимальному значению параметра линейной спин-фононной связи  $\zeta_i$ , который определяется отношением  $k_s/k_c$ , где  $k_s$  — волновой