

прямолинейной точки либрации ограниченной фотогравитационной задачи трех тел может происходить накопление частиц пылевого облака.

Возможности практического использования прямолинейного решения в рамках общей фотогравитационной задачи трех тел пока не вполне ясны.

Возможно, по-видимому, использование рассмотренной задачи и в электростатике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Радзиевский В. В. Астрон. журн., 1950, 27, с. 250. [2] Радзиевский В. В. Там же, 1953, 30, с. 256. [3] Лукьянов Л. Г. Там же, 1984, 61, с. 564. [4] Лукьянов Л. Г. Там же, 1984, 61, с. 789. [5] Мещерский И. В. Работы по механике тел переменной массы. М.: ГИТЛ, 1952.

Поступила в редакцию
18.02.85

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1986, т. 27, № 2

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 546.3

ЛОКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АТОМОВ ЖЕЛЕЗА И МАРГАНЦА В ИНТЕРМЕТАЛЛИДАХ КВАЗИБИНАРНОЙ СИСТЕМЫ $\text{Er}(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_2$

А. С. Илюшин, Д. А. Кастро (Венесуэла), И. А. Махмуд (АРЕ)

(кафедра физики твердого тела)

В последние годы внимание исследователей привлечено к магнетикам, синтезированным на основе редкоземельных металлов. Особое место среди них занимают соединения со структурами фаз Лавеса C14 , C15 и C36 : некоторые представители этих соединений обладают уникальными магнитными характеристиками, такими как «гигантская магнитострикция» [1—5]. Наиболее перспективными для использования в качестве магнитных материалов при создании новой техники являются тройные и многокомпонентные сплавы на основе двойных интерметаллических соединений типа TbFe_2 и TbCo_2 . Замещение атомов переходных металлов в $3d$ -подрешетке интерметаллических соединений типа $R(T'_{1-x}T''_x)_2$ позволяет получать для них константы магнитострикции λ , значительно превосходящие их рекордные значения для соединений TbFe_2 и TbCo_2 [6]. В связи с этим представляет значительный интерес изучение локального распределения атомов в $3d$ -подрешетке тройных интерметаллидов $R(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_2$ и установление его влияния на магнитные свойства соединений различного состава. Однако до настоящего времени систематические исследования подобного рода в литературе отсутствовали.

В работах [7—9] разработана методика мёссбауэровских исследований локального распределения атомов железа и марганца в сплавах со сложной атомно-кристаллической структурой и обнаружено атомное упорядочение в твердых растворах железа в α и β модификациях марганца.

Целью настоящей работы является экспериментальное изучение локального распределения атомов железа и марганца в квазибинарной системе интерметаллидов $\text{Er}(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_2$.

Образцы и методика эксперимента. Образцы интерметаллических соединений квазибинарной системы $\text{Er}(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_2$ выплавлялись из металлов чистотой 99,99% в индукционной печи в атмосфере очищенного аргона методом бестигельной плавки [10]. Вес слитков не превышал 2,5 г, отклонение веса слитков от веса шихты было не более 0,1%. Все слитки переплавлялись по 3—4 раза, после чего запаивались в кварцевые ампулы, наполненные аргоном, и подвергались гомогенизирующему отжигу при температуре 900°C в течение двух недель. Были приготовлены соединения системы $\text{Er}(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_2$ следующих составов: $x=0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0$.

Рентгеновское исследование проводилось на дифрактометре УРС-50 ИМ в фильтрованном излучении от железного анода. Мёссбауэровские спектры поглощения получали при комнатной температуре на установке типа «Эльрон» с источником $^{57}\text{Co}(\text{Pd})$. Калибровка спектрометра осуществлялась по карбонильному α -железу.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Рентгеновский фазовый анализ сплавов системы $\text{Er}(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_2$, проведенный при комнатной температуре, показал, что все приготовленные образцы однофазны и в области составов $0 \leq x \leq 0,7$ изоструктурны фазе Лавеса C15 с кубической структурой, а в области составов $0,8 \leq x \leq 1,0$ изоструктурны фазе Лавеса C14 с гексагональной структурой [11]. Переход от структурного типа C14 к структурному типу C15 в системе $\text{Er}(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_2$ происходит путем образования дефектов упаковки.

Ввиду близости значений амплитуд атомного рассеяния f для атомов марганца и железа традиционные рентгеновские методы оказываются неэффективными при изучении локального распределения атомов в сплавах и соединениях, содержащих эти элементы [12]. Подобная задача может быть успешно решена с помощью метода ядерного гамма-резонанса (эффекта Мёссбауэра) [7—9, 13].

На рис. 1 приведены типичные ЯГР-спектры поглощения интерметаллидов квазибинарной системы $\text{Er}(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_2$. Видно, что все спектры обладают сверхтонкой структурой (СТС), причем СТС ЯГР-спектров для интерметаллидов системы $\text{Er}(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_2$ составов $x=0$ и 0,2 существенно отличается от случая, когда $0,4 \leq x \leq 0,9$. Согласно данным [14], изоморфное замещение атомов железа атомами марганца в этой системе приводит к резкому уменьшению температуры Кюри T_C тройных соединений. Так, например, T_C соединения ErFe_2 равна 590 К, соединения $\text{Er}(\text{Fe}_{0,8}\text{Mn}_{0,2})_2$ — 444 К, а соединения $\text{Er}(\text{Fe}_{0,6}\text{Mn}_{0,4})_2$ — 225 К. Последующее увеличение концентрации марганца в системе $\text{Er}(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_2$ до $x=0,6; 0,8$ и 1,0 уменьшает T_C соответственно до 136, 49 и 25 К. Таким образом, лишь только два интерметаллида ErFe_2 и $\text{Er}(\text{Fe}_{0,8}\text{Mn}_{0,2})_2$ системы $\text{Er}(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_2$ при комнатной температуре находятся в магнитоупорядоченном состоянии. Именно это обстоятельство и обуславливает различие СТС ЯГР-спектров системы $\text{Er}(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_2$. СТС первых двух спектров на рис. 1 вызвана зеемановским расщеплением [12], СТС остальных — квадрупольным электрическим взаимодействием.

Известно, что у интерметаллида ErFe_2 вектор спонтанного магнитного момента \mathbf{M} ориентирован вдоль оси $\langle 111 \rangle$. В результате этого атомы железа в структуре C15 занимают два типа мест, эквивалентных в кристаллографическом, но не эквивалентных в магнитном отношении, причем соотношение числа этих мест равно 3:1 [15]. Поэтому СТС ЯГР-спектра интерметаллида ErFe_2 представляет собой суперпозицию двух зеемановских секстетов с отношением интегральных интенсивностей 3:1 (см. рис. 1, а).

Изоморфное замещение 20% атомов железа атомами марганца в $3d$ -подрешетке интерметаллида $\text{Er}(\text{Fe}_{0,8}\text{Mn}_{0,2})_2$ существенно усложняет вид СТС ЯГР-спектра (см. рис. 1, б). Сам спектр слегка сужается, четкость линий, его составляющих, ухудшается, а интенсивность центральных линий возрастает. Такой характер ЯГР-спектров объясняется тем, что данные образцы являются фазами переменного состава и в них имеется локальный «разброс» эффективных магнитных полей на ядрах железа [16].

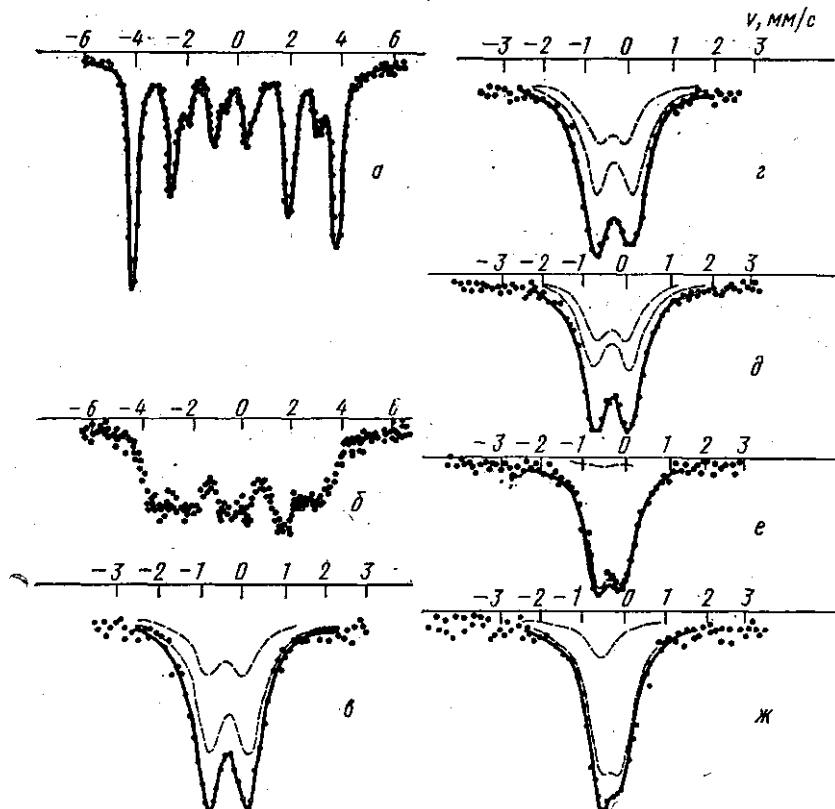
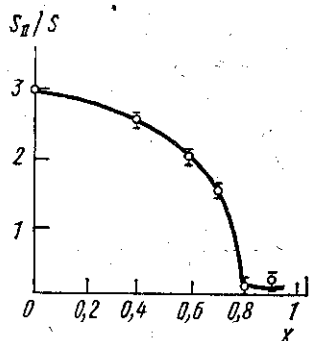


Рис. 1. Мёссбауэровские спектры интерметаллидов квазибинарной системы $\text{Er}(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_2$ составов по x : 0 (а), 0,2 (б), 0,4 (в), 0,6 (г), 0,7 (д), 0,8 (е) и 0,9 (ж)

СТС ЯГР-спектров интерметаллидов системы $\text{Er}(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_2$ в области составов $0,4 \leq x \leq 0,9$ однотипна и представляет собой спектральный дублет, расщепление компонент которого уменьшается по мере увеличения в системе концентрации марганца (ср. рис. 1, в и г—ж). Начиная с состава $x=0,4$ все интерметаллиды этой системы находятся в парамагнитном состоянии и СТС их ЯГР-спектров обусловлена только квадрупольным электрическим взаимодействием, поэтому расчет ее можно провести на основе модели, предложенной в работе [13]. Согласно [1—5], редкоземельные фазы Лавеса C14 и C15 RT_2 , где R — тяжелые редкоземельные металлы, а T — $3d$ -переходные, представляют собой двухподрешеточные ферримагнетики. Подрешетки $3d$ -переходного металла в фазах C14 и C15 имеют однотипное

строение и представляют собой тетраэдры, сочлененные либо вершинами, либо основаниями. Отличие подрешеток в структурах C14 и C15 заключается лишь в характере чередования сочлененных вершин и оснований тетраэдров [1, 5].

В тройных интерметаллидах системы $\text{Er}(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_2$ резонансные атомы железа могут занимать узлы как в вершинах тетраэдров, так и в их основаниях, причем электронные конфигурации атомов железа в этих положениях различны [13]. Поэтому СТС ЯГР-спектров интер-



металлидов в парамагнитном состоянии должна состоять из двух спектральных дублетов, отличающихся изомерными химическими сдвигами. При статистическом распределении атомов железа и марганца по вершинам и основаниям тетраэдров $3d$ -подрешеток фаз C14 и C15 отношение интегральных интенсивностей спектральных дублетов I и II должно быть

Рис. 2. Концентрационная зависимость отношения интегральных интенсивностей ЯГР-спектров, отвечающих положениям резонансных атомов железа в основаниях и вершинах тетраэдров в $3d$ -подрешетках интерметаллидов системы $\text{Er}(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_2$.

равно отношению числа узлов типа I к числу узлов типа II, т. е. 1:3. В противном случае атомы железа и марганца будут распределены упорядоченно по узлам $3d$ -подрешеток фаз C14 и C15.

Результаты расчетов СТС ЯГР-спектров интерметаллидов системы $\text{Er}(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_2$ представлены на рис. 1, в—ж в виде штриховых и сплошных линий. Штриховые линии изображают исходные спектральные дублеты, отвечающие резонансным атомам железа в положениях I и II, а сплошная линия дает форму теоретически рассчитанного ЯГР-спектра. Точки представляют собой экспериментальные спектры. Из рис. 1 видно, что имеется хорошее согласие расчета с экспериментом.

На рис. 2 изображен график концентрационной зависимости отношения интегральных интенсивностей ЯГР-спектров, отвечающих положениям атомов железа в основаниях и вершинах тетраэдров $3d$ -подрешеток фаз C14 и C15, в системе $\text{Er}(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_2$. Из рис. 2 видно, что по мере изоморфного замещения атомов железа атомами марганца в узлах $3d$ -подрешетки величина этого отношения уменьшается от 3 (для состава с $x=0$) почти до нуля (для составов с $x=0,8$ и $0,9$). Такая зависимость отношения интегральных интенсивностей указывает на то, что атомы железа в тройной системе интерметаллидов $\text{Er}(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_2$ предпочитают узлы в вершинах тетраэдров в $3d$ -подрешетках, а атомы марганца — узлы в основаниях тетраэдров. Вблизи состава интерметаллида, отвечающего стехиометрии $\text{Er}(\text{Fe}_{0,25}\text{Mn}_{0,75})_2$, практически все атомы железа сосредоточены в вершинах тетраэдров, а атомы марганца — в основаниях, т. е. реализуется тройная сверхструктура.

Более подробное рассмотрение характера локального окружения атомов переходных металлов в фазах C14 и C15 при образовании тройной сверхструктуры стехиометрии $\text{Er}(\text{Fe}_{0,25}\text{Mn}_{0,75})_2$ показало, что атомы железа окружены только шестью атомами марганца, а атомы марганца в качестве ближайших соседей имеют четыре атома марганца и два атома железа. Таким образом, в полностью упорядоченной

тройной сверхструктуре образуются только пары типа «марганец — марганец» и «марганец — железо», а пары «железо — железо» не образуются. Любое отклонение от полного порядка приводит к появлению пар типа «железо — железо» и к уменьшению числа пар типа «марганец — марганец» и «марганец — железо».

В работе [17] проведен расчет энергий межатомного взаимодействия в сплавах переходных металлов и, в частности, показано, что энергия взаимодействия атомов марганца друг с другом превосходит энергию взаимодействия атомов железа: $E_{MnMn} > E_{FeFe}$, а энергия взаимодействия атомов железа с атомами марганца занимает промежуточное значение между E_{MnMn} и E_{FeFe} . Отсюда ясно, что благодаря такому различию в энергиях межатомного взаимодействия более выгодным с энергетической точки зрения становится увеличение в системе $Eg(Fe_{1-x}Mn_x)_2$ числа пар «марганец — марганец» и «марганец — железо» и уменьшение числа пар «железо — железо». Именно такая ситуация и реализуется при упорядочении атомов в этой системе.

Подобная закономерность в локальном распределении атомов железа и марганца была обнаружена в системе $Ti(Fe_{1-x}Mn_x)_2$ [13] и в сплавах «марганец — железо» с различной атомно-кристаллической структурой [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Теслюк М. Ю. Металлические соединения со структурами фаз Лавеса. М.: Наука, 1969. [2] Wallace W. E. Rare Earth Intermetallics. N. Y.—Ldn., 1973. [3] Тейлор К. Интерметаллические соединения редкоземельных металлов. М.: Мир, 1974. [4] Белов К. П. Редкоземельные магнетики и их применение. М.: Наука, 1980. [5] Илюшин А. С. Введение в структурную физику редкоземельных интерметаллических соединений. М.: Изд-во МГУ, 1984. [6] Белов К. П., Звездин А. К., Кадомцева А. М., Левитин Р. З. Ориентационные переходы в редкоземельных магнетиках. М.: Наука, 1979. [7] Илюшин А. С. Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон., 1980, 21, № 1, с. 94. [8] Илюшин А. С., Никанорова И. А. Там же, 1982, 23, № 5, с. 27. [9] Илюшин А. С., Корчажкин В. В. ФММ, 1980, 49, с. 1323. [10] Ilyushin A. S., Wallace W. E. J. Solid State Chemistry, 1976, 17, p. 131. [11] Илюшин А. С. ФММ, 1977, 43, с. 1249. [12] Жданов Г. С., Илюшин А. С., Никитина С. В. Дифракционный и резонансный структурный анализ. М.: Наука, 1980. [13] Sharon T. E., Tsuei C. C. Phys. Rev. B, 1970, 2, p. 2302. [14] Merches M., Narasimhan K. S. V. E., Wallace W. E., Ilyushin A. S. AIP Conf. Proc., 1976, N 34, p. 233. [15] Wertheim G. K., Wernick J. H. Phys. Rev., 1962, 125, p. 1937. [16] Чекин В. В. Мёссбауэровская спектроскопия сплавов железа, золота и олова. М.: Энергоиздат, 1981. [17] Панин В. Е., Хон Ю. А., Наумов И. И. Теория фаз в сплавах. Новосибирск: Наука, 1984.

Поступила в редакцию
05.02.85

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1986, т. 27, № 2

УДК 537.534

РАСЧЕТ РАСПЫЛЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛА НИКЕЛЯ ПРИ МАГНИТНОМ ФАЗОВОМ ПЕРЕХОДЕ

В. Н. Самойлов, В. А. Эльтеков, В. Е. Юрасова

(кафедра электроники; кафедра математики)

В ряде газоразрядных приборов используются конструкционные магнитные материалы, точка Кюри которых лежит в рабочем диапазоне приборов. Для таких материалов важно знать, как изменяется коэффициент распыления S при переходе из ферро- в парамагнитное состояние ($f \rightarrow p$). В [1—2] было обнаружено, что при $f \rightarrow p$ переходе происходит скачкообразное увеличение на 20—30% S для Ni и Gd и такое